



TESIS DE MAESTRÍA

Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial: Caso Río Uruguay.

Autor:

Melissa Casterá

Tutor:

Dr. Ing. Gabriel Usera

Co-tutor:

Msc. Ing. Eugenio Lorenzo

Maestría de Ingeniería Ambiental

Grupo de Mecánica de los Fluidos Computacional
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental

15 de mayo de 2015

Resumen

Facultad de Ingeniería

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental

Maestría de Ingeniería Ambiental

**Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial:
Caso Río Uruguay.**

El río Uruguay es uno de los principales afluentes del Río de la Plata. Su tramo inferior ubicado entre Argentina y Uruguay ha sido sometido a nuevas controversias ambientales desde hace casi una década, específicamente concerniendo a la descarga de la planta de celulosa UPM implantada en la margen uruguaya. Esto ha despertado el interés por parte del gobierno y la academia de Uruguay de avanzar en las implicancias ambientales de dicha planta con el río Uruguay. En este contexto, el objetivo principal de esta Tesis consiste en analizar el transporte de los efluentes descargados por UPM en el río Uruguay.

En primer lugar, a modo de alcanzar el objetivo, se requiere la configuración de un modelo hidrodinámico como plataforma de simulación numérica. La información de base accedida en este trabajo posibilita la configuración de un modelo hidrodinámico bidimensional integrado en la vertical para el río Uruguay, utilizando el software MOHID (modelo baroclínico tridimensional). Se configura dicho modelo para el tramo de unos 350km comprendido entre la Represa Salto Grande y la ciudad de Nueva Palmira (Uruguay). El modelo es calibrado y validado para distintos escenarios de caudales, con especial énfasis en el ajuste en la zona aledaña a la planta UPM. La configuración batimétrica es obtenida a partir de la articulación y combinación de diferentes conjuntos de información topográfica. Los datos hidrológicos disponibles son utilizados para establecer los escenarios de simulación y para el ajuste del modelo. En cuanto a este último, la información utilizada consiste en datos horarios de nivel registrados en la estación de Fray Bentos junto con las estaciones de Paysandú (Uruguay) y Boca Gualeguaychú.

Previo a la etapa de calibración se incluye un análisis de la respuesta del modelo ante distintas variables de implementación, como el viento, los aportes de caudal laterales, la batimetría y otras opciones de configuración del modelo, las cuales pueden contribuir a la mejora del modelo hidrodinámico. Para cada una de estas variantes se analiza la desviación de los resultados del modelo respecto a los datos registrados. En base a ello se implementa la configuración del modelo que mejor refleja los datos reales de niveles medidos en Fray Bentos. Por medio del proceso de calibración se ajusta el coeficiente de rugosidad de fondo y con ello se obtiene una configuración final del modelo, la cual luego es validada. El modelo obtenido resulta confiable principalmente para escenarios de caudales bajos y medios que son los de mayor interés ambiental por involucrar mayores concentraciones de contaminantes en el río.

Las simulaciones realizadas permiten identificar la ocurrencia de fenómenos de inversión de flujo parcial y total en la sección, principalmente ante situaciones de caudales bajos y medios debido a la influencia de la marea que actúa sobre el Río de la Plata. En casos extremos, la inversión de flujo puede extenderse hasta la ciudad de Paysandú y con ello superar los 200km de extensión.

Mediante la modelación se determinan los tiempos de residencia en diferentes sectores de la zona aledaña a la descarga de UPM, los cuales varían según las características morfológicas del medio y también dependen fuertemente de las condiciones hidrodinámicas del río prevalentes en el lapso durante el cual se determina dicho tiempo, incluida la potencial existencia de inversiones de flujo que afectan los mecanismos de advección y difusión.

Finalmente se analiza el comportamiento de la pluma de descarga de la planta UPM con la simulación de una descarga puntual continua de un trazador pasivo, para lo cual se adopta una intensidad de turbulencia de referencia y se complementa con un análisis de sensibilidad ante variaciones de la misma. Se analiza la conformación de la pluma de descarga y la influencia de las inversiones de flujo y la morfología del río en la trayectoria de las partículas, los cuales son tres factores que afectan el transporte de las partículas descargadas al río. Se determina la fracción de efluente descargado que permanece en zonas próximas a su emisión, tanto en las bahías y otras zonas del cauce principal del río. Se detecta que eventos de inversión de flujo intensos favorecen la permanencia de partículas en el entorno de la zona de UPM, ocasionando el incremento de los tiempos de residencia en algunos sectores ya que las inversiones favorecen el ingreso de partículas a algunas bahías e inclusive pueden desencadenar que la inversión de la pluma de descarga suceda desde el punto de emisión de las partículas. También se observa que cambios rápidos en el sentido del flujo favorecen el desprendimiento de partículas de la pluma, pudiendo ingresar éstas a zonas con menor capacidad de renovación.

Este trabajo resulta en la configuración de una herramienta como plataforma de partida para futuros estudios. Los resultados obtenidos asociados al transporte de los efluentes de UPM descargados al río Uruguay anticipa el comportamiento de la pluma de descarga ante diferentes condiciones hidrodinámicas. Asimismo, se identifican áreas aledañas a la descarga de UPM donde la tasa de renovación de fluido es pequeña. Finalmente se presentan recomendaciones para futuras campañas de monitoreo y futuros trabajos de investigación.

Palabras llave: modelación numérica, río Uruguay, contaminantes, planta de celulosa

Abstract

School of Engineering

Fluids Mechanics and Environmental Engineering Institute

Master in Environmental Engineering

**Numerical modeling of the fate and transport of effluents in inland waters:
the Uruguay River case study.**

The Uruguay River is one of the most important inflows of the La Plata River. In the past decade, there has been a dispute between Argentina and Uruguay regarding environmental issues among the southern portion of Uruguay River, specifically concerning the discharge of the pulp mill UPM, which is located on the Uruguayan river bank. This triggered the Uruguayan government and academy interest in the environmental interactions between the Uruguay River and the UPM pulp mill. In this context, the aim of the present Master's thesis focuses on the analysis of the transport and fate of the effluents discharged by UPM into the Uruguay River.

Firstly, in order to execute this task, the performance of a hydrodynamic model as a simulation work tool is required. It is set a vertically integrated hydrodynamic model of the Uruguay River, using the software MOHID (three-dimensional baroclinic model). The model covers the river stretch of around 350km long limited by Salto Grande Dam and the city of Nueva Palmira (Uruguay). The model is calibrated and validated for different flow scenarios, giving priority to the model results obtained in the UPM surrounding area while evaluating the model fitting. The bathymetric configuration is performed from the beginning by assembling several sets of topographic data. The available hydrological data is used for defining the periods for the simulation scenarios and for the model fitting. In the latter case, the information used consists of hourly water level records at Fray Bentos station in addition to water level records in the stations of Paysandú (Uruguay) and Boca Gualeguaychú.

Previously to the model calibration it is analyzed how the model outputs are affected by changes in the values of different variables, such as wind, lateral inflows, bathymetry and other model settings that may contribute to the enhancement of the hydrodynamic model. This way the model outputs for each one of the different configurations are compared to the real records. The configuration of the model is finally set accordingly to the one which outcomes are optimal. Through the calibration process the roughness coefficient is adjusted and thus a final model configuration is obtained, which afterwards is validated. The model obtained is reliable mainly for scenarios of low and average flows that are of greatest environmental interest as they involve higher concentrations of pollutants within the river.

From the model simulations it is possible to identify the occurrence of reversal phenomena concerning partially and complete negative flow along a river section, basically because the tidal influence of the La Plata River is of great importance when the Uruguay River's flow is low or around average. The flow reversal, in extreme cases, can reach the city of Paysandú thus the reversal may be extended beyond 200km.

By computing residence times in different portions of the region near the discharge of UPM, it is concluded that they depend on the morphological characteristics of the water

portion that is considered and also on the prevailing hydrodynamic conditions along the river in the period during which the residence time is calculated. The latter refers to the potentially existence of flow reversals that affect advection and diffusion mechanisms.

Finally, the UPM's discharge in the Uruguay River is set in the model as a continuous discharge of a conservative tracer at a single point, for which a turbulence intensity coefficient is primarily adopted and a sensitivity analysis is developed. The shape of the discharge plume, the influence of potential negative flows on the behavior of this plume and the river morphology are three factors that have an impact on the fate of the particles that are discharged into the river. The fraction of discharged effluent that remains in certain areas is calculated, including bays and other areas of the main river channel that are located near the discharge. It is found that flow reversals intensify the retention of particles in the surroundings of UPM plant increasing the residence time as they cause the entry of particles to nearby bays and even cause a reversal of the discharge plume in the first kilometers from the discharge point. Also abrupt changes in the river flow direction favor some particles detaching from the main plume reaching river areas with lower capacity for renewal.

All things considered, this research results in the development of an unprecedented tool as a first approach for future studies. The outcomes concerning the fate of the discharges of UPM pulp mill into the Uruguay River show the behavior of the UPM discharge plume at different hydrodynamic conditions. In addition, the areas located in the region adjacent to the discharge of UPM where renewal rate is low attention are identified. Final recommendations are made for future water quality monitoring and studies.

Keywords: numerical modeling, Uruguay River, pollutants, pulp mill

Índice general

Resumen	III
Abstract	VI
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XIX
Abreviaturas y acrónimos	XXIII
1. Introducción	1
1.1. Contextualización	1
1.2. Ubicación geográfica	1
1.3. Área de estudio	2
1.3.1. Río Uruguay	3
1.3.1.1. Tramo inferior del río Uruguay	3
1.3.1.2. Hidrodinámica y características	5
1.3.1.3. Calidad de aguas	11
1.3.1.4. Usos del río	12
1.3.1.5. Administración y regulación	13
1.3.2. Planta de celulosa UPM	16
1.3.2.1. Efluente líquido descargado	18
1.3.3. Monitoreos del río Uruguay en torno a la descarga de la planta . .	19
1.4. Objetivos planteados	24
1.5. Estructura del informe	25
2. Revisión Bibliográfica	29
2.1. Introducción	29
2.2. Procesos hidrodinámicos en ríos	30
2.3. Contaminantes y su dispersión en ríos	32
2.4. Las plantas de celulosa y los recursos hídricos	44
2.5. Modelación numérica	48
2.5.1. Introducción	48
2.5.2. Aplicaciones en el río Uruguay	49
2.5.3. Aplicaciones en ríos de la región	60

2.5.4.	Selección del software	62
2.6.	Descripción del modelo	63
2.6.1.	Características generales	64
2.6.2.	Ecuaciones gobernantes	67
2.6.2.1.	Hidrodinámica	67
2.6.2.2.	Turbulencia	68
2.6.2.3.	Transporte	69
2.6.3.	Discretización de las ecuaciones	70
2.6.3.1.	Discretización espacial	70
2.6.3.2.	Discretización temporal	70
2.6.4.	Condiciones iniciales y de borde	71
2.6.4.1.	Condiciones iniciales	71
2.6.4.2.	Condiciones de borde	71
2.6.5.	Trazadores lagrangeanos	73
3.	Análisis Hidrológico	75
3.1.	Introducción	75
3.2.	Datos hidrológicos de base	77
3.2.1.	Caudales característicos	78
3.2.2.	Análisis Estadístico	79
3.3.	Selección de escenarios	80
3.3.1.	Los fenómenos SO	81
3.3.2.	ENSO y los recursos hídricos	83
3.3.3.	Selección de períodos de simulación	84
3.3.3.1.	Introducción	84
3.3.3.2.	Análisis entre caudales y ONI	87
3.3.3.3.	Análisis entre caudales y SOI	90
3.3.3.4.	Resultados	94
3.3.4.	Análisis de información hidrológica horaria para los períodos seleccionados	97
3.3.4.1.	Períodos de caudales bajos	97
3.3.4.2.	Períodos de caudales medios	100
3.3.4.3.	Períodos de caudales altos	102
3.3.4.4.	Conclusiones	106
4.	Batimetría	109
4.1.	Introducción	109
4.2.	Curvas de nivel batimétricas	110
4.3.	Puntos batimétricos en las inmediaciones de UPM	111
4.4.	Puntos batimétricos del canal de navegación	113
4.5.	Atlas del río Uruguay	116
4.6.	Imágenes satelitales	117
4.7.	Procesamiento información batimétrica	121
4.8.	Configuración batimétrica obtenida	127
5.	Modelación Hidrodinámica	131
5.1.	Introducción	131

5.2.	Estrategia de implementación	132
5.3.	Información utilizada	136
5.3.1.	Condiciones de borde	137
5.3.1.1.	Condición de frontera abierta	138
5.3.1.2.	Condiciones de aportes de caudal	138
5.3.2.	Períodos de simulación	140
5.4.	Esquematización original	141
5.4.1.	Tiempo de tránsito	142
5.4.2.	Influencia de marea	143
5.4.3.	Resultados para períodos seleccionados	146
5.4.3.1.	Situación caudales bajos	146
5.4.3.2.	Situación caudales medios	149
5.4.3.3.	Situación caudales altos	151
5.4.4.	Conclusiones	156
5.5.	Ajustes a incorporar	158
5.5.1.	Aporte del río Negro	160
5.5.2.	Aporte del río Gualaguaychú	163
5.5.3.	Influencia del viento	163
5.5.4.	Batimetría	172
5.5.4.1.	Profundización del cauce	173
5.5.4.2.	Profundización de todo el dominio	181
5.5.4.3.	Profundización de la planicie	182
5.5.4.4.	Extensión de planicies	183
5.5.4.5.	Modificación de la resolución batimétrica	184
5.5.5.	Conclusiones	185
5.6.	Control de oscilaciones numéricas	187
5.7.	Proceso de calibración	189
5.7.1.	Coeficiente de rugosidad	190
5.7.2.	Conclusiones	194
5.8.	Esquematización finalmente adoptada	195
5.8.1.	Resultados para períodos seleccionados	196
5.8.1.1.	Situación caudales bajos	196
5.8.1.2.	Situación caudales medios	200
5.8.1.3.	Situación caudales altos	205
5.9.	Validación de resultados obtenidos	207
5.9.1.	Resultados para períodos seleccionados	207
5.9.1.1.	Situación caudales bajos	207
5.9.1.2.	Situación caudales medios	210
5.9.1.3.	Situación caudales altos	213
5.10.	Conclusiones finales	215
5.11.	Modelo encajado Padre-Hijo	216
6.	Modelación de Contaminantes	219
6.1.	Introducción	219
6.2.	Tiempos de residencia	220
6.2.1.	Descripción del módulo Lagrangiano	222
6.2.2.	Metodología	224

6.2.3.	Configuración del modelo	225
6.2.4.	Resultados	226
6.2.4.1.	Caudales medios	227
6.2.4.2.	Caudales bajos	233
6.2.4.3.	Análisis de sensibilidad	240
6.2.5.	Conclusiones	243
6.3.	Transporte de contaminantes	248
6.3.1.	Metodología	249
6.3.2.	Configuración del modelo	250
6.3.3.	Resultados	252
6.3.3.1.	Caudales bajos	253
6.3.3.2.	Caudales medios	256
6.3.4.	Análisis de sensibilidad	261
6.3.5.	Conclusiones	263
7.	Conclusiones Generales	267
	Bibliografía	273
A.	Análisis Información Hidrológica	295
A.1.	Datos hidrológicos de base	295
A.2.	Análisis preliminar de tirantes y caudales	298
A.2.1.	Influencia del Río de la Plata	301
A.3.	Ciclo Anual	302
A.4.	Caudales característicos	304
A.5.	Análisis Estadístico	305
B.	Resultados de la configuración seleccionada en Paysandú	309
B.1.	Resultados para períodos seleccionados, etapa de calibración	309
B.1.1.	Situación caudales bajos	309
B.1.2.	Situación caudales medios	312
B.1.3.	Situación caudales altos	314
B.2.	Resultados para períodos seleccionados, etapa de validación	315
B.2.1.	Situación caudales bajos	315
B.2.2.	Situación caudales medios	316
B.2.3.	Situación caudales altos	318

Índice de figuras

1.1. Ubicación UPM	2
1.2. Río Uruguay en progresivas	4
1.3. Imagen satelital del delta aluvial del río Uruguay	7
1.4. El río Uruguay en la zona aledaña a la planta UPM	9
1.5. Características morfológicas del tramo inferior del bajo río Uruguay	10
1.6. Ubicación de puntos de interés en relación a la planta UPM	13
1.7. Ubicación difusor según proyecto	18
1.8. Puntos de control monitoreo	23
2.1. Distribución de concentración de trazador considerando una descarga puntual	41
2.2. Ábaco de niveles para Paysandú para diferentes caudales de la Represa	51
2.3. Dominio del modelo hidrodinámico de estudio Enviro	55
2.4. Dominio y puntos de control de estudio de Algoritmos	57
2.5. Puntos de interés de análisis de estudios BOTNIA	59
2.6. Representación gráfica de MOHID	65
3.1. Ubicación de las regiones Niño en el Océano Pacífico	82
3.2. Comparación entre índice ONI y Media Móvil Trimestral de caudales mensuales del río Uruguay (período Ene/82 a Dic/91)	87
3.3. Comparación entre índice ONI y Media Móvil Trimestral de caudales mensuales del río Uruguay (período Ene/92 a Dic/01)	88
3.4. Comparación entre índice ONI y Media Móvil Trimestral de caudales mensuales del río Uruguay (período Ene/02 a Dic/11)	89
3.5. Comparación de los eventos EN y LN seleccionados según valor de ONI y caudales, respecto a valores del índice SOI (período Ene/82 a Dic/91)	94
3.6. Comparación de los eventos EN y LN seleccionados según valor de ONI y caudales, respecto a valores del índice SOI (período Ene/92 a Dic/01)	95
3.7. Comparación de los eventos EN y LN seleccionados según valor de ONI y caudales, respecto a valores del índice SOI (período Ene/02 a Dic/11)	96
3.8. Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales bajos, etapa de calibración	99
3.9. Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales bajos, etapa de validación	101
3.10. Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de calibración	103
3.11. Información hidrológica de niveles del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de calibración	103

3.12. Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de validación	104
3.13. Información hidrológica de niveles del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de validación	104
3.14. Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales altos, etapa de calibración	106
3.15. Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales altos, etapa de validación	107
4.1. Ejemplo de láminas de los croquis elaborados por SHN	111
4.2. Procesamiento de planos SHN	112
4.3. Información batimétrica del cauce del río Uruguay brindada por SOHMA	113
4.4. Datos procesados de planos elaborados por DNVN	116
4.5. Atlas del río Uruguay	118
4.6. Ruido detectado en la información satelital SRTM	120
4.7. Triangulación conformada por puntos de SOHMA y curvas batimétricas del Croquis de Ríos	122
4.8. Modelo Digital de Terreno conformado por puntos de SOHMA y curvas batimétricas del Croquis de Ríos	123
4.9. Rejilla de puntos obtenidas en la zona aledaña a UPM conformada por puntos de SOHMA y curvas de Croquis de Ríos	123
4.10. Rejilla de puntos obtenida en el tramo inferior, conformada por datos del Croquis de Ríos y puntos de relevamiento	124
4.11. Grilla de discretización horizontal del dominio	124
4.12. Segmentación en tramos para la configuración batimétrica	126
4.13. Configuración batimétrica definitiva del dominio	128
4.14. Celdas computables y no computables del dominio	129
4.15. Simplificaciones adoptadas en el dominio	130
5.1. Ubicación de las celdas de control	134
5.2. Extensión de la batimetría en el río Gualetuychú	139
5.3. Extensión de la batimetría en el río Negro	140
5.4. Malla computacional del río Uruguay de resolución 400x200 metros	142
5.5. Influencia de marea en Fray Bentos para condiciones de caudales medios	144
5.6. Influencia de marea en Nueva Palmira para condiciones de caudales medios	145
5.7. Influencia de marea en Nueva Palmira para condiciones de caudales bajos	145
5.8. Niveles en Fray Bentos comparados con registros, condición de caudales bajos	146
5.9. Velocidades en Fray Bentos para escenario de caudales bajos	148
5.10. Inversión de flujo en escenario de caudales bajos	149
5.11. Niveles en Fray Bentos para escenario de caudales medios	150
5.12. Velocidades en Fray Bentos para escenario de caudales medios	151
5.13. Inversión parcial de flujo en escenario de caudales medios	152
5.14. Niveles en Fray Bentos para escenario de caudales altos	153
5.15. Velocidades en Fray Bentos para escenario de caudales altos	153
5.16. Inundación del dominio en escenario de caudales altos	155
5.17. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios con efecto de río Negro	160

5.18. Velocidades en Fray Bentos con aporte del río Negro, escenario de caudales medios	162
5.19. Efecto de condiciones extremas de viento en el campo de velocidades (zona Martillo)	166
5.20. Efecto de condiciones medias de viento en el campo de velocidades (zona Martillo)	167
5.21. Comparación del campo de velocidades como resultado de acción del viento de diferente magnitud (zona Martillo)	167
5.22. Acción del viento en las velocidades del canal en Fray Bentos, escenario de caudales bajos	168
5.23. Acción del viento en las velocidades en orillas en Fray Bentos, escenario de caudales bajos	169
5.24. Acción del viento en los niveles en sección Fray Bentos, escenario de caudales bajos	169
5.25. Acción del viento en las velocidades del canal de Fray Bentos, escenario de caudales medios	170
5.26. Acción del viento en las velocidades en orillas de Fray Bentos, escenario de caudales medios	171
5.27. Acción del viento en los niveles en sección Fray Bentos, escenario de caudales medios	171
5.28. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales altos para variantes batimétricas del cauce	174
5.29. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales altos para variantes batimétricas del cauce	175
5.30. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios para variantes batimétricas del cauce	178
5.31. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales medios para variantes batimétricas del cauce	178
5.32. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos para variantes batimétricas del cauce	180
5.33. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos para variantes batimétricas del cauce	181
5.34. Comparación de niveles para configuración alfa y original, caudales altos .	183
5.35. Extensión de planicies del tramo superior del dominio	184
5.36. Comparación de campo de niveles para diferentes resoluciones de malla .	189
5.37. Comparación de campo de velocidades para diferentes resoluciones de malla	190
5.38. Efecto de rugosidad de fondo en los niveles en sección Fray Bentos, escenario de caudales medios	192
5.39. Efecto de rugosidad de fondo en las velocidades en sección Fray Bentos, escenario de caudales medios	193
5.40. Efecto de rugosidad de fondo en los niveles en sección Fray Bentos para los casos (1) y (2), escenario de caudales altos	194
5.41. Niveles en Fray Bentos para el escenario de caudales bajos, etapa de calibración	197
5.42. Inundación máxima de la mitad inferior del río en escenario de caudales bajos	198
5.43. Inundación máxima en la zona de Fray Bentos en escenario de caudales bajos, etapa de calibración	199

5.44. Velocidades en Fray Bentos para el escenario de caudales bajos, etapa de calibración	200
5.45. Caudales en Fray Bentos para el escenario de caudales bajos, etapa de calibración	201
5.46. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de calibración	202
5.47. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de calibración	202
5.48. Caudales en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de calibración	204
5.49. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de calibración	205
5.50. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de calibración	206
5.51. Inundación máxima del dominio para escenarios de caudales altos, etapa de calibración	207
5.52. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos, etapa de validación	208
5.53. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos, etapa de validación	209
5.54. Caudales en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos, etapa de validación	210
5.55. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de validación	211
5.56. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de validación	212
5.57. Máxima inversión de flujo en escenario de caudales medios, zona del Martillo, etapa de validación	212
5.58. Caudales en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de validación	213
5.59. Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de validación	214
5.60. Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de validación	215
5.61. Profundidades (arriba) y grilla (abajo) del Modelo Hijo	217
6.1. Configuración de boxes para tiempos de residencia	226
6.2. Representación de partículas en boxes, estado inicial	227
6.3. Caudales horarios en Fray Bentos para caso A	228
6.4. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para caso A	228
6.5. Caudales horarios en Fray Bentos para caso B	230
6.6. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para caso B	230
6.7. Caudales horarios en Fray Bentos para caso C	231
6.8. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para caso C	231
6.9. Comparación de tiempos de residencia (superior) y R^2 (inferior) de los casos A, B y C	233
6.10. Esquematización del flujo de partículas para los casos A (izquierda) y B (derecha) a iguales tiempos de las series	234

6.11. Series temporales de caudales bajos: partes 1, 2, 3 y 4	235
6.12. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 1 de caudales bajos	236
6.13. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 2 de caudales bajos	237
6.14. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 3 de caudales bajos	239
6.15. Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 4 de caudales bajos	239
6.16. Comportamiento de partículas ante evento de inversión, parte 3	240
6.17. Tiempos de residencia para los boxes 1, 2, 3 y 5 para diferentes coeficientes de difusión	242
6.18. Esquematización del flujo de partículas para los casos A (izquierda) y B (derecha) a iguales tiempos de las series	243
6.18. Esquematización del flujo de partículas para los casos A (izquierda) y B (derecha) a iguales tiempos de las series (cont.)	244
6.19. Esquematización del flujo de partículas para los casos C (izquierda) y D (derecha) a iguales tiempos de las series	245
6.19. Esquematización del flujo de partículas para los casos C (izquierda) y D (derecha) a iguales tiempos de las series (cont.)	246
6.20. Esquematización del flujo de partículas para los casos E (izquierda) y F (derecha) a iguales tiempos de las series	247
6.20. Esquematización del flujo de partículas para los casos E (izquierda) y F (derecha) a iguales tiempos de las series (cont.)	248
6.21. Ubicación de la descarga de trazadores en el modelo	250
6.22. Ubicación de boxes de monitoreo	252
6.23. Pluma de trazador de descarga UPM	253
6.24. Serie de caudales en Fray Bentos, escenario de caudales bajos	254
6.25. Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del do- minio, escenario de caudales bajos	255
6.26. Comportamiento de la pluma de trazador ante inversión de flujo del 18/10/2010, escenario de caudales bajos	257
6.27. Comportamiento de la pluma de trazador ante inversión de flujo del 1/11/2010, escenario de caudales bajos	258
6.28. Caudales en Fray Bentos, escenario de caudales medios	259
6.29. Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del do- minio, escenario de caudales medios	259
6.30. Comportamiento de la pluma de trazador ante inversión de flujo del 2/7/2008, escenario de caudales medios	260
6.31. Plumas de descarga para las configuraciones con intensidades de turbu- lencia de 2‰ (superior), 2 % (medio) y 20 % (inferior)	262
6.32. Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del do- minio, para intensidad de turbulencia de 2‰, escenario de caudales bajos	264
6.33. Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del do- minio, para intensidad de turbulencia de 20 %, escenario de caudales bajos	264
6.34. Plumas de descarga para las configuraciones con intensidades de turbulen- cia de 2‰ (superior izquierda), 2 % (superior derecha) y 20 % (inferior), ante inversión de flujo máximo (1/11/2010)	265

A.1. Relación entre caudales Represa (CTM) y niveles en Salto (DNH)	297
A.2. Bucles en la serie de histórica de Paysandú	299
A.3. Hidrograma en Salto, y limnigramas en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira (Mayo-Agosto 1983)	300
A.4. Hidrograma en Salto, y limnigramas en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira (Mayo-Abril 2008)	301
A.5. Variación anual de los caudales mensuales medios	303
A.6. Diagramas en caja de caudales, y niveles en Pdú, FB y NP	306
B.1. Niveles en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de cali- bración	310
B.2. Niveles en Paysandú y caudales de aporte para condiciones de caudales bajos, etapa de calibración	310
B.3. Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de calibración	311
B.4. Caudales en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de cali- bración	311
B.5. Niveles en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de cali- bración	313
B.6. Niveles en Paysandú y caudales de aporte para condiciones de caudales medios, etapa de calibración	313
B.7. Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de calibración	313
B.8. Caudales en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de calibración	314
B.9. Niveles en Paysandú y caudales de aporte para condiciones de caudales altos, etapa de calibración	315
B.10. Niveles en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de validación	316
B.11. Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de validación	316
B.12. Caudales en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de vali- dación	317
B.13. Niveles en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de vali- dación	317
B.14. Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de validación	318
B.15. Caudales en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de validación	318
B.16. Niveles en Paysandú para condiciones de caudales altos, etapa de validación	319

Índice de tablas

1.1. Ruteo de centros poblados más significativos en ambas márgenes del río Uruguay	5
1.2. Características del efluente de UPM	20
1.3. Valores de temperatura de línea de Base	22
2.1. Módulos del modelo MOHID	66
3.1. Relación entre ceros locales y cero Wharton	77
3.2. Densidad de registros en serie de niveles brindados por DNH	78
3.3. Caudales mensuales y diarios característicos	79
3.4. Caudales mensuales característicos	79
3.5. Principales estadísticos descriptivos de datos diarios	79
3.6. Matriz de correlación (Pearson)	80
3.7. Episodios históricos EN y LN basados en el ONI	86
3.8. Eventos EN y LN conteniendo caudales mensuales máximos y mínimos, mayores y menores a los valores característicos determinados para la serie de caudales mensuales	90
3.9. Clasificación años EN y LN	92
3.10. Caudales medios mensuales de años EN y LN en período de análisis	93
3.11. Períodos de base seleccionados para modelación y porcentaje de datos	95
3.12. Estadísticos de los datos hidrológicos diarios	97
3.13. Densidad de información de niveles y caudales horarios en períodos de caudales bajos	98
3.14. Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales bajos, etapa de calibración	99
3.15. Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales bajos, etapa de validación	100
3.16. Densidad de información de niveles y caudales horarios en períodos de caudales medios	101
3.17. Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales medios, etapa de calibración	102
3.18. Información hidrológica de niveles del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de validación	102
3.19. Densidad de información de niveles y caudales horarios en períodos de caudales altos	105
3.20. Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales altos, etapa de calibración	105
3.21. Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales altos, etapa de validación	106

4.1. Ceros de referencia de los planos batimétricos de la DNVN	115
5.1. Períodos de simulación para la calibración	140
5.2. Períodos de simulación para la validación	140
5.3. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para escenario de caudales bajos	147
5.4. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para escenario de caudales medios	150
5.5. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para escenario de caudales altos	152
5.6. Diferencias entre configuración original y variante con río Negro, escenario de caudales medios	162
5.7. Diferencias entre configuración original y variante con río Negro, escenario de caudales bajos	163
5.8. Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes configuraciones batimétricas y la configuración original en Fray Bentos, caudales altos	174
5.9. Diferencia entre resultados de modelo de velocidades para diferentes configuraciones batimétricas y la configuración original en Fray Bentos, escenario de caudales altos	175
5.10. Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes variantes batimétricas del cauce y registros reales en Fray Bentos, caudales medios	176
5.11. Indicadores de similitud entre resultados de modelo de velocidades para diferentes variantes batimétricas del cauce en Fray Bentos, caudales medios	177
5.12. Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes variantes batimétricas del cauce y registros reales en Fray Bentos, caudales bajos	177
5.13. Indicadores de similitud entre resultados de modelo de velocidades para diferentes configuraciones batimétricas y la configuración original en Fray Bentos, caudales bajos	179
5.14. Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes rugosidades de fondo y registros reales en Fray Bentos	191
5.15. Relación entre resultados de modelo de velocidades para diferentes rugosidades de fondo y la configuración original en Fray Bentos, escenario de caudales medios	193
5.16. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales bajos, etapa de calibración	196
5.17. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales medios, etapa de calibración	201
5.18. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales altos, etapa de calibración	205
5.19. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales bajos, etapa de validación	209
5.20. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales medios, etapa de validación	211
5.21. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales altos, etapa de validación	214

6.1. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, caso A	229
6.2. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, caso B	229
6.3. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, caso C	231
6.4. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 1 de caudales bajos	235
6.5. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 2 de caudales bajos	236
6.6. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 3 de caudales bajos	238
6.7. Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 4 de caudales bajos	238
6.8. Configuraciones del modelo según valores de coeficientes de difusión . . .	241
6.9. Coeficientes de difusión turbulenta según bibliografía	251
A.1. Relación entre ceros locales y cero Wharton	295
A.2. Densidad de registros en serie de niveles brindados por DNH	296
A.3. Caudales mensuales y diarios característicos	304
A.4. Comparación de caudales mensuales característicos	304
A.5. Estadísticas descriptivas de datos diarios	305
A.6. Matriz de correlación	307
B.1. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales bajos, etapa de calibración	310
B.2. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales medios, etapa de calibración	312
B.3. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales altos, etapa de calibración	314
B.4. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales bajos, etapa de validación	315
B.5. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales medios, etapa de validación	317
B.6. Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales altos, etapa de validación	319

Abreviaturas y acrónimos

CPC	Climate Prediction Center, NOAA (Centro de Predicción Climático)
CSIC	Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República
CTM	Comisión Técnica Mixta de Salto Grande
AAP	Autorización Ambiental Previa
ADt	Air Dry ton (toneladas de pulpa seca)
AOX	Adsorbable Organic Halogens (Haluros Orgánicos Adsorbibles)
BAT	Best Available Techniques (Mejores Técnicas Disponibles)
BKM	Bleached Kraft Mill (Planta con Blanqueo Kraft)
CARU	Comisión Administradora del Río Uruguay
CIS	Cumulative Impact Study (Estudio de Impacto Acumulativo)
CPC	Climate Prediction Center, NOAA (Centro de Predicción Climático)
CSIC	Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República
CTM	Comisión Técnica Mixta de Salto Grande
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DINAMA	Dirección Nacional de Medio Ambiente
DNETN	Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear
DNH	Dirección Nacional de Hidrografía
DNVN	Dirección Nacional de Vías Navegables de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, Argentina
DQO	Demanda química de oxígeno
EN	El Niño
ENSO	El Niño Oscilación Sur
EPA	U.S. Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
GECRU	Grupo de Estudio del Río Uruguay
IFC	International Finance Corporation (Corporación Financiera Internacional del Banco Mundial)
IMFIA	Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
INA	Instituto Nacional del Agua, Argentina
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control (Prevención y Control Integrado de la Contaminación)
LN	La Niña

MARETEC	Marine and Environmental Technology Research Center (Centro de Investigación Tecnológica Marina y Ambiental)
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
MOHID	Modelo Hidrodinámico de MARETEC
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
MVOTMA	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
N	Nitrógeno
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)
OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONI	Oceanic Niño Index (Índice Niño Oceánico)
P	Fósforo
RM	Resolución Ministerial
SHN	Servicio de Hidrografía Naval, Argentina
SLP	Sea Level Pressure (Presión sobre el nivel del mar)
SO	South Oscillation (Oscilación Sur)
SOHMA	Servicio de Oceanografía, Hidrología y Meteorología de la Armada
SOI	South Oscillation Index (Índice Oscilación Sur)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Misión Topográfica Shuttle Radar)
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SST	Sea Superficial Temperature (Temperatura Superficial del Mar)
UE	Unión Europea
USACE	U.S. Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos)
WGS84	World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial de 1984)

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contextualización

El presente trabajo de tesis se contextualiza en la situación polémica que ha involucrado a Uruguay en cuanto a temas ambientales en los últimos años.

A partir del 2003, la relación de Argentina y Uruguay se ha visto afectada por la instalación de plantas de celulosa en territorio del segundo país, sobre el río binacional Uruguay. Si bien una de ellas no fue construida, la otra sí lo fue durante el conflicto y puesta en marcha el 8 de noviembre de 2007 (Rodríguez, 2007). Esa planta es usualmente conocida como planta UPM.

Luego de dos ampliaciones de producción, actualmente UPM cuenta con una capacidad total de 1,3 millones de toneladas de pulpa anuales. Eso conllevó divulgación de información, por parte de ambos países, en cuanto a la performance de la planta y calidad del río Uruguay. Sin embargo, las declaraciones de ambos lados fueron contradictorias: de carácter contaminante del lado argentino y contrario del lado uruguayo (Diario El País). ¹

Es en este contexto que surge el trabajo aquí presentado, el cual tiene como fin analizar la evolución de los efluentes descargados por UPM en el río Uruguay.

1.2. Ubicación geográfica

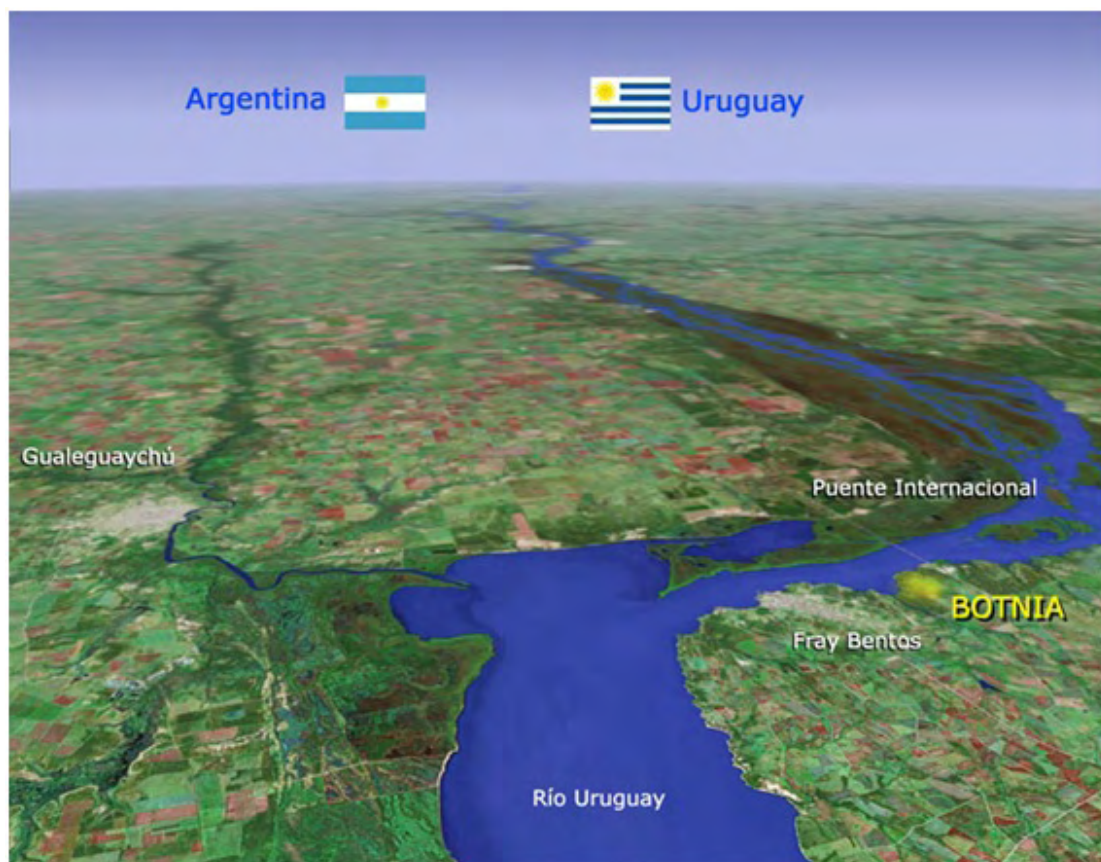
Uruguay, ubicado en Sudamérica, vecino de los países Brasil y Argentina, limita al este con este último en el río Uruguay.

¹Por mayor información, consultar la web oficial del Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto (Argentina) y de la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA).

La planta UPM se ubica sobre la ribera uruguaya del río Uruguay, a 5km aguas arriba de la ciudad de Fray Bentos, capital departamental de Río Negro, y cerca del puente internacional Libertador General San Martín.

Inmediatamente aguas abajo de la ciudad de Fray Bentos, se encuentra del lado argentino la desembocadura del río Gualeguaychú en el río Uruguay, uno de los principales cursos de agua contribuyentes al río Uruguay, luego del río Negro.

FIGURA 1.1: Ubicación de UPM sobre las orillas del río Uruguay (Fuente: Diario El País)



1.3. Área de estudio

El área de estudio se centraliza en la zona del río Uruguay potencialmente afectada por la descarga de efluentes de la planta de celulosa UPM, por lo cual, en este subcapítulo se presenta una descripción de los dos actores principales intervinientes: el río Uruguay y la planta de celulosa UPM, así como también un resumen de las actividades de monitoreo realizadas en ese entorno.

1.3.1. Río Uruguay

El río Uruguay, luego del río Paraná, contribuye al aporte más importante de la Cuenca del Plata (Paoli et al., 2000). Su cuenca cubre un área de más de 365000km² extendiéndose por el sur de Brasil, oeste de Uruguay y noreste de Argentina. Las mayores superficies de la misma pertenecen a los estados de Rio Grande do Sud y Santa Catarina en Brasil, mientras que el resto prácticamente le corresponde a Uruguay.

La longitud total del cauce es de unos 1800km, con su nacimiento en las Serra do Mar y Serra Geral, en la confluencia de los ríos Pelotas y Canoas, aproximadamente a 1800 metros de altura (Pan American Union, 1969). Inicialmente el río Uruguay corre hacia el oeste, luego cambiando su rumbo hacia el suroeste, y posteriormente hacia el sur. Finalmente, el río Uruguay desemboca en el estuario del Río de la Plata, confluyendo con la desembocadura del río Paraná. La descarga de este último, básicamente se distribuye en dos grandes brazos: el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú.

Debido a sus dimensiones y variabilidad en sus características, es usual que en la bibliografía se lo divida en tres tramos: superior o alto, medio e inferior o bajo, tanto según sus características geológicas y geomorfológicas (Iriondo y Kröhling, 2008), como considerando los países a los cuales pertenece (CARU). Considerando este último criterio, el primer tramo se encuentra en el sur de Brasil, con una longitud de unos 600km, el segundo limita Argentina y Brasil a lo largo de unos 650km, y el tramo inferior separa Argentina de Uruguay, extendiéndose por unos 500km.

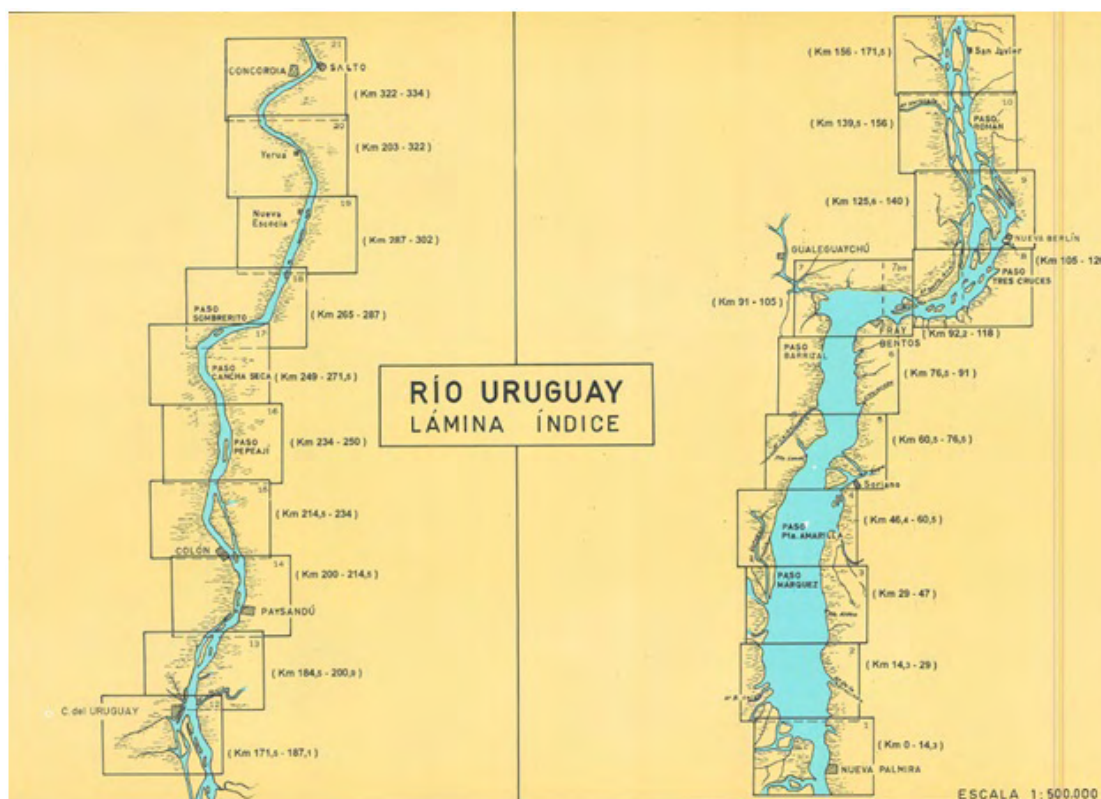
Debido a la ubicación de la zona en estudio relativizada a la cuenca del río Uruguay, la descripción de éste se enfoca principalmente en las características del tramo inferior y/o en la cuenca inferior del río Uruguay, en ambos casos definidos a los fines de este informe entre la Represa de Salto Grande y Nueva Palmira.

1.3.1.1. Tramo inferior del río Uruguay

En este trabajo se considera el tramo inferior del río Uruguay desde la Represa de Salto Grande hasta la ciudad de Nueva Palmira, en donde se produce un estrechamiento debido al delta del Paraná, dando comienzo al Río de la Plata. Su longitud total es superior a 300km, y cuenta con dos características importantes. La primera de ellas es la influencia directa del mar y la segunda es la gran abundancia de arena y sedimentos finos generando gran cantidad de bancos e islas (Iriondo y Kröhling, 2008).

En la Figura 1.2 se señalan los centros poblados más importantes de ambos lados del río, identificándose tramos según progresivas. Asimismo, se puede visualizar las características morfológicas del río, con su gran variabilidad.

FIGURA 1.2: Esquematzación del río Uruguay en progresivas (Fuente: SHN, 2009)



Punta Gorda, ubicada aguas abajo de Nueva Palmira, es el extremo inferior del río Uruguay, y por lo tanto es el punto de origen adoptado para establecer progresivas de la ubicación de centros poblados y otros elementos en las cartas de navegación y atlas. De la Carta del Río Uruguay (CARU, 1983), se pueden extraer progresivas aproximadas de los centros poblados y otros ítems relevantes ubicados en ambos lados del río. La Tabla 1.1 presenta progresivas estimadas para varios centros poblados. Las progresivas se establecen en la Carta de acuerdo al eje del río, el cual va variando de dirección a lo largo de su extensión.

La Represa Salto Grande se encuentra ubicada en la progresiva 342,6 del río Uruguay, aguas arriba de las ciudades de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay), según se indica en la página web oficial de la Represa.

En el resto del informe, el tramo del río en análisis se denominará río Uruguay a modo de simplificar su mención.

TABLA 1.1: Ruteo de centros poblados más significativos en ambas márgenes del río Uruguay

Punto	Progresiva aproximada (km)
Punta Gorda	0
Nueva Palmira (Uruguay)	4
Desembocadura del Río Negro (Uruguay)	60
Balneario Las Cañas (Uruguay)	88
Desembocadura Río Gualedguaychú (Argentina)	94
Fray Bentos (Uruguay)	99
Puente binacional Libertador General San Martín	105
Nuevo Berlín (Uruguay)	126
San Javier (Uruguay)	166
Concepción del Uruguay (Argentina)	185
Paysandú (Uruguay)	208
Puente binacional General Artigas	213
Colón (Argentina)	219
Puerto Yerúa (Argentina)	312
Concordia (Argentina)	333
Salto (Uruguay)	337

1.3.1.2. Hidrodinámica y características

El río Uruguay cuenta con un desnivel de 10 metros, y una pendiente entre sus extremos muy pequeña (OEA, 1985), factor que condiciona el comportamiento hidrodinámico del río. El tramo del río desde la Represa Salto Grande hasta la ciudad de Concepción del Uruguay cuenta con pendientes relativamente elevadas (aprox. 10 cm/km), que aguas abajo son atenuadas de forma considerable, decayendo su valor a pendientes de 1.0 cm/km o menos (BOTNIA, 2004).

Por otra parte, en líneas generales, del lado uruguayo, se cuenta con una topografía más elevada, siendo la ribera argentina generalmente llana y/o pantanosa, con mayores riesgos de inundación (BOTNIA, 2004).

El caudal medio del río Uruguay a la altura de la Represa Salto Grande se estima en $6230\text{m}^3/\text{s}$ (basado en serie histórica del 1983-2003, según Ecometrix, 2006, Anexo D), contando con varios aportes provenientes de ambas orillas aguas abajo de la Represa. Del lado argentino, el río Uruguay cuenta con una cuenca menor y con el aporte de un solo afluente de dimensiones medianas, el río Gualedguaychú. El río Gualedguaychú por su parte, presenta un caudal medio y bajo de 210 y $20\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente (Ecometrix, 2006) y en los últimos 25km de su recorrido aumenta el ancho del cauce hasta unos 200 metros, con curvas irregulares.

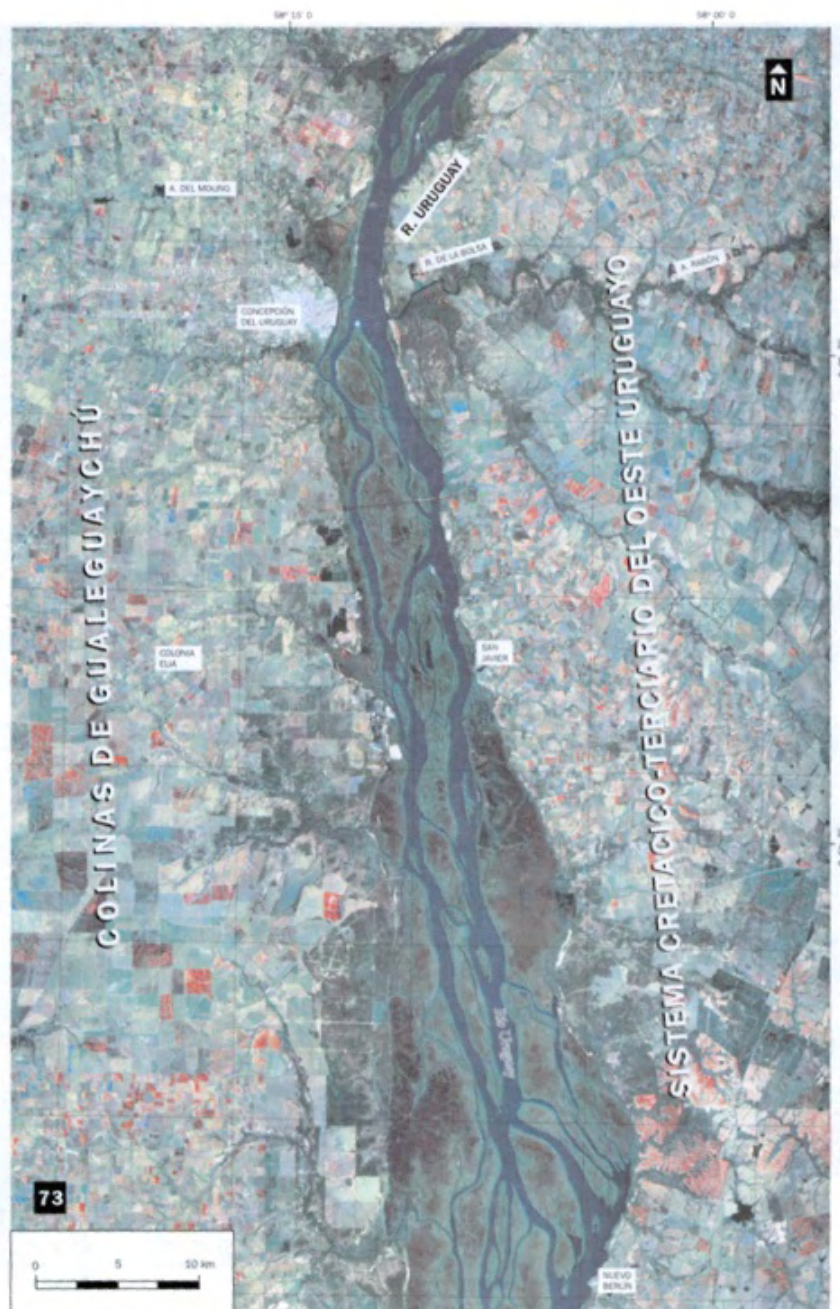
Del lado uruguayo, la cuenca inferior del río Uruguay es mucho mayor y cuenta con un aporte sustantivo por parte del río Negro. El río Negro es el mayor tributario del río Uruguay (Pan American Union, 1969), cuya desembocadura se ubica a una distancia aproximada de 60km del estuario del Río de la Plata como fue anticipado anteriormente. Particularmente en su tramo inferior, es un río meandroso con un ancho entre 500 a 800m, presentando bancos e islas (Iriondo y Kröhling, 2008). Este río también forma un delta cerca de su confluencia con el río Uruguay, contando con las mayores islas Vizcaíno y de Lobos (BOTNIA, 2004).

Cabe aclararse que el caudal medio del río Uruguay antes mencionado se basa en un período temporal específico, considerado a partir del comienzo de operación de la Represa Salto Grande. Pues el caudal como también el flujo de energía y materia de los ecosistemas lóticos, con la construcción de represas, suelen ser impactados provocando tanto una alteración del régimen hidrológico como una alteración en el flujo de nutrientes y en la entrada de energía al sistema (Postel y Richter, 2003). Particularmente la Represa Salto Grande comenzó a funcionar oficialmente en 1983.

Asimismo, existen otros factores que pueden afectar el comportamiento hidrodinámico del río, como lo es la morfología del cauce. En este sentido, el río Uruguay presenta diferentes direcciones, anchos y profundidades. A la altura de Concepción del Uruguay el valle se abre en forma suave, aumentando de 1km de ancho al norte de la ciudad a 6km en Colonia Elía (Entre Ríos), y un ancho de 10km inmediatamente al norte de la localidad de Nuevo Berlín (longitud total incluyendo islas). Desde el comienzo de este valle en las inmediaciones de Concepción del Uruguay, se conforma una división del río en dos brazos principales y otros secundarios, formando un delta de 65km de longitud con varias islas e islotes (Iriondo y Kröhling, 2008) esquematizado en la Figura 1.3. A pocos kilómetros aguas arriba de Nuevo Berlín, los dos canales principales son el del Burro y el de la Filomena, siendo el primero de mayor profundidad que el segundo. Las islas Abrigo y Caballo son las más próximas al Puente Internacional Libertador General San Martín, continuando la división del río como dos canales a ambos lados de esta zona insular, confluyendo aguas abajo de la isla Abrigo con dirección este-oeste (BOTNIA, 2004).

Luego de la isla Abrigo el río continúa hasta “*la gran curva*” (denominada también como “El Martillo”), comprendiendo una gran bahía (abarcando la bahía de Ñandubaysal y la descarga del río Guauguaychú) junto con el canal principal del río. A lo largo de este tramo el río presenta diferentes direcciones y anchos. El brazo unificado aguas abajo de la isla Abrigo resulta en un ancho de 1.8km frente a la ciudad de Fray Bentos (sin contar los anchos de las islas Laurel, Sauzal, Inés Dorrego, ni tampoco la laguna ubicada al norte de estas islas) (BOTNIA, 2004). Dicho tramo unificado del río corre hacia el oeste

FIGURA 1.3: Imagen satelital del delta aluvial del río Uruguay (Fuente: Iriondo y Kröhling, 2008, extraída de Carta Imagen República Argentina, 3357-I; IGM).



a lo largo de 20km, con un ancho promedio de 3km (entre 2.5 y 3.5km), terminando en un borde erosivo (Iriondo y Kröhling, 2008).

En la Figura 1.4 se presenta una esquematización del río Uruguay, específicamente el tramo con gran complejidad de islas previo al Puente Internacional Libertador General San Martín (imagen inferior), así como el *Martillo* (imagen superior). Estas imágenes forman parte de la Carta del Río Uruguay (CARU, 1983) disponible en la página web oficial de Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM)².

El tramo final del río Uruguay es una amplia depresión de unos 85km de longitud por 5 a 12km de ancho, comprendido desde el Martillo hasta el delta actual del Paraná frente a Nueva Palmira. No se trata de un cauce fluvial sino que es una amplia depresión inundada, destacándose un canal pronunciado y con laterales de escasa profundidad. Este tramo presenta una clara dinámica de oleaje generado por los vientos dominantes (Iriondo y Kröhling, 2008). Una esquematización de este tramo se presenta en la Figura 1.5.

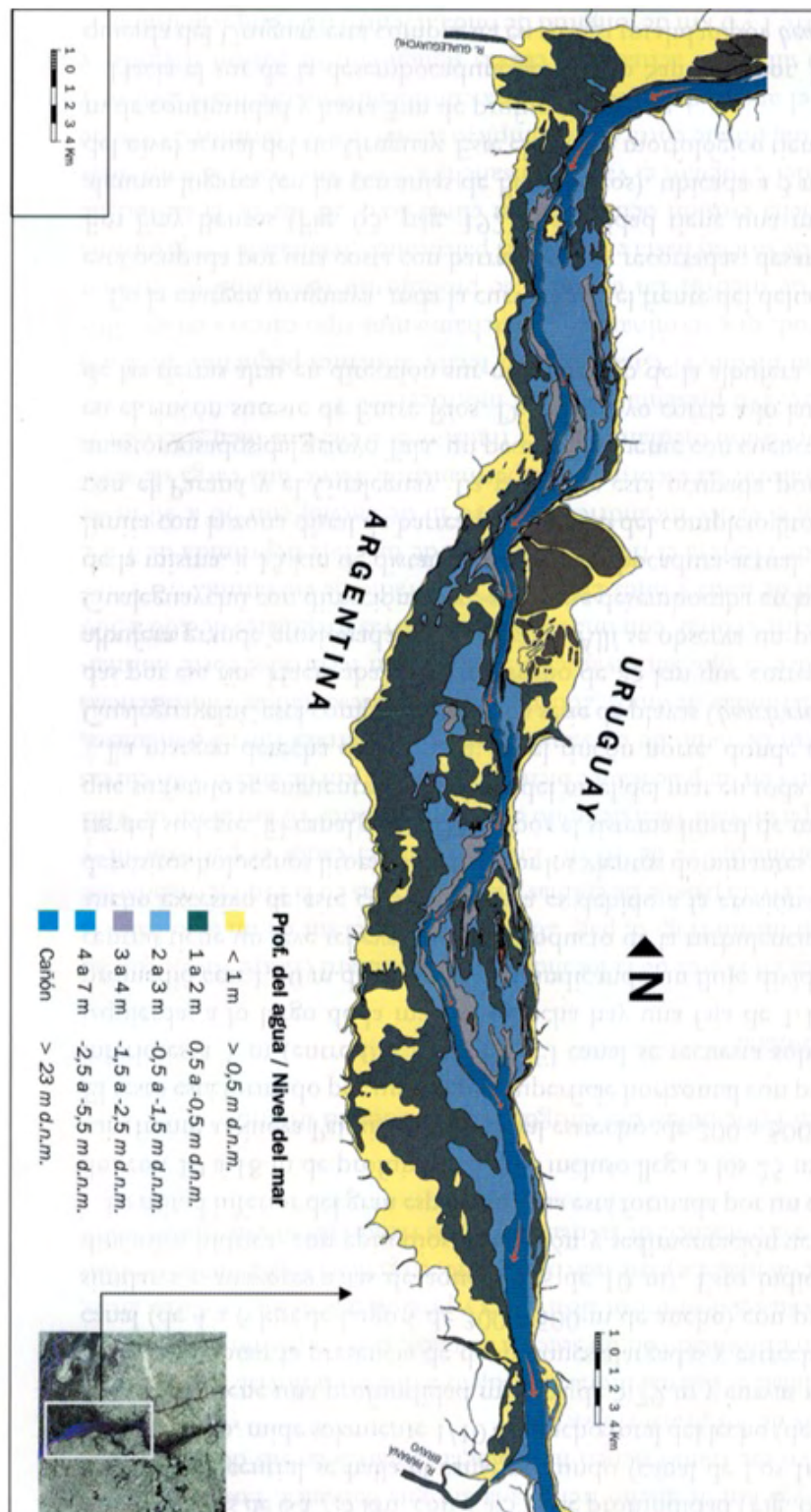
Todo lo anterior dota al río Uruguay de características específicas en cuanto a su funcionamiento hidrodinámico. Por su parte, Ibáñez (1978) identifica una marcada irregularidad en el régimen hidrológico del flujo entre la ciudad de Concordia y la barra del Paraná Guazú, pues establece que la propagación de las mareas con inversión de corrientes llega hasta Fray Bentos y en algunas excepciones a Concepción del Uruguay, pero la superposición con la onda de crecida fluvial se manifiesta hasta la latitud de Concordia. Asimismo caracteriza el comportamiento hidráulico del río Uruguay y lo discrimina en un régimen fluvial puro desde las nacientes hasta Concordia, un régimen fluvio-marítimo aguas abajo de Concordia y hasta Fray Bentos y un régimen marítimo hacia aguas abajo de Fray Bentos.

Por otra parte, se identifican comportamientos bien diferenciados entre el canal principal del río y las zonas costeras, siendo éstas últimas zonas de menor renovación y posible estacionamiento del agua (CARU, 1994).

Por último, la hidrodinámica puede ser afectada también por factores externos al río, como puede ser los aspectos climáticos. Dentro de éstos, cobra importancia la existencia de *sudestadas*, vientos generados en el Atlántico Sur que penetran desde esa dirección y pueden mantenerse varios días provocando lluvias e inundaciones por incrementos de nivel (Iriondo y Kröhling, 2008). Vinculado a este tipo de fenómenos, es la eventual inversión de flujo sucediendo ante caudales bajos (inferior a 1000m³/s) y niveles elevados ocasionados por efecto del viento (Ecometrix, 2006).

²www.saltogrande.org

FIGURA 1.5: Características morfológicas del tramo inferior del bajo río Uruguay: desde Fray Bentos hasta Punta Gorda (Fuente: Iriondo y Kröhling, 2008).



1.3.1.3. Calidad de aguas

Desde 1970 el río Uruguay había sido considerado como un recurso adecuado para todo tipo de uso, y en caso de requerirse tratamiento para algún uso en particular, éste sería de bajo costo. Sin embargo, al mismo tiempo ya se había advertido de alto contenido de parámetros bacteriológicos a la altura de Paysandú (CEPAL, 1970).

Asimismo, Pintos et al. (1992) registraron contaminación orgánica debido a la descarga de los efluentes de la ciudad de Paysandú, indicando valores inadecuados de algunos parámetros ambientales (disminución de concentración de oxígeno disuelto, nitrógeno y fósforo) y también alteración en la comunidad zoo-bentónica.

Esto se alinea con que a lo largo de las décadas, si bien el río Uruguay ha sido conceptualizado como un curso de adecuadas condiciones, con buenas capacidades de dilución y depuración particularmente en lo que se refiere a cargas orgánicas (BOTNIA, 2004), se ha detectado que la instalación y crecimiento de ciudades en sus márgenes, con las descargas de sus efluentes sin tratamiento, podría estar ocasionando un deterioro en dichas capacidades, principalmente en las cercanías de las mismas (BOTNIA 2004, CARU, 1994).

Lo anterior sumado al hecho que los embalses pueden alterar ciclos biogeoquímicos, las cadenas alimenticias y la productividad acuática (Jamett, 2005), y con ello la calidad de las aguas, han despertado el interés de conocer con más profundidad la calidad de las aguas del río, impulsando efectuar campañas de muestreo. De ellas, por una parte, se obtiene que las características fisicoquímicas del río Uruguay se encuentran condicionadas por las características ambientales de la Represa (operación, tiempo de residencia, volumen de embalse, composición de la biota). En cuanto a los parámetros biológicos, Paradiso y Chalar (2001) analizaron la afectación de la operación de la Represa Salto Grande en las condiciones ambientales del río. Encontraron diferencias en la abundancia del fitoplancton entre el embalse de la Represa y aguas abajo de esta.

Se obtiene que en líneas generales es un río poco contaminado, pero se han constatado problemas ambientales provenientes principalmente de efectos locales: en el tramo Salto-Concordia y la estación de Fray Bentos que coincide con la descarga del río Gualeguaychú donde se ha encontrado algunos valores altos de metales pesados (CARU, 2001). También CARU (2003b) reporta valores altos de algunos metales pesados en las cercanías a Paysandú y BOTNIA (s.f.) en vecindades a Fray Bentos. En las proximidades de estas ciudades la descarga de los efluentes del sistema de saneamiento no tratados, provenientes de la población e industrias, producen niveles inadecuados de parámetros ambientales en forma local a pocos metros de la costa (CARU, 2001, BOTNIA s.f.).

Excluyendo estos puntos, en líneas generales, el oxígeno disuelto se ubica cercano a los de saturación, el pH próximo a la neutralidad, mientras que la conductividad y la alcalinidad aumentan a lo largo del río en sentido del escurrimiento (CARU, 2001). Específicamente, la salinidad del río Uruguay es baja con valores entre 40 y 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y se incrementa en ciertos puntos por aportes locales (Janiot y Molina, 2001) y en la desembocadura y sus proximidades (Iriondo y Kröhling, 2008, Janiot y Molina, 2001). El pH se ubica típicamente entre 6.5 y 8 (Iriondo y Kröhling, 2008). La temperatura promedio de verano se estima en 24.4°C y de invierno en 15.5°C, en ambos casos con una variación de 3°C (Janiot y Molina, 2001). Los porcentajes de oxígeno de saturación superan el 80 % (Janiot y Molina, 2001).

1.3.1.4. Usos del río

Debido a la calidad de sus aguas y a los grandes caudales que dispone el río Uruguay, muchos centros urbanos radican en sus riberas y sus usos son diversos, incluyendo abastecimiento de agua potable, riego, actividades de recreación como deportes acuáticos y baños, así como también pesca y navegación. El volumen utilizado de agua con finalidad de consumo de agua potable podría considerarse despreciable frente al caudal del río Uruguay (BOTNIA, 2004).

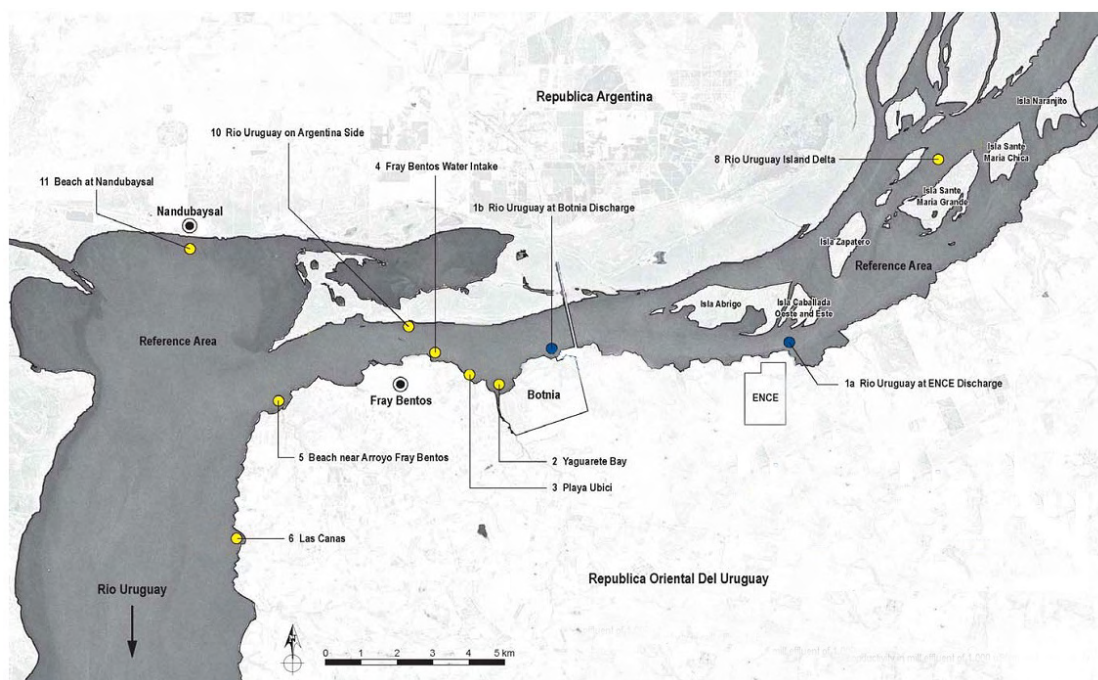
También cumple función como cuerpo receptor de descargas de efluentes, tanto industriales como domésticos, muchos de los cuales no disponen de tratamiento previo a su vertido. La ubicación de las descargas respecto a los puntos de toma de agua potable y zonas de playas cobra importancia en este contexto.

Particularmente, en la zona adyacente a la planta UPM coexisten varios usos: recreacionales, poblacionales (abastecimiento de agua potable y descarga de efluentes domésticos), entre otros. La Figura 1.6 esquematiza la ubicación de puntos o zonas de interés en las inmediaciones de UPM.

Aguas abajo de la planta se emplazan tomas de agua para consumo poblacional, de las cuales las tres de mayor escala son: Fray Bentos (300m³/h, ubicada unos 5km aguas abajo de UPM y 70m dentro del río), balneario Las Cañas (20m³/h) y Nueva Palmira (50m³/h) (BOTNIA, 2004).

Además, el balneario Las Cañas posee playa de uso recreacional, al igual que la playa Ubici (Uruguay), playa cercana al arroyo Fray Bentos (Uruguay) y playa Ñandubaysal (Argentina). Se describen estos sitios en orden de acuerdo a su ubicación en sentido del flujo del río, según lo presentado en Ecometrix (2006).

FIGURA 1.6: Ubicación de puntos de interés en relación a la planta UPM (Fuente: Ecometrix, 2006, pg.163)



En primer lugar, se identifica la playa Ubici ubicada en la bahía Yaguareté, a unos 1500 metros aguas abajo de la planta UPM. Dicha bahía se caracteriza por ser de poca profundidad y bajas velocidades, en donde habitan varias especies de peces. Este sitio se encuentra en condiciones adecuadas de uso, exceptuando los coliformes que posiblemente superan los estándares y también el fósforo por sus elevadas concentraciones.

Aguas abajo se localiza la playa Ñandubaysal, próxima a la descarga del río Gualeguaychú, que presenta concentraciones elevadas de fósforo y superiores a los estándares de varios metales y eventualmente coliformes. Posteriormente la playa contigua a la descarga del arroyo Fray Bentos, presentando afectaciones por fósforo y bacterias debido a su proximidad a la descarga de efluentes domésticos de Fray Bentos, y por último, la playa del balneario Las Cañas.

1.3.1.5. Administración y regulación

El organismo internacional administrador y regulador del río Uruguay es la CARU, constituida por las Repúblicas Argentina y Oriental del Uruguay a través del Estatuto del río Uruguay con fecha 26 de febrero de 1975. La información aquí presentada ha sido extraída principalmente de documentación disponible en su página web oficial además de otras fuentes.

Su función se focaliza en gestionar de forma global e integral el río objetivo, en el tramo compartido por los países Argentina y Uruguay, dictando normas reglamentarias en cuanto a la seguridad de navegación, utilización de los recursos del lecho y subsuelo, la conservación de la biota, la prevención de la contaminación, entre otras de interés. También, y no menos importante, es responsable de establecer el marco jurídico en cuanto a las obras e instalaciones binacionales, el control de la pesca y la coordinación de estudios e investigaciones científicas.

Esta comisión es asesorada por la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), dependiente del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), el Servicio de Oceanografía Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA), ambos uruguayos, y el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) argentino.

Como instrumento normativo, en 1986 se crea el Digesto sobre el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay, el cual impulsa a accionar en cuanto a las características ambientales del río. Este documento incluye el *“Tema E3: Contaminación”* el cual establece definiciones técnicas así como clasificación según *usos* y fijación de estándares de calidad de agua para éstos. Una de las definiciones básicas del marco conceptual define contaminación como *“la introducción directa o indirecta, por el hombre, en el medio acuático, de sustancias o energía de las que resulten efectos nocivos”* y puntualiza estándares para los usos definidos como:

- (1) Aguas crudas o brutas destinadas al abastecimiento público con tratamiento convencional.
- (2) Aguas destinadas a actividades de recreación de contacto directo.
- (3) Aguas destinadas a actividades agropecuarias.
- (4) Aguas para conservación y desarrollo de la vida acuática.

Este último uso se establece como estado mínimo, por lo que todo el río debe cumplir al menos con los estándares fijados para éste.

En línea con lo anterior, la CARU crea el Programa de Calidad de las Aguas y Control de la Contaminación del río Uruguay (PROCON) con el objetivo de instalar un sistema de monitoreo a largo plazo de parámetros ambientales definidos. Se plantea como un proceso en etapas, con la primera campaña en el año 1987 continuando hasta el 2001 con la quinta etapa y llegando a realizar monitoreos en 2004.

El sistema de monitoreo de calidad de las aguas pretende evaluar la calidad del río así como también identificar variaciones en la misma a lo largo del tiempo, y es aplicado tanto al cuerpo principal como a las costas, ambos en el agua y sedimentos. Las

conclusiones de las campañas efectuadas por el PROCON son las mencionadas en el subcapítulo Calidad de aguas, detectando en líneas generales que la calidad de las aguas del río Uruguay es adecuada, exceptuando en algunas zonas puntuales cercanas a centros poblados o descargas de afluentes del mismo.

Los parámetros intervinientes en el monitoreo son superiores a 60: físicas (OD, porcentaje de saturación, conductividad, temperatura, pH, profundidad del punto de extracción entre otros), físico-químicas (alcalinidad, color, turbiedad, dureza total, iones mayoritarios, sólidos suspendidos y totales, etc.), parámetros orgánicos (DBO, DQO, aceites y grasas, hidrocarburos totales, etc.), nutrientes (amonio, nitrito, nitrato, fósforo total, fosfatos), metales pesados (cromo, plomo, arsénico, mercurio, cadmio, cobre, sodio, potasio, zinc, boro, hierro y manganeso), plaguicidas organoclorados (DDT, endosulfan, etc.), plaguicidas organofosforados, y bacteriológicas (coliformes fecales y totales, vibriocholerae).

Así como la normativa internacional personalizada en la CARU, también Uruguay de forma independiente cuenta con un marco regulatorio en materia ambiental.

En Uruguay, DINAMA es quien dispone de autoridad para el otorgamiento de autorizaciones para la instalación y operación de emprendimientos. Dichas autorizaciones se alinean con el Decreto 435/994 (reemplazado por 349/005 comprendiendo cuestiones técnicas y administrativas en cuanto a trámite para autorizaciones) y el Decreto 253/79 y modificativos, el cual indica los valores límites permitidos de parámetros de calidad de agua, tanto para vertido como para calidad de agua del cuerpo receptor. También eventualmente las autorizaciones de DINAMA pueden incluir exigencias adicionales para una adecuada performance ambiental.

En cuanto a la calidad de los cuerpos de agua, el Decreto 253/79 y modificativos establece una caracterización de los cuerpos de agua en cuatro clases, según sus usos actuales o potenciales. El cuerpo receptor, se puede corresponder con: la Clase 1 (agua para consumo humano por tratamiento convencional), Clase 2 (tipo a: agua para riego de alimentos a ser consumidos en forma natural, y tipo b: agua para recreación en contacto directo con humanos), Clase 3 (cuerpos de agua para protección de vida acuática y agua para riego en algunos casos especificados) y Clase 4 (cuerpos de agua que conviven centros poblados). Las Clases 1 y 3 son en general las más restrictivas, con excepción de algunos parámetros.

El mismo decreto también establece estándares en cuanto a la calidad de los efluentes vertidos. Sin embargo, como la planta UPM descarga sus efluentes en un río binacional ya cuenta con los estándares exigidos por la CARU. No obstante, a estos parámetros, el otorgamiento de la Autorización Ambiental Previa (RM N° 63/2005 del 14 de febrero de

2005) conllevó la adición de los parámetros compuestos orgánicos halogenados (AOX), nitrógeno total y nitratos, estableciendo valores máximos para cada uno de ellos. Asimismo, también DINAMA le encargó a UPM (en ese momento BOTNIA) el cumplimiento de las mejores tecnologías disponibles (BAT por sus siglas en inglés), de acuerdo a lo establecido en el documento de Mejores Técnicas Disponibles en la Industria de Pulpa y Papel de la Comisión Europea (2001).

A modo de efectuar una comparativa y determinar la exigencia mayor del marco regulatorio conformado por DINAMA y CARU, los parámetros de calidad de agua del cuerpo receptor coincidentes tanto en el decreto 253/79 como en normativa CARU, en general se sitúan ligeramente más restrictivos en el primero. Sin embargo, la CARU contempla algunos parámetros adicionales como color, dureza, alcalinidad, iones, PCBs, y otros.

Asimismo, la CARU incluye también regulación en zona de mezcla definida como *“el área aledaña al punto de evacuación de un efluente, en la cual no son exigibles los estándares de calidad de las aguas”* (Tema E3 del Digesto sobre el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay). Se limita su extensión y dimensión teniendo en cuenta proximidades a tomas de agua (para consumo público o riego) y a zonas de recreación, así como también considera las características del río en donde se sitúa la descarga. Aún más, el tamaño de la zona de mezcla se limita al 20 % del ancho del río en donde se sitúa la descarga y su extensión no debe superar 1000 metros a lo largo del eje del río, en ambos casos considerando condiciones de estiaje. Por último, la zona de mezcla no debe superponerse, ni de forma total o parcial, con zonas para otro uso que no sea el 4. Esto se encuentra plasmado en los artículos 4 y 5 de la Sección 2 del Capítulo 5 del Tema E3 del Digesto.

1.3.2. Planta de celulosa UPM

Aquí se describe la planta de celulosa UPM con información recabada de varios informes elaborados por Ecometrix (2006, 2007, 2008, 2009, 2010), además de otros documentos citados oportunamente. Cabe aclarar que la información aquí presentada del diseño de la planta fue extraída de documentos del proyecto inicial, por lo que se indican valores de referencia estimados en el proyecto.

La planta UPM se sitúa en la orilla uruguaya del río Uruguay, distando unos 5km al norte de la ciudad de Fray Bentos e inmediatamente aguas abajo (a 1.1km) del Puente internacional General San Martín, el cual une los países Argentina y Uruguay. La ubicación de la planta de referencia ha sido seleccionada considerando varios factores: grandes caudales disponibles por el río Uruguay, profundidades adecuadas del río que permiten el transporte fluvial, sea para exportación o ingreso de insumos necesarios para

el proceso industrial, cercanía de cuerpo receptor para la descarga de efluentes líquidos y cercanía a las fuentes de materia prima maderera (BOTNIA, 2004).

La planta de celulosa UPM es una industria que transforma madera en pulpa de celulosa, diseñada para producir un millón de toneladas de pulpa seca por año (ADt). En octubre 2013, se otorgó por parte de DINAMA la autorización de ampliar la capacidad de producción a 1,200000 ADt, (según RM N°133/2013³), y en junio de 2014 se volvió a ampliar la producción a un valor final de 1,300000 ADt (según RM N°622/2014⁴). Utiliza el proceso Kraft y realiza el blanqueo de pulpa de Eucalyptus (BEKP por sus siglas en inglés) con un sistema de blanqueado libre de cloro elemental (ECF).

Según Ecometrix (2006) dicha planta cuenta con un diseño de acuerdo a prácticas modernas y ambientalmente sostenibles de acuerdo con las BAT, según las define la directiva de Prevención y Control Integrados de Contaminación (IPPC por sus siglas en inglés) de la Comisión Europea y otras agencias regulatorias experimentadas en temas de la industria de celulosa. Las técnicas BAT por su parte, se definen no por el estado de arte del proceso ni tampoco por ningún ítem individual del mismo, sino por los niveles de emisiones cuando se obtiene el producto a partir de dicho proceso.

El proceso Kraft es el más utilizado en la actualidad a nivel mundial por sus grandes ventajas, como son la mejor calidad del producto final, su aplicabilidad a una vasta variedad de madera, la posibilidad de la recuperación y reuso de las principales sustancias del proceso y su eficiencia energética. A partir del mismo, se obtiene la pulpa del papel al extraer la lignina de las fibras de la madera por medio de los procesos de chipeado mecánico, filtrado, cocción, blanqueado y secado, para ser separada del agua. Se incluye el uso de hidróxido de sodio y sulfato de sodio (denominado licor blanco) para obtener la lignina, luego ésta se lava y se extrae el licor (licor negro) que es tratado y recuperado para su reutilización. Luego la pulpa es blanqueada y secada para su distribución al mercado.

Este tipo de industrias requiere gran cantidad de agua para su operación, por lo que la ubicación de cuerpos de agua con gran caudal es un factor determinante en la definición de la localización de la planta. En este caso, se utiliza el agua del río Uruguay tanto para el proceso como también para el enfriamiento y descarga de los efluentes. El caudal de descarga de efluente tratado se estimó inicialmente en aproximadamente $0.83\text{m}^3/\text{s}$ ($25\text{m}^3/\text{ADt}$).

³Diario El Espectador, 2013

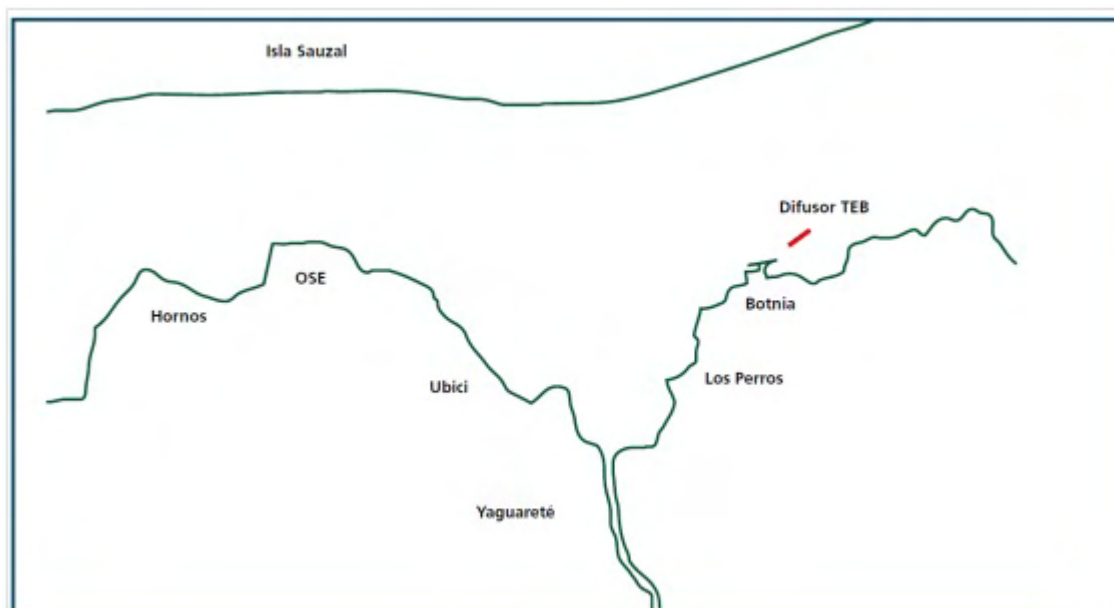
⁴Tiempo Argentino, 2014

1.3.2.1. Efluente líquido descargado

Los efluentes de las plantas con el proceso tipo Kraft proviene de varias etapas del proceso industrial: extracción de pulpa, blanqueado, recuperación química, así como también pérdidas. Esto conduce a que el efluente sea una mezcla de muchos compuestos, estimándose éstos en más de 400 de los cuales se conocen algunos (Ecometrix, 2006, Anexo D).

El efluente de la planta UPM se emite al río Uruguay por medio de un emisario subacuático. El diseño del emisario proyectado se constituye de una cañería de 200 metros de longitud desde las orillas del río, que continua hacia el interior del río con un difusor de también 200 metros de longitud, alineado al tramo previo. El difusor emite el efluente por medio de aproximadamente 80 orificios, con el objetivo de maximizar su distribución (Ecometrix, 2006, Anexo D). En la Figura 1.7 se esquematiza la ubicación del difusor del emisario de efluentes líquidos según proyecto.

FIGURA 1.7: Ubicación difusor según proyecto (Fuente: BOTNIA, 2004)



La extensión de la influencia de las descarga de la planta UPM se determinó por medio de un modelo matemático para la configuración de diseño. Dicha configuración contemplaba, además de la planta UPM, otra planta de celulosa de características similares en las zona de M'Bopicuá (unos 8km aguas arriba de UPM) ⁵. Los resultados correspondientes a caudales bajos extremos con eventos de inversión de flujo indican que la

⁵Estuvo oportunamente autorizada a la empresa ENCE la instalación de otra planta de similares características para un volumen de producción de 500000 ADt/año pero finalmente su construcción nunca llegó a concretarse

distancia a la cual se presenta una dilución 100:1 es de unos 35 metros en todo a lo largo del difusor, así como también una extensión de aproximadamente 7km desde el punto de vertido hasta una dilución de 1000:1 (Ecometrix, 2006, Anexo D). Sin embargo, es importante advertir que debido a que la otra planta no fue construida, las diluciones podrían representar una situación más exigente que la realmente esperable en la situación presente.

El aporte orgánico de los efluentes de plantas BKM se caracteriza por DBO, DQO, AOX y color. Asimismo, sustancias tóxicas como las dioxinas y furanos pueden también encontrarse en estos líquidos, las cuales pueden ser originadas a partir de la reacción del cloro elemental con la madera, entre otras fuentes (Paper Task Force, 1995).

Sin embargo, en el caso de UPM el sistema de tratamiento de efluentes diseñado satisface enteramente las recomendaciones técnicas internacionales (según BAT, etc.), logrando buenas eficiencias en el mismo. En el proyecto se previó que la eficiencia de remoción de DBO, AOX, sólidos suspendidos, fósforo y compuestos clorados fuera de 98, 73, 93, 84 y 99 respectivamente.

UPM cuenta con un caudal proyectado de efluente de $25\text{m}^3/\text{ADt}$, lo que lo sitúa entre el menor 10 % del mundo. El efluente del blanqueado se traduce en un 60 % del caudal total del efluente, siendo ésta contribución la más importante del efluente total.

En la Tabla 1.2 se presentan las características del efluente (según proyecto; Ecometrix, 2006), en términos medios anuales, mensuales y máximos diarios, relativos a una unidad de producción (ADt).

La mayoría de los valores anuales se estimaron a partir de las características del diseño para varios componentes del sistema de tratamiento de efluentes. A pesar que se espera que la planta opere en estos niveles, se advierte que un cambio en las características de la madera de materia prima, cambio en la calidad de agua de insumo y/o condiciones operativas pueden ocasionar variaciones, las cuales se reflejan en los valores medios de las escalas de tiempo menores consideradas.

1.3.3. Monitoreos del río Uruguay en torno a la descarga de la planta

A la fecha existen varios documentos que se refieren a estudios de calidad de agua del río Uruguay en la zona de influencia de la descarga de la planta UPM.

Como antecedentes en estudios de línea de base de la calidad de agua en el área de estudio, se identifica el extenso seguimiento efectuado por CARU (a partir de 1997), así como también DINAMA (2007) y BOTNIA (s.f.). Si bien no se accedió a un informe

TABLA 1.2: Características del efluente de UPM (traducido de Fuente: Ecometrix, 2006)

Parámetro	Unidad	Promedio anual	Máximo mensual	Máximo diario
Estética				
Material flotante		ausente	ausente	ausente
Color	kg/ADt	9	10	25
Convencional				
Temperatura	C	28	30	30
SST	kg/ADt	0.7	1.3	2.6
pH		7.5	6.0 to 9.0	6.0 to 9.0
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	4000	5000	8000
DQO	kg/ADt	8	15	30
DBO	kg/ADt	0.3	0.7	1.5
AOX	kg/ADt	0.08	0.15	0.2
Grasas y aceites		negligible	0.31	0.63
Detergentes		negligible	0.025	0.05
Microbiológicos				
Coliformes fecales	/100mL	-	-	-
Nutrientes				
N total	kg/ADt	0.15	0.26	0.52
Nitratos (No3)	kg/ADt	0.08	0.13	0.24
Amonia (total)	kg/ADt	0.016	0.026	0.048
Fósforo total	kg/ADt	0.012	0.03	0.06
Toxinas				
Clorofenoles	kg/ADt	0.00175	0.00263	0.00525
Cianuro	kg/ADt	negligible	0.00625	0.0125
Componentes fenólicos	kg/ADt	0.000055	0.000055	0.00001
Fitoesteroles	kg/ADt	0.004	0.006	0.012
Ácidos grasos/resinas		negligible	negligible	negligible
Sulfatos	kg/ADt	0.006	0.006	0.013
Dioxinas/furanos	kg/ADt	<2.5E-10	-	-
Metales				
Arsénico	kg/ADt	0.002	0.003	0.006
Cadmio	kg/ADt	0.0002	0.0003	0.0006
Cobre	kg/ADt	0.004	0.006	0.013
Cromo	kg/ADt	0.004	0.006	0.013
Mercurio	kg/ADt	<.000125	-	-
Níquel	kg/ADt	0.008	0.013	0.025
Plomo	kg/ADt	0.0013	0.0019	0.0038
Zinc	kg/ADt	0.0011	0.0017	0.0038

más actualizado que CARU (2003b), Ecometrix (2006) sostiene, a partir de documentación más extensa efectuada por dicho organismo, que los valores de las concentraciones de fenoles superan los estándares, reproduciendo valores máximos del lado argentino.

DINAMA (2007), en un informe preliminar, presenta resultados de tres campañas de monitoreo efectuadas (de un total de cuatro) por dicha institución previo al comienzo de operación de la planta, entre las progresivas 80 y 115 del río (tramo desde isla Zapatero hasta unos 10km aguas abajo del balneario Las Cañas). En este tramo se detecta en general una buena calidad de las aguas, exceptuando dos zonas: la descarga de Arroyo Yaguareté y la descarga de efluentes de la ciudad de Fray Bentos, las cuales presentan incumplimiento de algunos parámetros según sus características. Igual de importante, se encuentra mezcla completa en el canal de navegación, así como distribución prácticamente uniforme en la temperatura superficial del área seleccionada.

BOTNIA (s.f.) por su parte, elabora campañas de muestreo de calidad de agua del río en las proximidades de la planta, junto con un relevamiento de la información disponible al momento. Concluye que el canal del río es “limpio” en dicha zona, identificando concentraciones elevadas de fósforo, Cromo, Níquel y Zinc.

Independiente a lo anterior, la Corporación Financiera Internacional del Banco Mundial (IFC por sus siglas en inglés) encargó un Estudio de Impacto Acumulativo (CIS por sus siglas en inglés) de la construcción y operación de la planta de celulosa y su abastecimiento de materias primas. El consecuente informe de Ecometrix (2006) contiene una descripción del proyecto y una estimación en cuanto a su performance ambiental analizando el cumplimiento de estándares vigentes por el marco regulatorio de Uruguay y CARU, así como también especificaciones particulares exigidas por el IFC. Presenta, entre otros resultados, el desempeño ambiental previsto de la planta. Sin embargo, se advierte que en ese informe se contemplan los efectos acumulativos por la construcción de la planta UPM junto con la ENCE, anunciada a emplazarse 8km aguas arriba de UPM, en la ribera uruguaya frente a la isla de la Caballada, lo que podría equivaler a una sobreestimación de los efectos. El CIS concluye que el vertido de la planta tendría un efecto mínimo sobre la calidad del agua del río Uruguay, tanto para condiciones de caudales típicos como para bajos extremos.

Este estudio fue seguido por otros informes complementarios que constituyen fases hacia un seguimiento del desempeño real de la planta, efectuando una comparación con el primero a modo de constatar el cumplimiento de determinadas estimaciones establecidas. La primera fase (Ecometrix, 2007) implicó una revisión de los planes y gestión de la planta previo al comienzo de su operación. A partir de la puesta en marcha de la planta, se efectúa un diagnóstico a los 6 meses del comienzo como Fase 2 (Ecometrix, 2008), luego al año como Fase 3 (Ecometrix, 2009) reflejando los resultados del monitoreo del

año 2008, y por último la Fase 4 indicando los resultados del monitoreo del año 2009 (Ecometrix, 2010).

En Ecometrix (2006) se presentan valores de línea base tomada como patrón de comparación para las siguientes fases. Particularmente en el caso de la temperatura, se dispone de registros mensuales en cuatro puntos situados en los alrededores de la planta UPM: Nuevo Berlín, Puente, UPM y Las Cañas, con el objetivo de obtener una línea de base previo a la operación de la planta, estos valores provienen de muestreos efectuados en 7 meses del período entre abril del 2005 a marzo del 2006. A partir de estos muestreos se obtienen dos importantes resultados: el primero asociado a la estacionalidad de la temperatura, presentando valores mínimos en agosto y máximos en enero en un rango de 15.6 y 29.8°C, y el segundo asociado a la identificación de una correlación entre la temperatura y otros parámetros ambientales como la turbidez, coliformes fecales y nitratos. La Tabla 1.3, presenta los valores obtenidos de temperatura obtenidos en los meses de muestreo. Se observa que no se cuenta con la totalidad de los meses de una ventana temporal anual, sino que solamente de siete meses. Además, a partir de los datos puede observarse que en el mes de enero, además de disponer los valores más elevados, presenta mayor diferencia en las temperaturas de las cuatro estaciones de muestreo.

TABLA 1.3: Valores de temperatura de línea de base

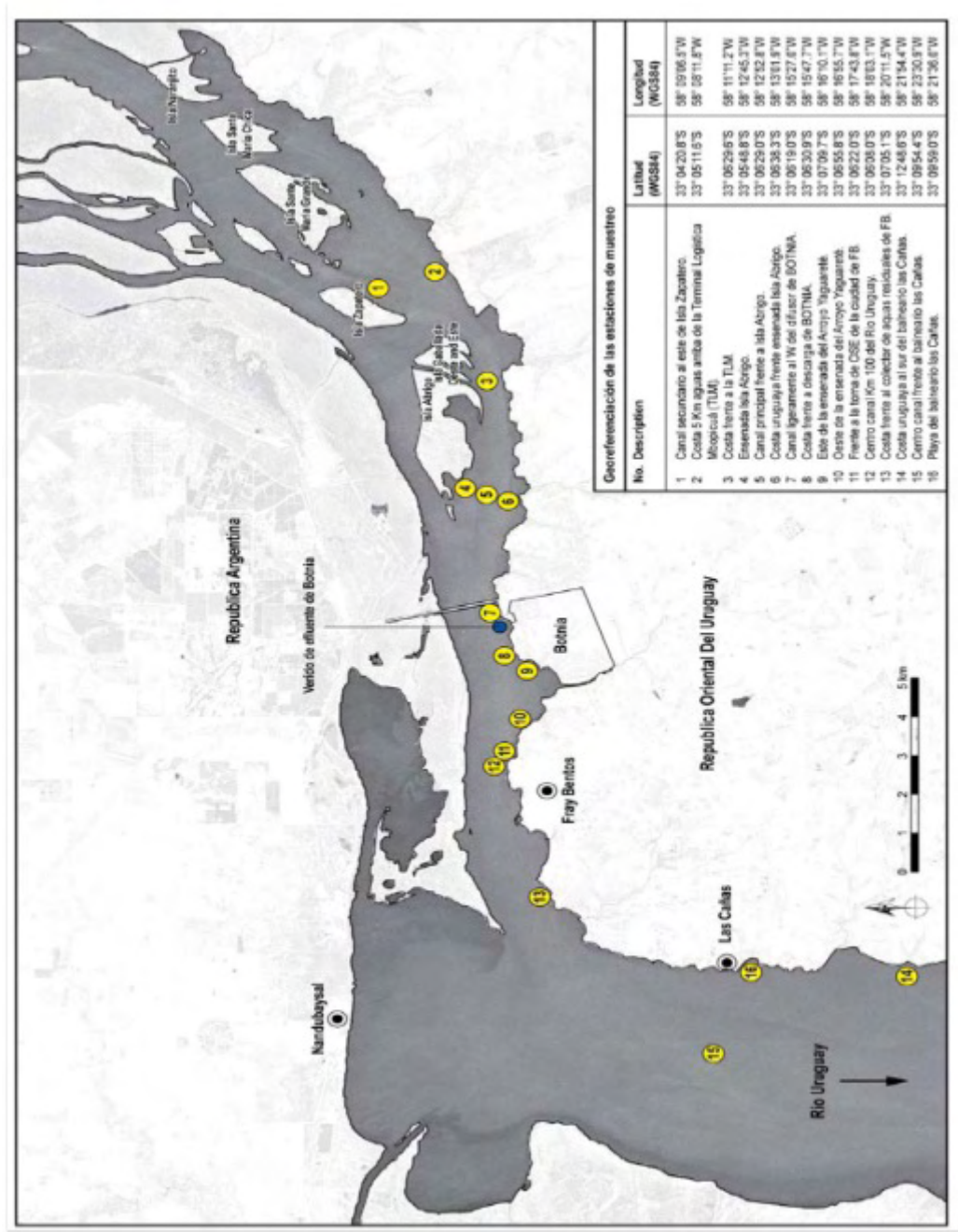
Punto	Apr-05	Jun-05	Aug-05	Oct-05	Dec-05	Jan-06	Mar-06
Nuevo Berlín	18.2	18.2	15.6	22.3	26.8	27.9	24.6
Puente	18.2	18.2	15.8	22.4	27.4	28.5	24.4
UPM	18.0	18.4	15.8	21.9	27.3	29.7	24.4
Las Cañas	18.0	18.1	15.7	23.2	27.4	29.8	23.9

Por otra parte, en las fases efectuadas posteriormente se desplegaron monitoreos en cuanto a la calidad del río Uruguay y la calidad del efluente vertido, definiendo los puntos de control según esquematiza la Figura 1.8. En cuanto a la calidad del efluente vertido, se evalúa la calidad en la salida de la planta de tratamiento de efluentes. A lo largo de los informes de las Fases 2, 3 y 4 se destaca el cumplimiento de los estándares de vertido (tanto según marco normativo como valores establecidos por DINAMA para este caso), exceptuando de forma muy puntual los SST (superaron estándares en la etapa de arranque, febrero 2008), DBO, color y temperatura. En el caso de este último, el incumplimiento sucedió en no más de 1°C.

En cuanto a la calidad del río Uruguay en las inmediaciones de la planta (tramo desde isla Zapatero hasta 3km aguas abajo de Las Cañas), se continúa considerando un río de buena calidad, con la salvedad de algunos incumplimientos del estándar más exigente (CARU o DINAMA, según sea el caso) de los parámetros como el fósforo, coliformes fecales (en puntos de monitoreo cercanos a las descargas de efluentes domésticos de Fray

Bentos y Las Cañas) y hierro. Los mismos coinciden con los resultados indicados en la línea de base (BOTNIA, 2004). Además, se detectó valores elevados de mercurio en zona aledaña a la descarga de UPM sin poder identificar su origen (Ecometrix, 2010).

FIGURA 1.8: Puntos de control monitoreo (Fuente: Ecometrix, 2006)



En cuanto a la temperatura, en las mediciones se visualiza la estacionalidad de los datos, detectándose un leve incremento en las inmediaciones a la descarga de UPM y un descenso en las inmediaciones a la descarga del arroyo Yaguareté. Los valores más elevados se corresponden con febrero del 2008 y 2009.

De la información presentada en los tres informes se puede extraer lo antes anticipado por DINAMA (2007), en cuanto a que no se detecta diferencia significativa en las mediciones de temperatura entre el fondo y capa cercana a la superficie.

Estos tres informes fueron seguidos de documentación más reciente como lo es la evaluación del desempeño ambiental que tuvo UPM en el año 2012 (UPM Fray Bentos, 2013), el cual sostiene el cumplimiento de estándares de la planta. Sin embargo, advierte que en el arranque de operación de la planta luego de la detención de mantenimiento, la carga de fósforo promedio mensual superó el valor máximo establecido en 2 % aproximadamente.

Otra información pública disponible son los resultados de monitoreos continuos efectuados por la empresa. Desde abril de 2005, además de controlar las características del efluente previo al vertido, se encuentra realizando un monitoreo ambiental del río Uruguay en diferentes puntos ubicados en las inmediaciones de la planta. Este monitoreo es requerido para gestionar las autorizaciones ambientales en nuestro país, tanto de implantación como de operación, por el organismo competente (DINAMA). Los puntos de monitoreo son cuatro: dos aguas arriba de la planta (a la altura de Nuevo Berlín y del Puente Internacional), a la misma altura de la planta y aguas abajo de ésta (a la altura del balneario Las Cañas) y se miden más de 50 parámetros ambientales: fisicoquímicos, microbiológicos, iones metálicos, sustancias orgánicas, clorofenoles, fitoesteroles, bifenilos policlorados (PCB), hidrocarburos poliaromáticos (PAH), y dioxinas y furanos. Las campañas de muestreo se realizan un día al mes, todos los meses del año. También se incluye un monitoreo biológico el cual consiste en un seguimiento de la biota existente en el río y las condiciones de su hábitat (más información se encuentra en LATU, 2007).

1.4. Objetivos planteados

Como fue anticipado anteriormente, la razón del presente trabajo de Tesis se sostiene en el interés de analizar la interacción entre los efluentes líquidos descargados por la planta de celulosa de gran porte UPM y el río Uruguay como cuerpo receptor de estas descargas.

En este contexto se plantean dos objetivos específicos principales:

- Determinar el comportamiento de la pluma de descarga de la planta en el río, con la intención de conocer el destino de los contaminantes vertidos dentro del curso hídrico
- Identificar áreas de estancamiento en la zona aledaña al vertido, las cuales serían más vulnerables ante la eventual presencia de ciertos contaminantes debido a que

los mismos podrían permanecer más tiempo y por lo tanto desarrollar reacciones que perjudiquen la calidad de las aguas de estas áreas

Ambos objetivos se encuentran claramente vinculados al comportamiento del flujo del río, es decir, el comportamiento hidrodinámico del mismo. Se incluye como parte de este trabajo, la implementación y configuración de un modelo de simulación numérica para determinar el comportamiento hidrodinámico del río. La calidad de este modelo es importante para la obtención de resultados confiables.

Para obtener un modelo hidrodinámico calibrado y validado se requiere información hidrológica y batimétrica del río. La densidad y la distribución geográfica de los registros de mediciones de parámetros hidrológicos y la información batimétrica determinan la extensión del dominio a ser simulado. Una vez disponible la información de estas características, es posible la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional desde la Represa Salto Grande hasta la sección del río a la altura de Nueva Palmira. Se plantean tres escenarios de simulación tanto para la etapa de calibración como la de validación, siendo éstos seleccionados según el caudal de flujo: escenario de caudales bajos, de caudales medios y escenario de caudales altos.

Debido a que las concentraciones de contaminantes son mayores cuanto menor sea el volumen de agua en el cual están sometidos, se hace especial énfasis en los escenarios de caudales medios y bajos.

Posteriormente, se detectan las zonas críticas en cuanto a su tiempo de residencia, es decir, al tiempo en que podrían permanecer los contaminantes en ellas. En las zonas en que el contaminante permanece en ellas poco tiempo, se podría esperar que las afectaciones no sean significativas. En cambio, en las que permanecen más tiempo, el contaminante podría interactuar con otros elementos del sistema y así eventualmente alterar la calidad del mismo.

Finalmente, se efectúa la simulación de un trazador conservativo para interpretar el comportamiento de la pluma de descarga de UPM. Debido a la ausencia de información necesaria para determinar la dispersión de contaminantes en el río, se efectúa un análisis cualitativo contemplando variantes en el tamaño y la distribución de la pluma.

1.5. Estructura del informe

El presente informe se constituye de 7 capítulos en total, seguidos por la bibliografía y dos anexos. El primero de los capítulos es la presente introducción.

Seguidamente, el Capítulo 2 presenta una revisión bibliográfica con el objetivo de elaborar un marco de contextualización a la problemática de las actuaciones de las plantas de celulosa en cuanto a los recursos hídricos. Para ello, en primer lugar, se describe las características de los ríos, el comportamiento de los contaminantes en dicho ambiente, y se incluye la descripción de la composición de los efluentes de este tipo de industrias y sus posibles implicancias ambientales. En segundo lugar, se continúa con la presentación de antecedentes del río Uruguay y ríos de la región en cuanto a su comportamiento hidrodinámico como estudios de transporte de sustancias. Por último, se selecciona el modelo numérico a utilizar incluyendo una breve descripción del mismo.

El Capítulo 3 denominado *Análisis Hidrológico*, presenta la información hidrológica de base del trabajo con un análisis de la misma. Debido a que se cuenta con información provista de diferentes fuentes, se efectúa una comparación entre ellas. Luego se determinan valores característicos de las series de datos. Se culmina este capítulo con la selección de los períodos temporales a ser establecidos como los lapsos temporales representativos de los escenarios de interés, y por lo tanto, a ser considerados en las etapas de calibración y validación del modelo hidrodinámico: escenario de caudales bajos, de caudales medios y de caudales altos.

El Capítulo 4 *Batimetría* está dedicado a un desarrollo especial de esta temática, pues la conformación de la batimetría del río conllevó la realización de tareas no previstas debido a la obtención de información parcial de diferentes fuentes. Diferencias en el sistema de coordenadas en que la información estaba representada, en el formato en el que la información fue obtenida y en las características de los datos, se tradujo en tareas de compatibilización, comparación, corrección y conformación de los mismos. Se presenta entonces la metodología utilizada, con el resultado final de la configuración de la información batimétrica del río Uruguay.

Una vez obtenidos y analizados los insumos necesarios, se implementa y configura el modelo de simulación numérica MOHID en el Capítulo 5 *Modelación Hidrodinámica*. Se parte de la configuración batimétrica del Capítulo 4 y se presentan los resultados obtenidos para los períodos temporales que fueron seleccionados en el Capítulo 3 para la etapa de calibración. Seguidamente se implementan en el modelo variables importantes que podrían modificar el comportamiento hidrodinámico del río en estudio, y así analizar la influencia de las mismas en los resultados. A partir de los resultados obtenidos, se selecciona la configuración del modelo que mejor reproduce la información hidrológica disponible. Posteriormente, se efectúa la calibración y validación del mismo con los escenarios ya previamente seleccionados en Capítulo 3. Por último, se presentan conclusiones.

El capítulo 6, titulado Modelación de Contaminantes, utiliza el modelo hidrodinámico configurado con dos objetivos. El primer objetivo concierne a la determinación de tiempos de residencia en áreas adyacentes a la descarga de UPM, y con ello la detección de zonas de altos tiempos. Respecto al segundo objetivo, se incorpora al modelo la descarga de un trazador para determinar el comportamiento de la pluma de descarga de UPM. Se analiza el comportamiento de la misma en el cuerpo receptor ante diferentes condiciones hidrológicas.

El trabajo finaliza con la presentación de las conclusiones y recomendaciones de posibles acciones a futuro en el Capítulo 7. Se presentan las fortalezas y debilidades del resultado obtenido y se incluyen recomendaciones de eventuales investigaciones futuras en torno a esta temática.

Seguidamente se incluye la bibliografía consultada y por último se presentan los Anexos A y B.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Introducción

El presente capítulo contiene un desarrollo de un marco teórico adaptado al caso en estudio y a sus objetivos. En este sentido, consiste en dos grandes ejes: uno relacionado a las características hidrodinámicas e hidrológicas de los ríos y el otro relativo a las plantas de celulosa y su performance respecto al ambiente hídrico. Al final del capítulo estos ejes se unen a efectos de analizar y seleccionar herramientas de simulación numérica con el fin de estudiar la interacción de los efluentes líquidos vertidos por la planta UPM y su cuerpo receptor el río Uruguay.

Los usos de un curso de agua se encuentran fuertemente vinculados a la calidad de sus aguas, determinando esta última por medio de variables características, denominadas generalmente parámetros o indicadores de calidad de agua. Algunas de las más importantes son la temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbiedad, conductividad, carbono orgánico total, bacterias, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fosfatos, compuestos nitrogenados, compuestos orgánicos, sólidos suspendidos, metales y no metales, y sales (Benedini y Tsakiris, 2013).

La cantidad y distribución de estos parámetros se encuentran a su vez fuertemente vinculados a las condiciones hidrológicas del cuerpo hídrico en el cual se encuentran, siendo crucial determinar las condiciones hidrodinámicas del cuerpo (Benedini y Tsakiris, 2013) para poder interpretar los parámetros de calidad, por lo que en primer lugar se incluye una descripción de los procesos hidrodinámicos en ríos.

Seguidamente, la subsección “*Contaminantes y su dispersión en ríos*” concierne los conceptos de contaminación y contaminantes, además de describir y analizar el transporte y comportamiento de contaminantes en cuerpos de agua, particularmente en ríos. Se

introduce el concepto de tiempo de residencia, escala temporal útil para determinar los fenómenos de transporte de las sustancias.

En tercer lugar, el punto “*Las plantas de celulosa y los recursos hídricos*” desarrolla un relevamiento bibliográfico de la performance de plantas de celulosa desde el punto de vista ambiental a nivel mundial concerniendo los recursos hídricos, presentando brevemente las implicancias ecológicas que despiertan los componentes incluidos en sus efluentes, y por lo tanto, los parámetros ambientales de interés en cuestiones ambientales.

Este capítulo finaliza con el subcapítulo “*Modelación numérica*” dedicado a un relevamiento de estudios realizados en el río Uruguay y en ríos de la región, y de soluciones adoptadas en ríos de características similares, cumpliendo con el objetivo de analizar fenómenos similares a los aquí deseados. Se culmina con la selección y una breve descripción del software utilizado a efectos del presente trabajo.

2.2. Procesos hidrodinámicos en ríos

Los ríos se caracterizan por ser turbulentos y presentar grandes velocidades, lo que colabora a mantener los sedimentos transportados en ellos en suspensión (Goodhue, 2007) y a dar lugar a erosión (Julien, 2002). En ríos naturales, la tasa de erosión es variable y depende fuertemente del material que conforma el río, cohesión, y vegetación, condicionando en su conjunto la forma de los mismos.

Asimismo, en casos de tramos de pequeñas pendientes las elevadas velocidades pueden conllevar al desarrollo de meandros. En este último caso, en donde la vorticidad cobra un rol muy importante (Julien, 2002), es ocasionado por una distribución no uniforme de velocidades a lo ancho del río, ocasionando erosión de un lado y sedimentación del otro (Goodhue, 2007).

Lo anterior ocasiona variabilidad en el tiempo de la conformación del río, y por lo tanto, que la geometría hidráulica de canales aluviales también se modifique en el tiempo, al estar vinculado a las características del río (Julien, 2002) .

Por otra parte, un fenómeno de interés en los ríos, y principalmente los regulados por represas, son las ondas de inundación. Dichas ondas se elongan en dirección del flujo y sus crestas se reducen mientras que las mismas se propaga hacia aguas abajo. Ambos factores comprenden la difusividad de las ondas, la cual se hace más significativa ante escenarios de bajos números de Froude (bajo ratio de fuerzas inerciales respecto a gravíticas), grandes incrementos de caudales, mayor rugosidad y ante pendientes de canal de menor magnitud (Julien, 2002).

Incrementos de caudal en ríos suelen inducir *bucles* de dirección anti-horaria en la relación entre las variables de nivel y caudal, diferenciando las etapas de aumento y disminución de niveles en una sección dada. En consecuencia, el caudal máximo es alcanzando antes que el máximo nivel. Igualmente, para un nivel dado, las fuerzas de rozamiento son mayores en la fase de incremento de niveles con respecto a la caída de los mismos (Julien, 2002). En consecuencia, para un nivel dado, no se tiene un único valor de caudal, sino dos o más, debido a que cada evento de onda de crecida registra un bucle particular (Cunge et al., 1980).

La forma del bucle puede presentar transformaciones ante modificaciones en la intensidad de la descarga de caudal. Un mayor incremento tiende a aplacar el nivel máximo de la onda y a aumentar la *inestacionalidad* del flujo (Cunge et al., 1980).

También al considerar una onda de inundación propagándose hacia aguas abajo, se observan diferentes comportamientos entre el canal principal y las planicies o márgenes del río. Durante el incremento de la inundación en una sección dada, la celeridad y niveles a lo largo del canal serán mayores a los de las planicies o márgenes del río durante la fase de aumento de la onda. Por ello, se origina pendientes transversales a la dirección del flujo que conduce el agua a las planicies. Por el contrario, durante el descenso de la onda sucede lo opuesto: el canal principal comienza a “vaciar” primero conllevando el retorno del agua desde las planicies hacia el canal (Cunge et al., 1980).

Así como los caudales de tránsito y la morfología del río, también la rugosidad y pendiente de éste intervienen en los patrones de la hidrodinámica. En cuanto a la última, ante un caso exento de control de flujo de aguas abajo (marea, etc.), a mayores valores de pendientes el bucle presenta una menor apertura y por lo tanto tendiente a una curva biunívoca de flujo estacionario. Para pendientes inferiores a 0.0001, el bucle existe siempre (Cunge et al., 1980). En cuanto a la rugosidad, un incremento de rugosidad del cauce ocasiona que las ondas de crecidas resulten en menor incremento de niveles, retardando el tránsito de las mismas (Cunge et al., 1980).

En situaciones con forzantes de viento, ondas gravíticas de diferentes longitudes y amplitudes son generadas a partir de vientos de aproximadamente 6m/s de velocidad. En ríos, es usual que las ondas sean limitadas por la longitud Fetch, definida como la distancia horizontal en dirección del viento sobre la cual el viento genera sobre elevación del nivel de agua o marea ¹, lo que repercute en erosión de las riberas del río. Eventualmente, también pueden ser limitadas por la profundidad del río durante largas tormentas y con una longitud Fetch superior a 3 o 5km, lo que por el contrario, causa resuspensión del material del lecho (Julien, 2002).

¹Definición según U.S. Army Corps of Engineers (2002)

Por último, un forzante adicional es el efecto de marea que puede influir la hidrodinámica de un río, cobrando gran importancia como condición de borde de flujos transitorios (Cunge et al., 1980). La marea son ondas oscilatorias en grandes extensiones de agua, con períodos del entorno de medio día, que resultan de la interacción de masa y fuerzas entre la Tierra, Luna y el Sol. La amplitud y período de las ondas pueden variar según la ubicación geográfica considerada además del período temporal del año (Julien, 2002). En el caso del río Uruguay, el efecto de marea transmitido por el río de la Plata se refleja en sus niveles e hidrodinámica, principalmente en caudales bajos (Ecometrix, 2006). Esto se presenta en mayor profundidad en el Capítulo 3 Análisis Hidrológico, en el Anexo A y en la sección Influencia de marea del Capítulo 5

Los forzantes antes mencionados: marea, viento e ingreso de caudales se denominan barotrópicos (Goodhue, 2007), a diferencia de gradientes de densidad que actúan como forzantes baroclínicos. La presencia y dominancia de los forzantes presentes en un sistema, sumado a la complejidad de la morfología del cauce, determina la dimensionalidad del sistema.

La dirección vertical (profundidad), es considerada en un modelo tridimensional si el cuerpo hídrico presenta una estructura vertical, como son las áreas costeras, en donde suele desarrollarse estratificación térmica en el perfil vertical (Drago et al., 2001). En el caso de ríos, es más difícil de ocurrir debido a la gran turbulencia que usualmente los domina. Sin embargo, en ocasiones puede resultar de interés analizar tridimensionalmente el ingreso de aportes térmicos a cuerpos de agua (Prodanovic, 2013).

2.3. Contaminantes y su dispersión en ríos

A lo largo de la historia, los ríos siempre han sido los receptáculos de sustancias descargadas a lo largo del mismo, como son los nutrientes y patógenos provenientes de efluentes domésticos, sustancias químicas y metales de efluentes industriales, entre otros. Dentro del gran abanico de sustancias plausibles de encontrarse en ríos algunas pueden ser *contaminantes*, definidas como las que son capaces de provocar *contaminación* en los cuerpos hídricos (Unión Europea, 2000).

El término contaminación, según Unión Europea (2000), se define como *“la introducción directa o indirecta, como resultado de actividades humanas, de sustancias o calor dentro del aire, agua o suelo que pueden ser nocivas para la salud humana o la calidad de los ecosistemas acuáticos o de ecosistemas terrestres directamente dependientes de ecosistemas hídricos, lo que resulta en un daño a la propiedad material o lo que deteriora o interfiere con el bienestar u otros legítimos usos del ambiente”*. Por su parte EPA

(2013) denomina “contaminación hídrica” a la alteración en la integridad química, física, biológica, y radiológica del agua, siendo inducida u ocasionada por el hombre.

Un incremento notorio de contaminación en recursos hídricos fue observado en el siglo XX (World Wild Fund for Nature), como consecuencia de la severa industrialización. Esta industrialización conllevó no solamente el aumento de compuestos descargados al ambiente acuático, sino que también repercutió en la variedad de la estructura de los contaminantes, destacándose algunos compuestos artificiales gravemente discutidos como los xenobióticos (Schwarzbaue, 2006). También el crecimiento económico ha ocasionado grandes deterioros en recursos hídricos (Zhang et al., 2006).

Algunos casos de afectación de la calidad de cuerpos hídricos por efluentes de origen antrópico son Azrina et al. (2006), Beyene et al. (2009), De Jonge et al. (2008). Si bien la repercusión que pueda tener el efluente en la vida acuática depende del grado de mezcla, función de las características de la descarga y el cuerpo receptor (Fischer et al., 1979), eventos de contaminación pueden desarrollarse como la eutrofización² (Perona et al., 1999).

Diversas sustancias confluyen a los ríos, las cuales pueden ser: sólidos suspendidos provenientes del arrastre de la cuenca debido al escurrimiento de precipitaciones o provenientes del mismo río, compuestos químicos liberados por causas naturales o antropogénicas, bacterias y otros organismos naturalmente desarrollados en el agua, bacterias, virus y microorganismos debido a actividades antrópicas, y gases (Benedini y Tsakiris, 2013). Dentro de ellas pueden existir algunas beneficiosas, contaminantes e inclusive algunas peligrosas. Estas últimas son tóxicas, persistentes y propensas a bioacumularse (Unión Europea, 2001). Tal es el caso de los compuestos orgánicos persistentes (COPs), comprendiendo los pesticidas organoclorados (OCPs) (dentro de los cuales se incluyen los renombrados DDTs), los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), y los policlorados bifenilos (PCBs). Debido a sus características hidrofóbicas son capaces de permanecer en los sedimentos de cuerpos de agua por mucho tiempo (Zhang et al., 2006).

Recientemente se ha detectado la presencia de contaminantes emergentes, y la información respecto a su naturaleza, variabilidad, y procesos de transporte debe ser mejorada ya que el conocimiento asociado a ellos es limitado (Gavrilescu et al., 2014, Kunkel y Radke, 2012). Este tipo de contaminantes hace referencia a diversos agentes químicos y microbiológicos, antes considerados no contaminantes, que han demostrado persistencia siendo transportados largas distancias, provenientes de actividades antropogénicas como

² “Eutrofización” se define como el “aumento de nutrientes en el agua, especialmente de los compuestos de nitrógeno y/o fósforo, que provoca un crecimiento acelerado de algas y especies vegetales superiores, con el resultado de trastornos no deseados en el equilibrio entre organismos presentes en el agua y en la calidad del agua a la que afecta” (Unión Europea, 1991).

agrícolas, industriales y urbanas. Ejemplos de ellos son fármacos, hormonas y toxinas, entre los químicos, y bacterias y virus entre los biológicos.

Los contaminantes pueden trasladarse cientos y aún miles de kilómetros aguas abajo de su fuente de emisión, debido a la dinámica y complejidad de los ríos. Por ello, los ríos actúan como un medio de transporte de nutrientes, sedimentos y tóxicos hacia los cuerpos a los cuales desemboca. Afortunadamente, los caudales de los ríos afectan en su capacidad depuradora por medio de efectos de dilución debido a variaciones en el flujo de los mismos (Perona et al., 1999). El efecto de mezcla entre el agua y los contaminantes disminuyen los gradientes y concentraciones de éstos (Ji, 2012).

Es por ello que evaluar la calidad de las aguas de los ríos es de crucial importancia en el control y monitoreo de los usos. Los diversos usos de los ríos, y por lo tanto, diversas fuentes de contaminantes, hace necesario efectuar la caracterización de la calidad del agua en un cuerpo de agua, analizar su heterogeneidad geográfica y variación en el tiempo e identificar las fuentes de contaminación más significativas, así como también las variables que producen mayores alteraciones al sistema. Para ello, se seleccionan indicadores o parámetros de calidad de agua. Los más usuales son: temperatura, pH, oxígeno disuelto, compuestos nitrogenados (nitrógeno amoniacal, nitrato y nitrógeno total), DQO, DBO, sólidos suspendidos totales. También pueden utilizarse conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, e inclusive indicadores biológicos (Resende et al., 2010). Si bien algunos de ellos pueden presentar alta correlación entre sí, por lo que pueden reducirse las variables al momento de abordar estudios de calidad de agua o contaminación (Bu et al., 2013), es importante seleccionar los adecuados para obtener un apropiado análisis de la contaminación del cuerpo de agua (Kannel et al., 2007). Bu et al. (2013) hallan tres grupos de parámetros relacionados entre sí denominados: contaminantes integrados, en los que el más importante es el oxígeno disuelto, contaminación por nitrógeno (compuesto por los parámetros asociados al nitrógeno), y factor físico, el cual incluye la temperatura, pH y caudal.

Estas tres últimas variables establecen las condiciones para las reacciones químicas en ríos (Zilberbrand et al., 2001, citado por Bu et al., 2013), lo que determina el campo de concentraciones de las sustancias químicas. En cuerpos de agua, la temperatura puede limitar o favorecer tanto reacciones químicas y biológicas como la disponibilidad o presencia de otras sustancias químicas (Benedini y Tsakiris, 2013). Altas temperaturas ocasionan una disminución en la concentración de oxígeno disuelto, y también, incrementan la toxicidad de sustancias químicas e inhibe procesos biológicos (Madden et al., 2013). Esto es de gran importancia, ya que a diferencia de los lagos, los ríos se caracterizan por el oxígeno disuelto en vez de por nutrientes (Wong et al., 1979). El indicador pH

por su parte, regula reacciones redox y asimismo controla los procesos de nitrificación y denitrificación de la materia orgánica (Jain, 2002).

El parámetro DBO también es uno de los más importantes para la caracterización del estado de un curso hídrico en cuanto a la calidad de sus aguas, y se encuentra altamente asociado a contaminación por descargas domésticas y urbanas (Benedini y Tsakiris, 2013). La DBO indica la presencia de carga orgánica y se encuentra fuertemente relacionada con el oxígeno disuelto: a mayor cantidad de DBO habrá mayor consumo de oxígeno, por lo tanto, menor oxígeno disuelto en el río. Sin embargo, si bien en algunos casos puede actuar como un buen indicador de contaminación en ríos (Jingsheng et al., 2006), en otros casos, con gran presencia de compuestos nitrogenados, el DBO no representa adecuadamente el estado del río como un único indicador, sino que el variante CDBO, asociado a componentes carbonados, sí lo es (Kobori et al., 2009). Este último es de suma importancia en efluentes cloacales (Benedini y Tsakiris, 2013). Existe también otro variante de la DBO, que se involucra a la materia orgánica compuesta por compuestos nitrogenados, denominada NDBO, aunque en general es de menor importancia como indicador (Benedini y Tsakiris, 2013).

Grandes heterogeneidades en los valores de parámetros de calidad de agua pueden encontrarse en un mismo cuerpo hídrico (Kumar y Reddy, 2009), en función de la ubicación y características de los contaminantes, sus fuentes de ingreso y cómo se comportan dentro de dicho ambiente.

El origen de los contaminantes puede dividirse en fuentes difusas y puntuales. La segunda, a diferencia de la primera, es atribuida a un origen definido y discreto, como son las descargas del sistema de saneamiento doméstico y de industrias. Casos del primer tipo mencionado son los aportes provenientes de actividad agrícola, minera o urbana.

En los casos de fuentes puntuales, las condiciones de mezcla pueden ser optimizadas con difusores sumergidos debido a que inducen grandes niveles de dilución y por ende, el impacto ambiental del efluente se restringe a una pequeña zona (Jirka y Harleman, 1973). También resulta beneficioso efectuar la descarga en el “corredor” del río y no en las márgenes, debido a que con la primera opción se obtiene una mezcla completa más rápido que con la segunda (Fischer et al., 1979). La zona de mezcla del efluente en el cuerpo de agua resulta en lo que se denomina “*pluma*”, cuyas características dependerán de las condiciones del ambiente receptor así como del efluente vertido (Fischer et al., 1979).

El origen del contaminante, además de otros factores, influye en la concentración del mismo en el cuerpo de agua a lo largo del año. Pues, en épocas en que el río presenta

caudales bajos, generalmente en verano y principio de otoño, la concentración del contaminante se incrementa debido a la reducción en la capacidad de dilución, pudiendo tener gran impacto en la calidad del agua del río (Osorio et al., 2014, Summers et al., 1991). Sin embargo, la interacción con variaciones en actividades antropogénicas ligadas a la calidad del agua del río puede afectar dicha tendencia (Perona et al., 1999).

En cambio, en caso de fuentes difusas, los contaminantes se encuentran en mayor abundancia en el río durante períodos con mayores caudales (Kim et al., 2005). El impacto de fuentes difusas es más compleja y por lo tanto requiere mayor densidad de información para el abordaje de un análisis (Aitken, 2003, citado en Kim et al., 2005). El suelo de la cuenca hidrológica puede actuar como un reservorio de contaminantes, que durante condiciones de altas precipitaciones pueden ser arrastrados hasta el río (Aitken et al., 2001), aunque la contaminación del río por dicho arrastre depende de las condiciones hidrodinámicas del mismo, dependiente de marea y precipitaciones (Bougeard et al., 2009).

Pero para identificar las causas de la contaminación en cuerpos de agua, es necesario analizar los puntos de origen del contaminante, y conocer su transporte en el cuerpo de agua y su reactividad. Esta última se vincula a procesos químicos o biológicos a los que pueda ser sometida la sustancia: mineralización y descomposición, hidrólisis, fotólisis, biodegradación, bioconcentración y volatilización (Ji, 2012), y por lo tanto, alterar su concentración en el ambiente hídrico. También pueden ser disipadas o sedimentadas en otro sistema ambiental (Ji, 2012). Como resultado de la acción de estos procesos en la sustancia, la misma reproduce un decaimiento que es una reducción gradual de su cantidad en el cuerpo hídrico, el cual para una sustancia generalmente se expresa con la Ecuación 2.1, siendo m el orden de la reacción (usualmente de valores 0, 1 y 2) y k una constante según el orden de la misma (Ji, 2012).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC^m \quad (2.1)$$

Las sustancias que puedan sufrir dichas alteraciones se denominan activas o reactivas. Por el contrario, algunos contaminantes no sufren alteración física, química ni biológica manteniendo la misma fase que disponía al momento del ingreso en el cuerpo de agua, denominados conservativos (Shook et al., 2004).

En cuanto a su transporte, el movimiento de un contaminante en un cuerpo de agua se encuentra fuertemente ligado a la hidrodinámica del mismo. Por lo tanto, es de suma importancia conocer con certeza las condiciones hidráulicas del cuerpo de agua receptor: caudales, niveles y campo de velocidad de flujo (Benedini y Tsakiris, 2013).

Otro factor crucial relacionado a la hidrodinámica y decaimiento del contaminante es el tiempo de residencia del río, definido como el tiempo que una sustancia permanece en un volumen de control definido. Esta variable determina el tiempo que las sustancias transportadas por el cuerpo hídrico, son sujetas a procesos ecológicos (Campuzano Guillén et al., 2004), y por lo tanto son utilizadas para describir escalas temporales del transporte y remoción de sustancias, al igual que otros términos como tiempo de exposición (de Brauwere et al., 2010). Si bien Wan et al. (2013) advierten que pueden haber diferentes formulaciones para la determinación de tiempos de residencia, a efectos del presente trabajo se adopta la utilizada por dichos autores, quienes lo definen como el tiempo que es necesario transcurrir para que una cierta cantidad de masa de agua sea retenida en una región definida o el tiempo necesario para remplazar la masa de agua en esa región.

Un mayor tiempo de permanencia en el río resulta en una menor contribución de contaminantes a zonas costeras y océanos (Alexander et al., 2000, Mulholland et al., 2000). Cambios en el tiempo de residencia de un río puede ocasionar modificaciones en su temperatura, turbiedad, fósforo y producción primaria (Allan y Castillo, 2007).

Debido a las características locales del tiempo de residencia, pueden existir zonas con diferentes tiempos de residencia dentro de un mismo cuerpo de agua (Silva et al., 2013), representando la heterogeneidad de los fenómenos y procesos de transporte que en él suceden (Aikman III y Lanerolle, 2004). Tiempos de residencia de zonas muertas o zonas quietas pueden resultar de interés, en los que los contaminantes son retenidos por lapsos temporales considerables antes de que sean retornados al canal del río y transportados hacia aguas abajo (Cheon et al., 2007). Este mayor tiempo de residencia puede conllevar a la deposición de materia orgánica, incrementando la retención de fósforo (Schulz et al., 2003), incrementando la cantidad y crecimiento de fitoplancton (Wan et al., 2013) e inclusive ocasionar “*bloom*” de algas (Silva et al., 2013).

Dicho lo anterior, cobran gran importancia los procesos hidrológicos de transporte, quienes son los que determinan el movimiento del contaminante en el cuerpo de agua, y por lo tanto, su tiempo de residencia. Cuando un pulso de contaminante conservativo es vertido en un río, de masa conocida, el mismo es transportado hacia aguas abajo según el movimiento del río y es sometido a varios procesos físicos de transporte, conllevando un aumento en el tamaño de la zona de mezcla y cambio en su forma. La sustancia se esparce a lo ancho del río y la zona de mezcla o mancha presenta la máxima concentración en el centro, y menores concentraciones a medida que va hacia los bordes de la misma. Esto se debe a la dispersión hidrodinámica, la que combina los efectos de la difusión molecular, la mezcla turbulenta, y la mezcla debido a gradientes en el perfil de velocidad transversal y vertical (Dutta, 2008). Esta dispersión hidrodinámica, sumada

a la advección del flujo del río, resulta en el movimiento de la sustancia. En ríos, la advección usualmente representa el proceso de transporte más significativo en la dirección longitudinal (Ji, 2012).

Debido a que los ríos naturales son turbulentos, la difusión molecular es despreciable respecto a la turbulenta (Cheon et al., 2007, Czernuszenko y Rylov, 2005). Asimismo, curvas e irregularidades en las paredes del curso influyen en la mezcla en sentido transversal (Fischer et al., 1979). Inclusive, si la morfología del río varía continuamente puede provocar que no sea posible alcanzar el estado asintótico (Jirka y Weitbrecht, 2005). Pero también estas heterogeneidades favorecen el desarrollo de zonas de gran circulación que ocasionan un efecto de almacenamiento en el campo de concentraciones (Lee y Seo, 2007).

La acción de marea en un río, por su parte, acompaña a una gran variación de la distribución de concentraciones a lo largo del tiempo, con valores medios de concentración mayores a situaciones sin considerar el efecto de marea (Lee y Seo, 2007). También los eventos de inundación en las planicies de los ríos, con la consecuente modificación de la sección transversal de flujo, ocasiona que la dispersión sea alterada respecto a la situación en que el flujo se encuentra confinado en la sección del cauce principal: cuando las planicies son inundadas con poca profundidad la dispersión se incrementa aunque a medida que el nivel de las planicies aumenta la dispersión se reduce (Wallis y Manson, 2005).

Si se considera una descarga continua de un contaminante en un punto fijo, es posible diferenciar dos regiones en función de la predominancia de los mecanismos de mezcla, las cuales son descritas en Jirka y Weitbrecht (2005). En la primera de ellas, las características iniciales de la pluma, como diferencias en la densidad y las características geométricas de la descarga, determinan la trayectoria y grado de la mezcla. Esta región se denomina “*campo cercano o dilución inicial*”, y el diseño de la emisión usualmente influye en las condiciones iniciales de mezcla. A medida que la pluma es transportada hacia aguas abajo, el incremento en la distancia respecto al punto de origen conlleva un incremento en la independencia de las características de la descarga pero también un incremento en la dependencia de las condiciones ambientales del cuerpo receptor. En esta región, denominada “*campo lejano*”, la trayectoria y dilución de la pluma turbulenta serán controladas por la turbulencia y advección vinculados ambos al campo de velocidades del río, generalmente variable en el tiempo.

Para el caso de ríos, Jirka y Weitbrecht (2005) afirman que la mezcla vertical rápidamente se completa con solamente una distancia de magnitud de decenas de veces el valor de la profundidad del mismo. Asimismo, la mezcla completa en la dirección transversal

requiere grandes distancias: para ríos con relación ancho/profundidad entre 10 a 100, la mezcla completa requiere de una distancia desde 100 a 1000 veces el ancho del río.

A seguir, el foco de lo presentado se hará al campo lejano ya que es primordial para la estimación de escalas temporales de los procesos de transporte de contaminantes de un río y la capacidad de dilución de los mismos (Caplow et al., 2004).

Una herramienta muy importante en el conocimiento de transporte de sustancias en ríos son los trazadores (Shook et al., 2004). Un trazador es usualmente un compuesto químico que es vertido en condiciones conocidas al cuerpo receptor que se desea analizar, y luego se determinan sus concentraciones en puntos definidos a lo largo del tiempo. En general se utilizan sustancias conservativas, aunque existen aplicaciones con no conservativas (Kunkel y Radke, 2012). Una ventaja de la utilización de trazadores reactivos es que al conocer la cantidad de trazador que se ha vertido, es posible determinar cuánto se incrementa o reduce debido a la interacción con el sistema hídrico. Sin embargo, sin conocimiento previo de la hidrología o características químicas del río, la variación detectada en la concentración del trazador generalmente no puede ser determinada (Antweiler et al., 2014).

Aplicaciones de descargas instantáneas de un trazador conservativo han sido utilizadas con el fin de representar su comportamiento y con ello determinar los tiempos de residencia en un cuerpo de agua, y detectar las zonas de almacenamiento de sustancias (Bottacin-Busolin et al., 2011, Wan et al., 2013). Con la obtención de curvas tiempo-concentración en puntos de control establecidos, se envuelve todos los procesos de mezcla y transporte intervinientes en el río, visualizando la respuesta del sistema a un evento determinado (Wallis, 2005). Por su parte, Antweiler et al. (2014) utiliza pruebas de trazador para determinar tiempos de tránsito y detectar parcelas lagrangianas originadas por el vertido de una descarga instantánea del mismo, con el fin de unir procesos hidrológicos y transformaciones químicas en el muestreo.

Un ejemplo de trazadores pueden ser los isótopos, dentro de los cuales el Tritium ha demostrado gran utilidad en medios acuáticos (Ferronsky y Polyakov, 2012), además de Boro, Sodio, Magnesio, Potasio, Calcio, Estroncio, y Molibdeno que han demostrado ser conservativos y por ende útiles para identificar patrones de circulación de agua (Paulsen y List, 1997). También otras sustancias como la Rodamina han dado resultados satisfactorios como herramienta para determinar el tiempo de residencia (Domínguez et al., 2003).

También pruebas de trazadores han sido utilizadas como instrumento para ajustar o validar modelos matemáticos de los procesos de transporte y difusión de contaminantes (Ani et al., 2009, Wallis, 2005, entre otros), los cuales juegan un rol primordial en la

ingeniería ambiental (Fischer et al., 1979) y en la ciencia y gestión de recursos hídricos (Kachiashvili et al., 2007).

Los modelos matemáticos son una representación del transporte y difusión de los contaminantes en fórmulas matemáticas. El tipo más utilizado es el numérico, pero también modelos matemáticos de tipo estocásticos o físicos han sido utilizados en el análisis de transporte de contaminantes en cuerpos de agua. En el caso de los segundos, se basan en la probabilidad de ocurrencia (Benedini y Tsakiris, 2013), y un análisis comparativo entre éste y modelo de tipo numérico ha mostrado resultados confiables y consistentes entre sí (Romanowicz et al., 2012). En el caso de los últimos, su uso se ha desestimado debido a que son capaces de simular solamente vertidos de tipo instantáneo (Ani et al., 2009).

La fiabilidad de los modelos numéricos de transporte de contaminantes radica en la buena estimación de los coeficientes de difusión y las velocidades. La mejor forma de determinar dichos coeficientes de difusión es a través de vertidos de trazadores con extracción de muestras y con medidas de concentración (Chin, 2006, Guymer, 1998, citados en Ani et al., 2009), pero también es posible con el uso de sensores (Douglas et al., 2007).

Sin embargo, existe gran dificultad en la estimación de coeficientes de difusión debido a la complejidad del fenómeno de transporte de sustancias, irregularidad del río, y las características de las ecuaciones y sus asunciones (Ani et al., 2009). Estos coeficientes, además de depender del caudal, aunque de forma compleja (Camacho y González, 2008) y conocida limitadamente (Schmid et al., 2010), una vez determinados son válidos únicamente para el río bajo consideración (Benedini y Tsakiris, 2013, Deng y Jung, 2009). Por ello, intentos ha habido de desarrollar metodologías generales para determinar los coeficientes de ajuste de modelos con la intención de eliminar la necesidad de métodos in-situ como las pruebas de trazadores. Tal es el caso de funciones dependientes del caudal y de las características físicas del río, como pendiente, rugosidad y sección transversal (Ani et al., 2009).

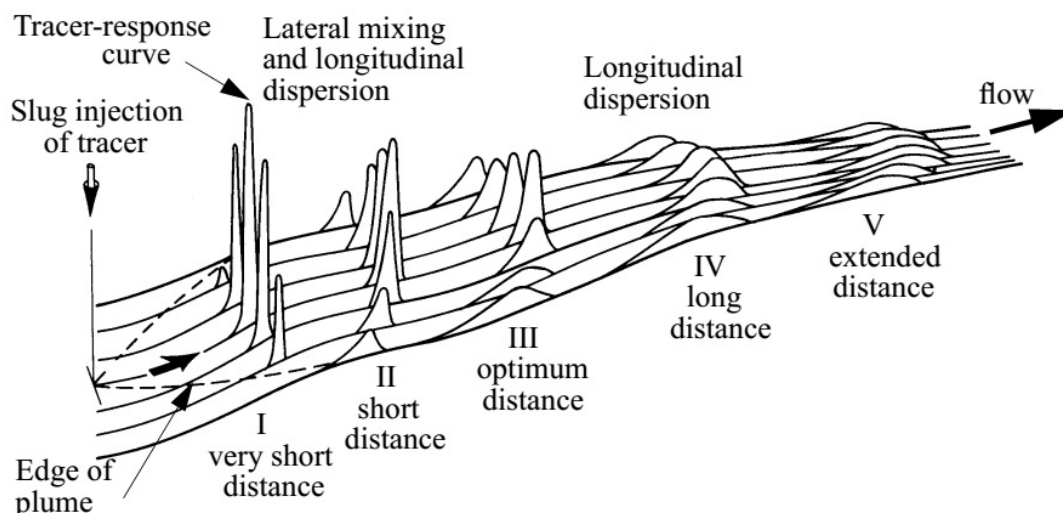
Sin perjuicio de lo anterior, los modelos numéricos son considerados una gran herramienta para determinar los fenómenos de transporte (Caplow et al., 2004, De Smedt, 2007) representando adecuadamente el comportamiento de efluentes de origen antrópico (Kalinowska et al., 2012, Zhang et al., 2012), y asimismo, contando con la capacidad de determinar tiempos de residencia (Braunschweig et al., 2003, Campuzano Guillén et al., 2004, Dias et al., 2003).

Existen básicamente tres modelos para el transporte de contaminantes: simulación randómica, ecuación de advección-dispersión y el método de la suma de los momentos, siendo los dos primeros los más utilizados, por lo que aquí se efectúa una descripción de los mismos.

Los modelos numéricos basados en la ecuación de transporte de masa advección-dispersión (ADE) fundada en la teoría convencional de dispersión Fickiana (Fischer et al., 1979), son utilizados ampliamente para la descripción del transporte y dispersión de contaminantes en ríos, demostrando su adecuación en diversas aplicaciones (Ani et al., 2009, Jirka y Weitbrecht, 2005, Rowiński et al., 2005). Utiliza un enfoque Euleriano, obteniendo campos de concentración. Bajo esta teoría, si se considera una descarga puntual instantánea en un río, mediciones de concentración en el espacio en un instante determinado resultan en una curva similar a una gaussiana, mientras que medidas de concentración a lo largo del tiempo en un punto fijo revela un perfil asimétrico. La Figura 2.1 esquematiza la modificación de la curva de concentración de trazador a medida que es trasladada hacia aguas abajo. A medida que es transportada, la concentración máxima se reduce, y a una distancia dada del punto de origen, la mezcla será completa en ancho y alto del río y el perfil de concentración de la sustancia adoptará una forma gaussiana (Fischer et al., 1979).

En cuanto a los perfiles de concentración en puntos establecidos, consisten en curvas con asimetrías. Si bien Nordin y Troutman (1980, citado por Van Mazik y Veling, 2005) establecen que la asimetría en la curva de concentración disminuye a medida que se aleja del punto de vertido, Van Mazik y Veling (2005) encontraron que la asimetría se mantiene inclusive en distancias lejanas del punto de descarga del trazador, justificada por presencia de tributarios, confluencias, cambios significativos en la morfología del río, presencia de islas, entre otros. Inclusive, dichos factores también pueden incrementar la asimetría en forma puntual (Schmid, 2002, citado por Wallis, 2005).

FIGURA 2.1: Cambios en la distribución de concentración debido a mezcla lateral y dispersión longitudinal, considerando una descarga puntual de trazador en el eje del cauce (extraído de Jobson, 1996)



Por otro lado, se encuentran los modelos de simulación randómicos, usualmente conocidos como métodos de *particle tracking*. Son métodos muy útiles para resolver transporte de contaminantes (Kitanidis, 1994). Básicamente consisten en aproximar la cantidad transportada en un conjunto de partículas, y son muy atractivos para casos en que el número de Peclet ³ es grande, y por lo tanto, el enfoque Lagrangiano presenta ventajas inherentes (Kitanidis, 1994).

Aplicaciones de modelos numéricos para *particle tracking* han sido diversas, comprendiendo desde tracking de masas de agua (Callies et al., 2011, Dias et al., 2003), dinámica de sedimentos (Dias et al., 2003), transporte de materia particulada (Puls et al., 1997), entender el fenómeno de mezcla en sistemas con regímenes físicos variables (Krohn y Duwe, 1992), y determinar las corrientes superficiales (Abascal et al., 2012, Periañez, 2004), entre otros.

El tipo de enfoque utilizado, al basarse en el movimiento de partículas discretas, ofrecen una interpretación física más directa y permiten comprender los procesos intervinientes de forma más intuitiva, además de evitar el problema de difusión numérica asociada al término advectivo (Leitão, 2002, Periañez, 2004). Asimismo, han demostrado ser menos computacionalmente costosos respecto a los Eulerianos (Gomez-Gesteira et al., 2009). Sin embargo, una desventaja es el gran número de partículas que son necesarias de considerar para obtener concentraciones representativas en tiempos y distancias lejanas desde el punto de vertido (Garten et al., 2003). Conocer el transporte de una sola partícula no dispone de la formación suficiente, siendo necesarias una gran cantidad de partículas para conocer la concentración del contaminante en un punto dado (Kinzelbach, 1987). Pero la técnica randómica es la más apropiada en casos en que se desea conocer las trayectorias de las partículas, o la predicción de tiempos de residencia de sólidos inyectados en el campo de flujo que incluyen zonas de reposo o quietas (Nassehi y Passone, 2005).

El enfoque Lagrangeano generalmente es calculado como la suma de un término advectivo y un componente randómico que aproxima las características de dispersión del ambiente (Blumberg et al., 2004, Leitão, 2002). La determinación de este componente randómico puede variar según los autores. Callies et al. (2011) propone una velocidad randómica dependiente del coeficiente de dispersión (constante en el tiempo pero variable según la discretización de la grilla) y una función de distribución definida, detectando que diferentes opciones de esta función prácticamente no son visibles.

Hankin y Beven (1998) analizan varias formulaciones del componente randómico en un canal de dimensiones conocidas en el que transita un caudal en condiciones estacionarias, comprendiendo las que consideran una escala temporal mayor o igual a la escala

³Número adimensional que representa la relación entre el transporte advectivo y difusivo

temporal Lagrangiana ⁴, y por lo tanto determinando las velocidades fluctuantes en las tres direcciones independientemente, además de incluir las que trabajan con escalas temporales menores a la Lagrangiana, incluyendo las correlaciones entre las velocidades fluctuantes. Los autores investigan diferentes niveles de complejidad, abarcando desde el más complejo modelo conteniendo todas las posibles características de las velocidades turbulentas en 3D hasta el más simple estableciendo un paso randómico constante simple sin importar la posición de la partícula en el flujo, pero randómica en su dirección. Sus resultados muestran que los modelos más complejos hacen que las trayectorias de las partículas se encuentren más limitadas a interactuar con el flujo turbulento, llevando a resultados insatisfactorios. Por lo tanto, varios modelos con estructuras simples del componente de velocidad randómico han demostrado ser simuladores útiles de los procesos de dispersión en un flujo complejo. La formulación más simple analizada es la de Allen (1982), quien considera una única escala de velocidad para todas las direcciones. Esta se presenta en más detalle en la sección Trazadores lagrangeanos de este capítulo.

Otra variable de los modelos numéricos es la dimensionalidad del mismo. Así como el método de resolución del modelo numérico se selecciona de acuerdo a las características del caso en estudio, el contaminante de interés, también lo es la selección de la dimensionalidad de las ecuaciones del modelo. En función de las características geométricas del río en estudio se selecciona la dimensionalidad del modelo, pudiendo ser 1D, 2 y 3D. Kachiashvili et al. (2007) analizan para un río de dimensiones de 45km de largo y casi 60 metros de ancho resultados de modelos de 1D, 2D y 3D. Encuentran que para este caso el uso de 2D y 3D resulta injustificada ya que modelos 1D producen resultados muy próximos. Pero casos más dimensionalmente complejos debido a los forzantes intervinientes y a la topografía del dominio, como el estrecho de Gibraltar (Periáñez, 2004, 3D), zonas costeras (Wang et al., 2010, 3D) y la laguna Ría de Aveiro (Dias et al., 2003, 2D), utilizan dimensiones superiores como 2D y 3D.

Como conclusión, para determinar el transporte de contaminantes en ríos, detectar los procesos dominantes, analizar la distribución geográfica de los mismos y determinar el tiempo en que los mismos se mantienen en zonas estancas o quietas así como en el resto del río, es clave la implementación de modelos numéricos de transporte de contaminantes, ya ampliamente utilizados con diversos fines fuertemente vinculados con la Ingeniería Ambiental. Por ello, más adelante en este capítulo se incluye el relevamiento de aplicaciones de modelos de transporte de contaminantes al río Uruguay o ríos de la región, con el objetivo de considerar experiencias previas al momento del abordaje del presente estudio.

⁴La escala temporal Lagrangiana se define como el tiempo necesario para que un cierto volumen de agua olvide su velocidad inicial (Socolofsky y Jirka, 2005).

2.4. Las plantas de celulosa y los recursos hídricos

A lo largo de los años la actividad industrial ha ido en incremento, y con ello la afectación a los recursos hídricos, identificándose como el mayor origen de contaminación en ellos los aportes por vía atmosférica así como por medio de descargas directas. La industria de la pulpa y el papel es la sexta más contaminante, emitiendo al ambiente sólidos, gases y efluentes, siendo estos últimos los más importantes debido a los grandes volúmenes de efluentes generados por cada unidad de producto, y compuestos por cargas térmicas además de sólidos suspendidos, carga orgánica, compuestos clorados, entre otros (Ali y Sreekrishnan, 2001).

Las plantas de celulosa son industrias cuyo objetivo es transformar madera en pulpa de celulosa para la producción de papel. Hay diferentes tecnologías de proceso, dependiendo del tipo de madera de insumo y la calidad de producto que se desea. Sin embargo, el proceso tipo Kraft, denominado también proceso de sulfato, es el más utilizado para producir pulpa blanqueada alcanzando el 93 % de la capacidad mundial (Paper Task Force, 1995). Esto se debe a sus grandes ventajas como son la mejor calidad del producto final, su aplicabilidad a una vasta variedad de madera, la posibilidad de la recuperación y reuso de las principales sustancias del proceso y su eficiencia energética (Ecometrix, 2006).

La madera consiste en tres partes: celulosa, hemicelulosa y lignina. La línea de producción de celulosa busca remover la lignina, compuesto orgánico complejo que une las fibras de celulosa, por lo que la pulpa obtenida consiste principalmente de éstas. El proceso cuenta básicamente con dos etapas: el “*pulping*” y el blanqueo. El primero de ellos se basa en separar las fibras de la lignina por acción química, con el agregado de determinadas sustancias que lo facilitan. Luego se extrae el licor negro (mezcla de lignina, químicos y compuestos menores de la madera) de la pulpa, siendo ésta un producto marrón oscuro (pulpa kraft sin blanquear), y posteriormente sometido a un proceso de recuperación de las sustancias químicas para su reutilización. Por su parte, el blanqueo se realiza en una serie de etapas en las que, por medio de la aplicación de agentes blanqueadores, las primeras buscan remover la lignina remanente (por medio de un lavado con agua) y seguidamente se busca blanquear la pulpa. En la primera etapa la pulpa se pone en contacto con oxidantes, tradicionalmente siendo el cloro por sus ventajas en cuanto al costo y eficiencia, y, aunque en menores concentraciones, también el dióxido de cloro por su alto poder de oxidación. En la segunda fase, denominada extracción alcalina, se aplica una solución cáustica (hidróxido de sodio), que disuelve en agua la lignina segregada de la pulpa para que sea “lavada” y extraída de ésta. En las siguientes y últimas etapas del proceso de blanqueo pueden aplicarse dióxido de cloro (ClO_2), hipoclorito de sodio ($NaHCl$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para aclarar la pulpa.

A partir de algunos puntos del proceso Kraft (extracción de pulpa, blanqueado, recuperación química, así como también pérdidas) se generan efluentes líquidos que equivalen a una mezcla de muchos compuestos, estimándose éstos en más de 400, de los cuales se conocen algunos (Paper Task Force, 1995) pero resultando imposible la caracterización química de forma completa (Kim Oanh, 1996).

El aporte orgánico de los efluentes de plantas BKPM (por sus siglas en inglés, plantas de pulpa Kraft con blanqueo) se caracteriza por DBO, DQO, AOX (Halógenos Orgánicos Adsorbibles) y color. Asimismo, sustancias tóxicas como las dioxinas y furanos pueden también encontrarse en estos líquidos, las cuales pueden ser originadas a partir de la reacción del cloro elemental (*Cl*) con la madera, entre otras fuentes. Cabe advertir, sin embargo, que los impactos ocasionados por los efluentes no siempre son proporcionales a la producción de la planta ni a la carga de los mismos, sino que depende de forma importante de la capacidad de asimilación o depuración del cuerpo de agua receptor y cambios en la modalidad de la descarga (Colodey y Wells, 1992). Valores pequeños de oxígeno disuelto en el curso de agua pueden ser más perjudiciales en condiciones de caudales bajos o poco ingreso de reflujos por la condición de aguas abajo (Colodey y Wells, 1992).

En cuanto al primer parámetro mencionado, el DBO puede afectar negativamente a la concentración de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, especialmente en situaciones de caudales bajos (Colodey y Wells, 1992). Por su parte, la DQO se asocia a la toxicidad subletal (incluye afectación al crecimiento, reproducción o respuesta inmune, siendo efectos que no ocasionan directamente la muerte pero ocasiona que la población decrezca a lo largo del tiempo) para efluentes sin cloro elemental o sin ningún componente clorado en el proceso.

Así como afectar la demanda de oxígeno, los efluentes de plantas de pulpa también pueden reducir el suministro de éste. Un aporte elevado de color al agua podría llegar a limitar el ingreso de luz en el cuerpo de agua receptor y por lo tanto interferir con la actividad del fitoplancton y, por lo tanto, la productividad primaria (Parker y Sibert, 1971, citado por Colodey y Wells, 1992). El color se corresponde con la complejidad de la materia orgánica extraída de la madera, conteniendo también iones metálicos y materia húmica, y muchas veces se lo asocia a pérdidas de licor negro en el proceso.

El oxígeno disuelto, afectado sensiblemente por los parámetros anteriormente descritos, en concentraciones reducidas puede ocasionar cambios en el comportamiento de peces: incremento de respiración, cambios en el hábitat, crecimiento, reproducción, entre otras funciones vitales de los mismos (Kramer, 2009). Inclusive, ante disminuciones de oxígeno disuelto se ha detectado que la toxicidad de los efluentes de planta de pulpa de tipo Kraft incrementa (Hicks y De Witt, 1971).

Parámetros importantes en cuanto a la toxicidad del efluente son las dioxinas y furanos. Son compuestos halogenados, dentro de los cuales hay compuestos tóxicos, mutagénicos y/o cancerígenos (Noma et al., 2001). Si bien dichas familias consisten en 75 diferentes dioxinas dibenzo cloradas (PCDD) y 135 furanos dibenzo clorados (PCDF), normalmente las dioxinas y furanos, detectadas en efluentes BKM son TCDD y TCDF, dos de los más tóxicos de estas familias (Paper Task Force, 1995). Además, son persistentes (forman parte de los contaminantes orgánicos persistentes, COPs, según Nota descriptiva N° 255 de la OMS (2014), bioacumulables y posiblemente biomagnificables (Kim Oanh et al., 1999). EPA (2004) por su parte, afirma que la exposición ante determinadas dosis puede ocasionar efectos adversos a la salud como cáncer, y efectos en el desarrollo y reproductivos. Pero debido a que generalmente las dioxinas son descargadas en pocas concentraciones, esto dificulta su detección y por ende también el conocimiento de su transporte a partir de las descargas que las originan. Sin embargo, si bien podrían no ser cuantificables, independiente de ello podría ocasionar daños en la masa tisular de peces y por lo tanto en el consumidor final de ellos. Por ello, se recurre a los AOX como parámetro indicador ya que es descargado en mucha mayor cantidad debido a que comprende todos los componentes clorados, superando los umbrales de detección. EPA ha determinado que cuando sucede una disminución de AOX, se acompaña de una disminución en las dioxinas (EPA, 2013).

En cuanto a la performance ambiental de las plantas de celulosa, históricamente los efluentes descargados por ellas en ambientes acuáticos eran direccionados al control de los parámetros tradicionales como DQO, SST, carga de materia orgánica medida como DQO y DBO, y toxicidad, aunque posteriormente también se consideraron los parámetros AOX y dioxinas y furanos (Owens, 1991). Pues, a partir de fines de los '80 ha comenzado una línea de interés que concierne a la vinculación de contaminación de dióxidos y furanos provenientes de plantas BKPM y el ambiente, detectando afectaciones en peces, tanto en su fisiología como en su funcionamiento reproductivo (McMaster et al., 2003).

A través de los años se ha continuado la línea de investigación en torno a plantas de pulpa y celulosa. Varios estudios han mostrado un consecuente enriquecimiento en el ecosistema acuático debido a descargas de plantas de pulpa (Colodey y Wells, 1992, Environment Canada, 2003), lo que puede actuar con un efecto acumulativo ante la presencia de descargas de efluentes domésticos (Chambers et al., 2000). Por otra parte, en 1992 y 1993, compuestos clorados incluyendo dioxinas fueron encontrados en sedimentos, peces, moluscos y cangrejos (Kim Oanh et al., 1995), percibiendo la toxicidad del efluente de plantas de pulpa al detectar incremento de masa en los peces, con una disminución en órganos reproductivos (Gagnon et al., 2000). Si bien alteraciones en el desarrollo reproductivo y en el sistema endócrino de peces que viven aguas abajo de la

descarga fueron asumidos únicamente para plantas con blanqueo, también se ha detectado afectaciones a peces en caso de plantas sin etapa de blanqueo (Personen y Anderson, 1992). Por otra parte, Sibley et al. (2000) detecta modificaciones en la estructura de las comunidades bentónicas debido a efluentes de BKPM, y Culp et al. (2000) revela los efectos por enriquecimiento de fósforo incluyendo incremento de la biomasa de perifiton ⁵ e insectos, así como también la abundancia de invertebrados en la comunidad béntica. Vinculados a estos últimos, se observa un patrón con tendencia a desarrollar eutrofización (Environment Canada, 2003).

Estos tipos de descubrimientos impulsaron la búsqueda de soluciones en cuanto a la reducción de la toxicidad del efluente, considerando que depende fuertemente de varias etapas del proceso (recuperación de licor negro, uso de cloro en blanqueado, control de pérdidas, etc.). Surge la implementación de mejoras tecnológicas en el proceso y la instalación de tratamiento secundario de efluentes, con las que se han logrado reducir las concentraciones de las cargas orgánicas y compuestos de cloro (Colodey y Wells, 1992). En el caso de las plantas de tipo BKP, en la mayoría de los países desarrollados, se ha ido transformando la tradicional planta de BKP en tecnologías más ambientalmente amigables al reducir el uso de cloro elemental en el proceso, como son el método Libre de Cloro Elemental (ECF) y Libre de Cloro Total (TCF). Estos métodos reducen la formación de compuestos clorados, tanto en el producto final como en el efluente (Ecometrix, 2006). Si bien el informe de Paper Task Force (1995) afirma que la solución de sustitución de dióxido de cloro, con porcentajes elevados de 50 a 100 %, ha mostrado ser una opción para reducir el contenido de las dioxinas y furanos en sus formas más tóxicas (TCDD y TCDF), Ali y Sreekrishnan (2001) advierten que los procesos ECF no son suficientes para eliminar la emisión de compuestos organoclorados, sino que simplemente los reducen, demostrando que los TCF son más ambientalmente amigables en el largo plazo. Asimismo, se detecta que la anulación del uso de cloro en plantas de tipo BKPM no necesariamente elimina la afectación del desarrollo reproductivo de peces (Munkittrick et al., 1997).

Con la inclusión de tratamiento secundario, sustitución de dióxido de cloro por cloro elemental y otras modificaciones en etapas del proceso se colabora con la reducción de la carga de DBO, siendo el primer método el que logra una mayor reducción (Kim Oanh et al., 1995). También estas medidas disminuyen la descarga de color al reducir la cantidad de lignina que se pone en contacto con cloro (Paper Task Force, 1995). Sin embargo, Latorre et al. (2007) advierten que mejoras en el procesos deben conllevar una combinación de tratamientos para eliminar la toxicidad del efluente, con tiempos de retención

⁵El perifiton se define como una comunidad compleja de microbiota (algas, bacterias, hongos, animales, detritos orgánicos e inorgánicos) adherida a un sustrato (Montoya y Ramírez, 2007).

adecuados, para no solamente reducir la carga orgánica. Además se han analizado mejoras en los tratamientos biológicos como medio de reducción de la carga de DBO, DQO y color (Binsomprasong, 2007).

2.5. Modelación numérica

2.5.1. Introducción

La modelación numérica involucra la selección de un conjunto de ecuaciones para simular el comportamiento de un sistema determinado, y luego resolver las mismas con técnicas numéricas adecuadas. La descripción de los procesos físicos intervinientes en términos matemáticos se denomina modelación matemática, la cual es una herramienta primordial en el abordaje de soluciones a problemas ambientales (Benedini y Tsakiris, 2013).

En este trabajo se pretende obtener una descripción de la hidrodinámica del río Uruguay en su tramo inferior, particularmente en la zona del mismo aledaña a la planta de celulosa en cuestión UPM. Pues, la hidrodinámica es el principal determinante del movimiento de sustancias, campos de las variables de estado y es el insumo primordial para representar la interacción entre el río y el effluente, así como también sus condiciones ecológicas. Para obtener esta representación hidrodinámica del río se recurre a la modelación numérica de los fenómenos.

A modo de introducción, se entiende que para conocer la evolución en el tiempo y en el espacio de las propiedades del medio acuático es necesario implementar algoritmos de resolución basados en la discretización del medio continuo y que transformen el sistema de ecuaciones diferenciales en un sistema de ecuaciones algebraicas. Este sistema junto con las condiciones iniciales y de contorno conforma el modelo numérico a utilizar para la resolución del problema.

En este contexto, debido a que existen varios modelos numéricos para la simulación de la hidráulica ambiental de cuerpos de agua (MIKE-DHI, RMA, DELFT 3D, GEMSS, entre otros), se efectúa un relevamiento en cuanto a estudios similares al propuesto tanto en el río Uruguay como en ríos de la región, optando por los que utilizan modelos bi y tridimensionales, compatibles con los objetivos del presente trabajo. Con ello se pretende direccionar la búsqueda hacia la selección de un software capaz de representar adecuadamente tanto la hidrodinámica del curso de agua en estudio como el transporte de sustancias en él.

2.5.2. Aplicaciones en el río Uruguay

A lo largo de los años se han efectuado numerosos estudios entorno al bajo río Uruguay, en cuanto a la determinación de su hidrología, hidrodinámica, transporte de sedimentos y transporte de sustancias, aunque estas últimas han tomado fuerza en la última década debido a la implantación de grandes emprendimientos industriales en las márgenes del río. Se ha accedido a documentación asociada a estudios hidrológicos, hidrodinámicos y de calidad de aguas, mencionándose aquí los de mayor relevancia a efectos del presente trabajo. Se advierte, sin embargo, que no han sido encontrados estudios con análisis de tiempos de residencia del río Uruguay, con la intención de determinar posibles zonas del mismo más vulnerables a la concurrencia de contaminantes. Esta línea se incluye en el siguiente punto, en el que se presentan casos referidos a ríos de la región que sí lo determinan. En el Capítulo 6 se extiende un análisis de este tópico para el caso en estudio.

El estudio titulado “Análisis del régimen hidrológico de los ríos Uruguay y Paraná” (INA, 2002), incluye información hidrológica de ambos ríos, útil al momento de analizar los registros hidrológicos adquiridos. El contenido de dicho documento se presenta más en detalle en el siguiente capítulo Análisis Hidrológico y en el Anexo A.

En cuanto los estudios hidrodinámicos, existen antecedentes, aunque no tan recientes, que ofrecen un primer acercamiento hacia la caracterización hidrodinámica del bajo río Uruguay. En el IMFIA ⁶ y GECRU ⁷ se posee experiencia en el desarrollo y aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos al río Uruguay.

Del lado uruguayo, el proyecto “Modelo matemático del Río Uruguay”, trabajo conjunto instrumentado por medio de un convenio entre Facultad de Ingeniería y la Dirección Nacional de Hidrografía (en el marco de un proyecto financiado por CSIC y la DNH del MTOP), tuvo como objetivo la Modelación Hidrosedimentológica de dicho río con el fin de dotar a la DNH de un herramienta para la toma de decisiones en cuanto a futuras obras destinadas a mejorar las condiciones de navegabilidad. Este trabajo consiste en dos componentes: una hidrodinámica (Lorenzo et al., 1998a), y otra sedimentológica. El primero se implementa en el tramo inferior del río Uruguay, desde la Represa Salto Grande hasta Nueva Palmira (Lorenzo et al., 1998a); el segundo se configura para tramos definidos del río, en los cuales se busca estimar las necesidades de dragado de mantenimiento. Dichos tramos son el Paso Filomena (Teixeira et al., 1999a), Canal Casa

⁶Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.

⁷Grupo de Estudio del Río Uruguay, conformado por convenio entre la Universidad Tecnológica Nacional - Regional Concepción del Uruguay, el Puerto de Concepción del Uruguay y la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Entre Ríos.

Blanca (Larenze et al., 1998) y Paso Almirón Chico (Teixeira et al., 1999b). Sin embargo, cabe advertirse, que se ha accedido a algunos de la totalidad de los productos finales del proyecto, por lo que la descripción aquí presentada puede no ser completa.

Dicho trabajo cuenta con la implementación del software MIKE 11 (modelo hidrosedimentológico que resuelve las ecuaciones de Saint Venant para flujo unidimensional no estacionario, desarrollado por el Danish Hydraulic Institute), con el suministro de datos de campo preexistentes y los obtenidos en diferentes campañas de medición de la geometría del río en algunas secciones y perfiles longitudinales del fondo del río. También se efectúan campañas para la caracterización del material de fondo y cuantificación del transporte de sólidos (en suspensión y por fondo). La información hidrológica ingresada como condición de borde consiste en caudales de la Represa Salto Grande y niveles en Nueva Palmira, ambos medios diarios (Lorenzo et al., 1998b), contando además con registros de niveles en numerosos puntos de control de ambos lados del río (Larenze et al., 1998, Lorenzo et al., 1998b).

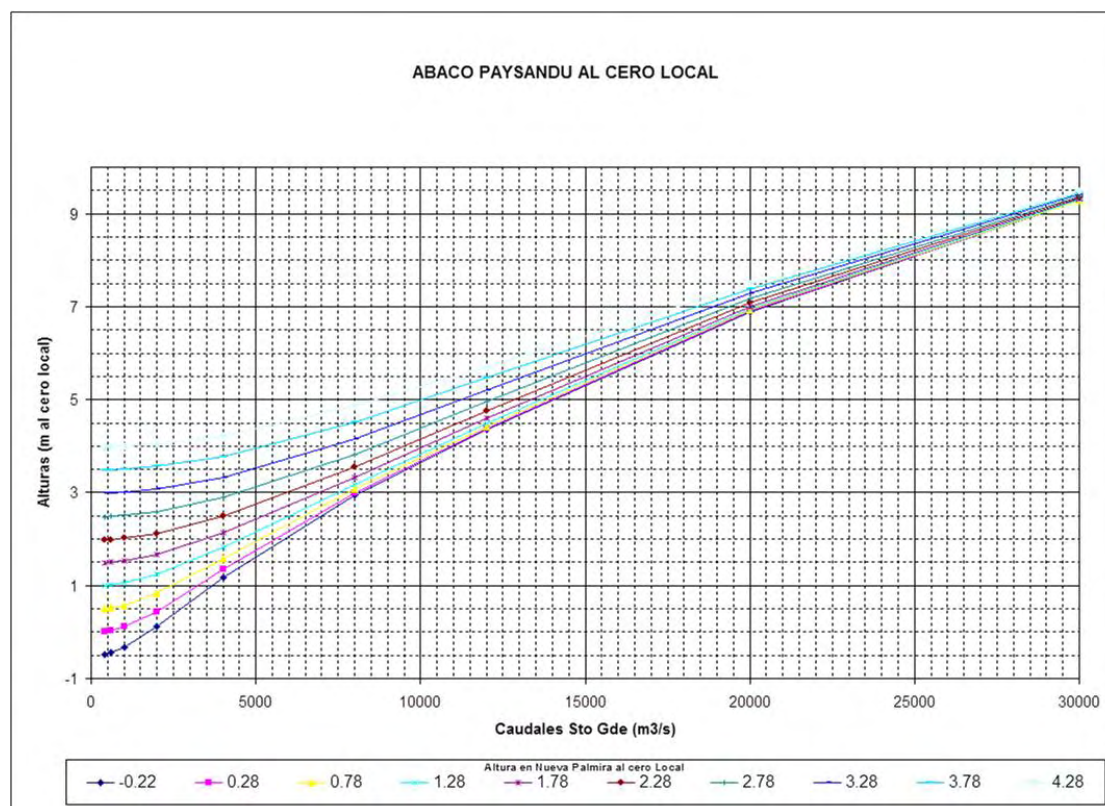
A partir de la información batimétrica recopilada se configura el modelo esquematizado básicamente como una sola rama, exceptuando algunas zonas de interés en las que se consideran dos ramas: tramo comprendido entre el extremo inferior de las islas Bassi y Filomena Grande (pocos km aguas abajo de la ciudad Nuevo Berlín) hasta el extremo superior la Isla Dolores (isla situada frente San Javier y se prolonga hacia aguas arriba unos km más), así como los dos canales que rodean las islas Almirón (a la altura de la localidad Casa Blanca) y San Francisco (inmediatamente aguas arriba de la ciudad de Colón) respectivamente (Lorenzo et al., 1998a). El primer tramo concierne a una simplificación de la zona del delta aluvial del río, en donde conviven numerosos brazos e islas. Como resultado final, en líneas generales se obtiene un buen ajuste del modelo hidrodinámico (Lorenzo et al., 1998b) e hidrosedimentológico (Teixeira et al., 1999a,b), para los objetivos planteados.

Por otra parte, se accedió a “Ábacos de Pronóstico de niveles para el Río Uruguay” (CARU, 2003a), donde se esquematiza la influencia del nivel de Nueva Palmira para diferentes valores de caudales erogados por Salto Grande en cada una de las principales ciudades situadas en la costa del río (Salto, Concordia, Paysandú, Fray Bentos, entre otros). Es importante aclarar que estos ábacos se obtuvieron a partir de corridas en condiciones estacionarias efectuadas con modelo hidrodinámico MIKE11 (con la implementación alcanzada en el proyecto antes citado), en el marco de Plan de Protección Ambiental del río Uruguay.

La Figura 2.2 esquematiza el ábaco obtenido en la ciudad de Paysandú, representando los niveles respecto al cero local. A modo de ejemplo, para un caudal medio de $5000\text{m}^3/\text{s}$, y un nivel medio en Nueva Palmira de 1.08m (referido al cero local), se obtiene que la

altura en Paysandú corresponde a aproximadamente un nivel de 2m respecto el cero local y en Fray Bentos a unos 1.5m respecto a su cero local (2.05m respecto al cero Wharton). Además se observa que para estos valores de caudal y nivel en Nueva Palmira, un aumento de 1 metro en éste, corresponde a un incremento de 0.50m en la altura en Paysandú, y un orden de 0.80m en Fray Bentos.

FIGURA 2.2: Ábaco de niveles para Paysandú para diferentes caudales de la Represa (Fuente: CARU, 2003a)



Como resultado primario se extrae la gran influencia que ejerce la condición de aguas abajo sobre los niveles del río, visualizándose que dicha influencia incluso puede alcanzar la ciudad de Paysandú, variando desde 50cms para caudales mínimos, hasta pocos centímetros para caudales extremos.

También del lado argentino, desde hace casi dos décadas el GECRU ha invertido esfuerzos en un proyecto de investigación que concierne la contaminación del río Uruguay, cuyos objetivos principales son analizar el impacto transfronterizo de la contaminación bacteriológica en tramos del río Uruguay e identificar posibles impactos de contaminación en puntos de tomas de agua de centros poblados, en el curso y márgenes del río, y especialmente en balnearios. Hacia finales de los '90 fue culminado y puesto en operación un sistema de predicción de niveles mediante la implementación y calibración del modelo MIKE11 entre Concordia y Nueva Palmira, y a lo largo de los años, se le han efectuado

mejoras, y se han ido obteniendo varios subproductos en cuanto a la hidrodinámica e hidráulica ambiental del río Uruguay. A continuación se presentan los trabajos que fueron facilitados por el Lic. Julio Cardini, quien pertenece al GEGRU, acompañados de una breve descripción:

- (A) Caso pronóstico de niveles del río Uruguay (Cardini et al., 2004a): Conciérne la implementación de un modelo unidimensional desde Concordia hasta Martín García, incluyendo el aporte del Río Paraná. Dicho modelo se calibra por medio del parámetro coeficiente de rugosidad Manning, e imponiendo condiciones de viento (campo homogéneo) que se consideran de gran importancia ante escenario de caudales bajos. Los datos de viento se obtienen a partir de registros, a partir de los cuales se determina la tensión de corte corregida por un coeficiente de ajuste topográfico, a modo que los valores de vientos sean representativos para todo el río. Si bien se entiende que el modelo predice adecuadamente los niveles para el uso indicado, se advierte un alto desvío en Concordia debido a la gran variabilidad horaria de la descarga de la Represa Salto Grande en condiciones de caudales bajos, mientras que el desvío en Martín García es causado por efectos meteorológicos en el Río de la Plata. Asimismo, a partir de la comparación entre niveles simulados y registrados, se aprecia que la imposición del efecto del viento generalmente mejora la representación ante picos y valles, exceptuando situaciones donde ocurre variaciones de nivel muy rápidas y también algunos períodos cortos, lo cual puede atribuirse a considerar un campo constante y no variable de vientos. De interés resultan tiempos de tránsito y afectaciones en niveles estimados para Boca Gualeguaychú y Concepción del Uruguay para perturbaciones de niveles en Concordia como de Nueva Palmira. Considerando condiciones de estiaje, una perturbación en Nueva Palmira de un metro repercute en aumentos de 30cms, demorando 12 horas para alcanzar Boca Gualeguaychú y 18 horas para alcanzar Concepción del Uruguay. Las afectaciones de niveles en ambos puntos son de menor magnitud al establecer aumentos de niveles en Concordia: una perturbación de un metro en esta ciudad, se traduce en incrementos de 5cm en Concepción del Uruguay y de 2cm en Boca Gualeguaychú, tomando 12 y 28 horas respectivamente. Los valores de las alteraciones en los niveles pueden variar de acuerdo a la magnitud de los incrementos de niveles en Concordia, y según la franja de niveles en la que se encuentren.
- (B) Impactos y contaminación transfronteriza tramos Salto-Concordia y Colón-Concepción del Uruguay (Cardini y Zabalett, 2006, Cardini et al., 2004b, 2007a, Zabalett et al., 2009a,b): Se implementa un modelo hidrodinámico bidimensional en el tramo del río Uruguay comprendido entre las ciudades argentinas Colón y Concepción del Uruguay, utilizando el software RMA2 (del USACE), el cual permite simular flujos

a superficie libre, con movimiento esencialmente horizontal, calcular las velocidades medias (promediadas en la dirección vertical) del flujo y los niveles de agua mediante el método de elementos finitos. Para simular el transporte de coliformes fecales se aplica el modelo RMA4 del USACE para resolver la Ecuación de Advección - Dispersión Bidimensional, con el agregado de una tasa de decaimiento de primer orden. La dificultad radica en calibrar los coeficientes de dispersión adimensional longitudinal y transversal del flujo y ajustar la estimación de las descargas cloacales de Colón y Paysandú, lo que se busca al ajustar el modelo a mediciones de concentraciones de coliformes fecales en el tramo comprendido entre ambas ciudades. Se concluye que los coeficientes de dispersión adimensional transversal que deben aplicarse son bajos, resultando en una pluma de contaminantes que se mantiene recostada sobre la costa argentina. Ello implica que las plumas de contaminación de las descargas cloacales de Colón y de Paysandú no se mezclan a la altura de Concepción del Uruguay, resultando que la significativa y fluctuante contaminación registrada en un balneario ubicado aguas arriba de dicha ciudad es causada por descargas en la margen argentina (Cardini et al., 2004b). Cardini y Zabalett (2006) determinan que los bajos coeficientes de dispersión adimensional transversal y longitudinal se encuentran en el orden de los valores propuestos por Rutherford (1994) para cursos meandrosos (D_t de $0.01\text{m}^2/\text{s}$ y D_l de $0.4\text{m}^2/\text{s}$ para caudales bajos de $1300\text{m}^3/\text{s}$). Esto último se confirma con el modelo alternativo MIKE21 ya que el RMA4 presenta inestabilidad en condiciones de caudales bajos. Con esto muestran que en la zona central del río las concentraciones son bajas y que los gradientes laterales hacia las márgenes son importantes. Luego de efectuar nuevas campañas de muestreo, se extiende el dominio de modelación para analizar la contaminación transfronteriza entre Concordia y Salto (Cardini et al., 2007a, Zabalett et al., 2009a). Se ratifica el bajo valor de los coeficientes de dispersión al utilizar los datos de corridas de flotadores efectuadas en diversas oportunidades, bajo condiciones de estiaje, aguas medias altas y crecida extraordinaria. Asimismo, se detecta que si bien las descargas de ambas ciudades no se mezclan a esa altura del río, parte de la contaminación en Colón (ubicada 80km aguas abajo) es ocasionada por ambas plumas de descargas, implicando que a esa distancia sí se ha efectuado una mezcla. Como resultado clave de análisis de sensibilidad de los coeficientes de dispersión y de decaimiento bacteriano, se obtiene que la determinación de los primeros, tanto en sentido longitudinal como transversal, es clave para conocer el transporte de contaminantes en el río Uruguay y la distribución en sentido transversal al flujo. En cambio, variaciones del coeficiente de decaimiento bacteriano en el área de estudio no muestra grandes alteraciones. Zabalett et al. (2009b) complementa lo anterior afirmando que los balnearios aledaños a la ciudad de Colón son afectados en primera instancia por la contaminación bacteriana proveniente del área de Salto-Concordia,

y luego por la descarga de una actividad industrial ubicada aguas arriba de Colón. En situaciones de caudales medios y bajos, la contaminación excede valores aceptables para la recreación.

- (C) Efecto de eventos de Sudestada en el río Guauguaychú (Cardini et al., 2007b): Debido a la detección de condiciones riesgosas para el uso recreativo de los balnearios de la ciudad homónima, se plantea el objetivo de determinar el transporte de contaminantes, originados por los efluentes domésticos de la ciudad de Guauguaychú, ante inversión de flujo en el río. Se implementa un modelo bidimensional análogamente a los casos anteriores, imponiendo la condición de borde inferior de niveles en el río Uruguay. Para que suceda la inversión, se consideran niveles elevados en este último y caudales bajos de escorrentía en el río Guauguaychú. Se verifica que los problemas detectados se han solucionado con la puesta en funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Efluentes Cloacales.

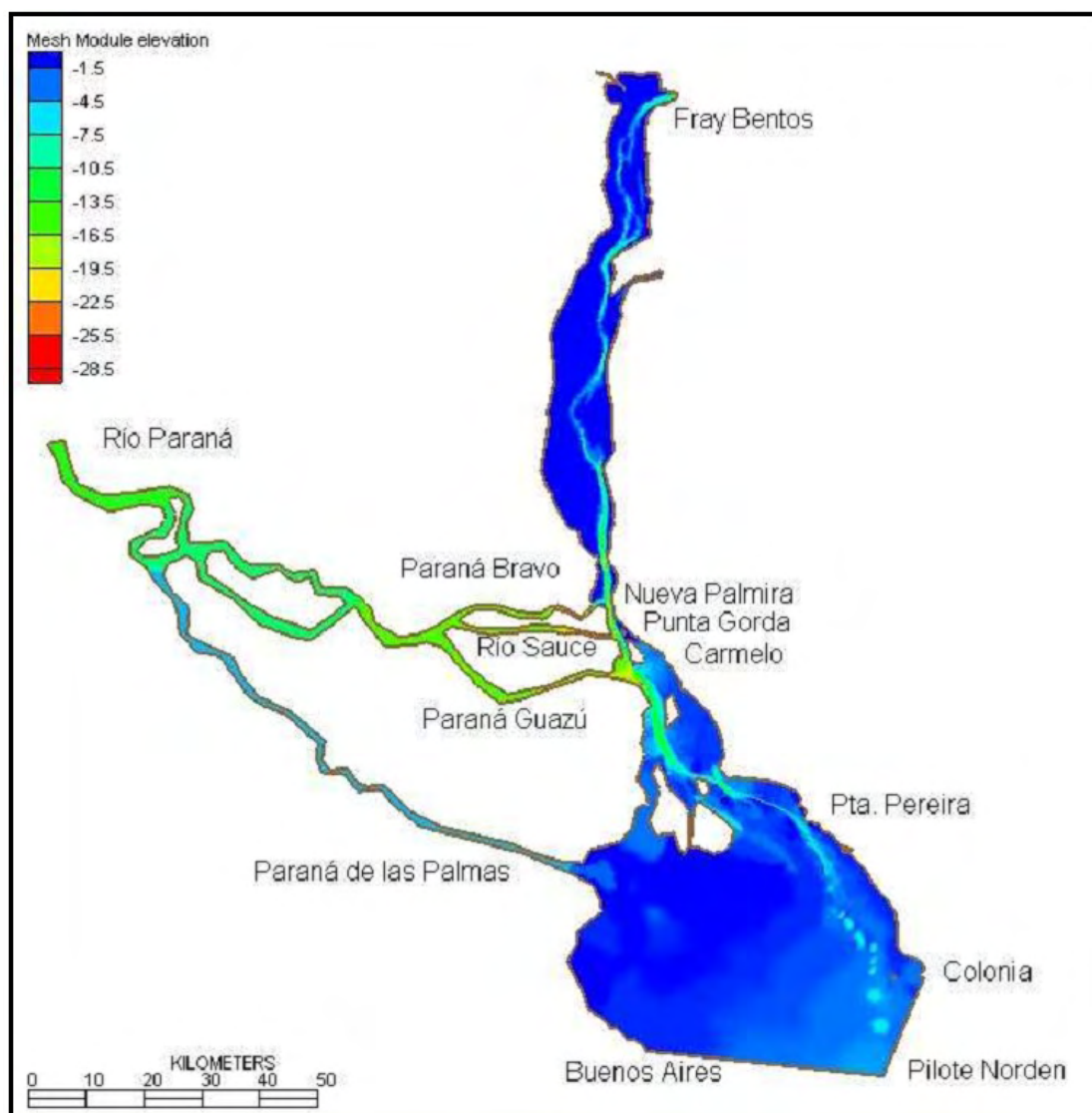
De acuerdo a los puntos recién presentados, el GECRU se ha alineado a la problemática ambiental del río Uruguay, focalizándose en el transporte de un parámetro ambiental bacteriológico (coliformes fecales) y con ello la cuantificación de la afectación de los balnearios debido a las descargas de efluentes domésticos en las márgenes del río. Asimismo, el último trabajo aquí expuesto, despierta las implicancias ambientales asociadas al fenómeno Sudestada a través del comportamiento del río Uruguay, y por ende, en su tributario río Guauguaychú, resultando en este último una inversión de flujo.

A diferencia del conjunto de análisis antes presentados, fue posible acceder a dos estudios técnicos que reúnen la evaluación de la performance ambiental de plantas de celulosa respecto a sus descargas líquidas en condiciones semejantes a las que pretende abordar esta tesis. Ambos fueron accedidos a través de los expedientes tramitados en DINAMA: Anexo III, “Emisiones Líquidas” del “Proyecto Fábrica de Celulosa y Energía Eléctrica e Instalaciones Portuarias, Punta Pereira, Colonia” (ENVIRO Consultores y EBA Estudios Ambientales, 2007), y “Modelación del comportamiento hidrodinámico del río Uruguay y la calidad de agua asociada al funcionamiento de las fábricas de celulosa ENCE y BOTNIA” (Algoritmos, 2006).

El primero concierne al estudio de Impacto Ambiental del proyecto de la Fábrica de Celulosa a que se preveía emplazar en Punta Pereira, departamento de Colonia. Este informe se vincula específicamente a la componente hidráulica-ambiental del estudio, de forma de analizar la situación actual y posibles afectaciones que podría implicar el emprendimiento, particularmente al proyecto portuario. El informe presenta básicamente los resultados de la aplicación del modelo hidrodinámico y de calidad de aguas, los que permiten estudiar la evolución espacial y temporal de la pluma de descarga del emisario

de la planta, y así determinar zonas en las cuales el proyecto puede generar algún nivel de impacto, además de analizar el transporte de sedimentos finos, posibles afectaciones del proyecto portuario sobre la hidrodinámica, sedimentos y línea de costa. El dominio de estudio se define por el conjunto del río Uruguay y Río de la Plata comprendido entre los límites de Fray Bentos, y la línea Colonia – Pilote Norden - Buenos Aires (representado en Figura 2.3), incluyendo también el tramo del río Paraná desde la ciudad de San Pedro (Argentina) hasta su desembocadura en el río Uruguay. Esto último tiene como objetivo incluir el ingreso del caudal del río Paraná, en sus tres brazos: Paraná Bravo en la zona de Nueva Palmira, río Sauce a la zona de Punta Gorda, y Paraná Guazú frente a Carmelo.

FIGURA 2.3: Dominio del modelo hidrodinámico (Fuente: ENVIRO Consultores y EBA Estudios Ambientales, 2007)



Se implementa un modelo hidrodinámico transitorio bidimensional (integrado en la vertical), en el que se plantean varios escenarios hidrológicos y de vientos, posibilitando estudiar y caracterizar el campo de velocidades y niveles en el dominio establecido, para cada uno de ellos. Se utiliza el modelo RMA-2, con el acople de RMA-11 para el transporte de sustancias y sedimentos. A modo de calibrar el primero, luego de imponer registros de vientos de la estación de Colonia, se realiza el ajuste de niveles con los registros asociados a Fray Bentos y Nueva Palmira, concordando el coeficiente de Manning (valor resultante 0.20 de igual orden que Lorenzo et al., 1998a). Con ello, se obtiene que el campo de velocidades es altamente variable con el tiempo, debido a las alteraciones rápidas inducidas por vientos y marea. Al contrario que en presencia de vientos suaves, frente a períodos de vientos fuertes las corrientes pueden verse modificadas, aunque manteniendo la dirección de las corrientes de marea. Detecta además eventos de inversión de flujo en Fray Bentos (y por lo tanto caudales negativos), con oscilaciones vinculadas a la propagación de ondas de marea y más rápidas respecto a las presentadas por los caudales erogados por Salto Grande. Ante condiciones de estiaje, estos eventos pueden extenderse hacia aguas arriba, inclusive alcanzando la ciudad de Paysandú.

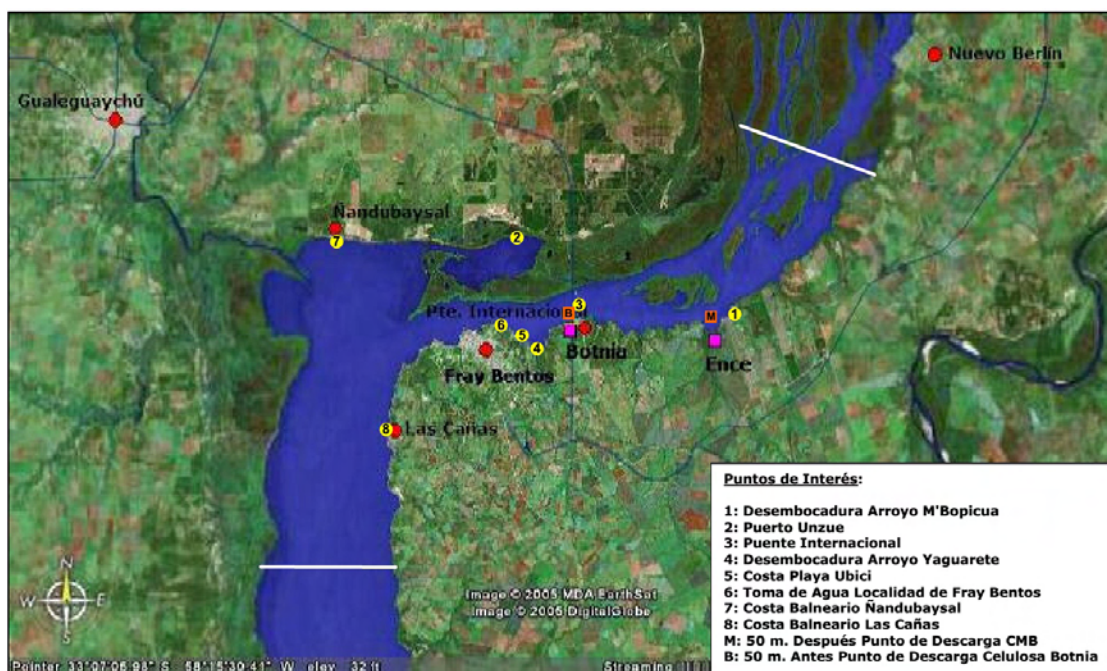
Posteriormente, se analiza la implicancia que conlleva la imposición de condición de borde con la atmósfera, estableciendo vientos de diversas direcciones y magnitudes. El fenómeno sudestada se representa al considerar un viento de dirección SE y módulo 21.4m/s, y es el que repercute en mayores alteraciones: ante caudales bajos y altos, en la zona aledaña a Punta Pereira, generando un incremento en las velocidades del canal y velocidades negativas sobre la margen uruguaya del río (según Figura 50, página 41 del documento), presentando como una “pared” que separa los dos sentidos de flujo contrapuestos que se dan en una misma sección. El caso de bajos caudales alude a valores de 9000m³/s para el río Paraná y 800m³/s para el río Uruguay, y el de altos caudales a valores de 31000m³/s y 11000m³/s para el río Paraná y Uruguay respectivamente.

Por último, adiciona al modelo la descarga de un trazador conservativo con el objetivo de determinar la óptima ubicación del punto de vertido, a ser resuelta por la ecuación dispersión-advección del modelo. Sin embargo, el informe no explicita ni los valores adoptados ni menciona la realización de ensayos de flotadores con el fin de calibrar los coeficientes de dispersión del modelo. A partir de diversas corridas con variaciones en la ubicación del punto de vertido del emisario de la planta, se selecciona la que produce menos afectaciones.

El segundo documento, Algoritmos (2006), analiza el transporte de las descargas de efluentes de las pasteras BOTNIA (hoy UPM) y ENSO (hoy Montes del Plata, ya emplazada en Conchillas) en el río Uruguay. Este último se preveía instalar contiguo al puerto M'Bopicuá.

A diferencia del caso anterior, el alcance del trabajo se focaliza en la zona adyacente a los proyectos, con únicamente la implementación de la descarga, pero esta vez se consideran 20 parámetros ambientales (DQO, DBO5, AOX, N, P, SST, entre otros) y no trazadores pasivos. Para ello se implementa un modelo bidimensional hidrodinámico y de transporte de contaminantes, acoplado al igual que el caso anterior el RMA-2 y RMA-11 (basado en las ecuaciones de transporte advección-difusión), pero en un dominio de sensiblemente menor extensión. En la Figura 2.4, es posible visualizar su extensión (limitada con líneas blancas transversales al río), así como los puntos de monitoreo seleccionados a analizar las concentraciones de los diferentes parámetros señalados como puntos en color amarillo.

FIGURA 2.4: Dominio y puntos de control de Algoritmos (2006) (Fuente: Algoritmos, 2006)



En el documento de referencia, se exhiben los resultados del modelo para diferentes escenarios considerados: caudal medio, caudal alto, de estiaje significativo y sudestada severa, determinando las concentraciones de los diferentes parámetros en cada uno de los puntos de control definidos, concluyendo que la implantación de ambas plantas no ocasionará efectos adversos.

A lo largo del estudio se presentan algunas hipótesis adoptadas: como estimación de niveles en la condición de borde inferior a partir de las mediciones en Fray Bentos, metodología de calibración, y verificación o análisis de coeficientes de viscosidad turbulenta frente a la conformación de la pluma del modelo respecto a la realidad. En el caso de los coeficientes de dispersión, adoptan valores de D_l de 0.50 y D_t de $0.10\text{m}^2/\text{s}$, establecidos

por experiencia previa de los autores. Al menos en el documento accedido, no se incluye la verificación de dichas hipótesis.

Además de los anteriores, también fueron accedidos a través de DINAMA, dos documentos que formaron parte del proceso de Autorización Ambiental Previa como informes adicionales del EIA de la planta UPM (BOTNIA, s.f.a,s). Seguidamente se efectúa una breve descripción de los mismos.

El primero se refiere a estudios de la pluma del emisario y estudios sedimentológicos, aunque aquí se describen solamente los primeros. Se trabaja con un modelo hidrodinámico del río Uruguay bidimensional integrado en la vertical, comprendiendo el tramo desde la represa Salto grande hasta unos 5km aguas abajo del balneario Las Cañas (19km de Fray Bentos). A partir del campo de velocidades calculado se estudia el transporte de una sustancia pasiva y las afectaciones en zonas de interés definidas, definiendo la ubicación y longitud del difusor de descarga. Se trabaja con el modelo RMA-2 para el componente hidrodinámico y con RMA-11 para el transporte de sustancias, así como CORMIX para el campo cercano.

Se efectúa la simulación de la hidrodinámica considerando diferentes situaciones de niveles en la frontera inferior (interpolada entre los niveles de Fray Bentos y Nueva Palmira) y caudales fluviales erogados por la Represa. Se considera el aporte del arroyo Yaguararé y río Gualeguaychú de 0.49 y 120m³/s respectivamente. Primeramente se calibra el coeficiente de Manning, resultando en valores de 0.03 y 0.025 para el tramo superior comprendido entre la Represa y Colón e inferior, comprendido entre Colón y la frontera inferior, respectivamente. El paso temporal del modelo es de 30 minutos. Como período de calibración se adopta enero de 1997, contando con caudales erogados entre aproximadamente 1000 y casi 6000m³/s, y niveles en Fray Bentos entre 1.2 y casi 2.5m respecto al cero Wharton. El período de validación seleccionado es febrero de 1997, comprendiendo aproximadamente un rango de caudales entre 3000 y 10000m³/s y niveles en Fray Bentos entre 1.5 y 3m respecto al cero Wharton.

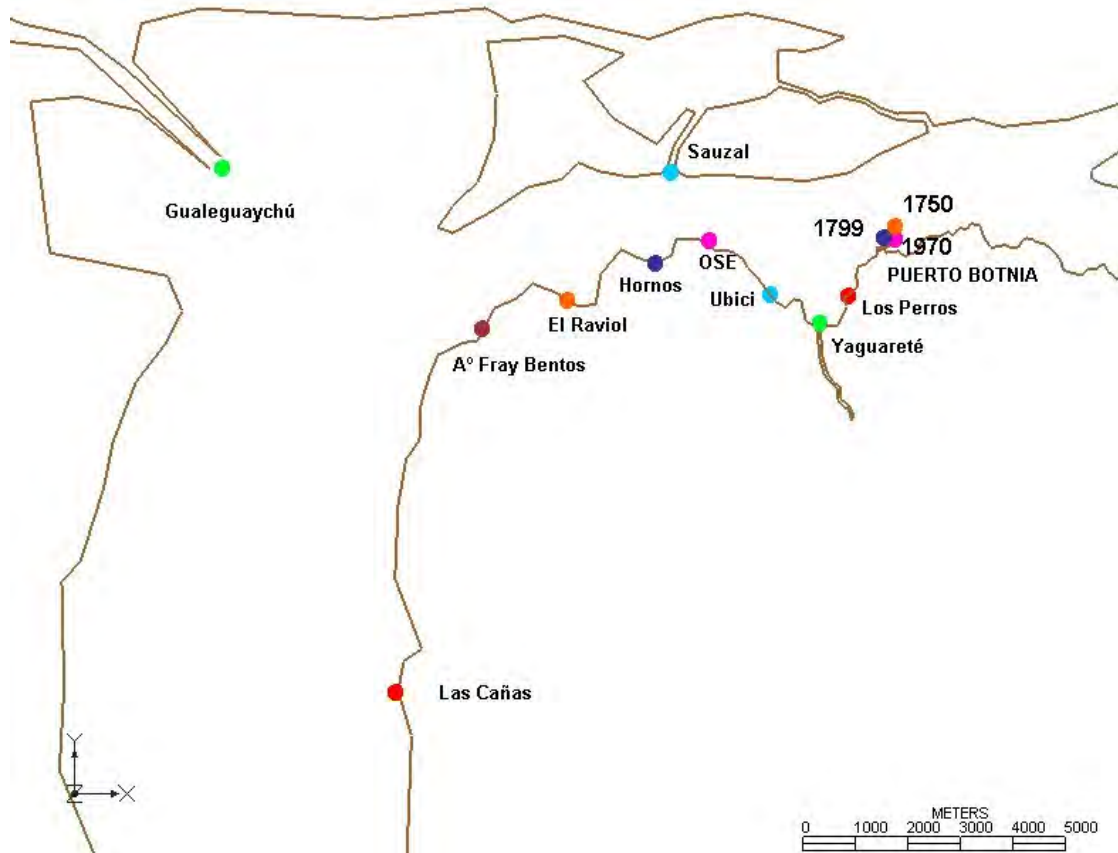
Se realizan dos series de simulaciones: una de tipo estacionario y otra dinámica. En cuanto a la primera serie, se seleccionan caudales entre 500 y 6000m³/s con un nivel en Fray Bentos de 1.35m respecto al cero Wharton. En cuanto a los segundos los períodos son enero 1997, enero 1999 y enero 2000, siendo este último la situación más conservativa.

Los coeficientes de difusión no son calibrados, sino que se adoptan valores utilizados en otro estudio, de 0.5 y 0.1 en las dirección x e y del modelo respectivamente.

Se seleccionan puntos de control en las zonas someras a ambos lados del canal principal (Figura 2.5): desembocadura de los arroyos Los Perros, Los Hornos, Fray Bentos y

Yaguareté y del río Gualaguaychú, playas Ubici y El Raviol, punto de toma de OSE para la ciudad de Fray Bentos, balneario Las Cañas, e isla Sauzal.

FIGURA 2.5: Puntos de interés de análisis de estudios BOTNIA (Fuente: BOTNIA, s.f.)



En condiciones estacionarias se observa que la pluma de la descarga se recuesta sobre la costa uruguaya, resultando la toma de OSE, Fray Bentos y Las Cañas como los puntos más afectados. Como se requiere tiempos muy prolongados para alcanzar la estacionalidad, se considera una situación poco realista. En condiciones dinámicas se obtienen mayores concentraciones en todas las estaciones, a excepción de las recién mencionadas. Esto se debe a que los eventos de inversión de flujo frecuentes en la zona, incrementan la mezcla transversal, aumentando la afectación en unos puntos más que en otros.

Los resultados muestran que en general las mayores concentraciones de trazador se obtienen para situaciones de menores caudales. La situación más desfavorable es en la desembocadura del arroyo Los Perros, mientras que los puntos sobre la costa argentina y la desembocadura del arroyo Yaguareté muestran niveles de afectación prácticamente nulos.

El segundo de los estudios concierne al comportamiento de la pluma del emisario proyectado ante diferentes escenarios hidrodinámicos. Se trabaja con el mismo modelo calibrado y validado del caso anterior. A partir del campo de velocidades calculado se estudia el transporte de una sustancia pasiva y las afectaciones en las zonas de interés definidas en el estudio descripto antes. Se diferencia del estudio anterior en que en éste se incluyen eventos hidrodinámicos de sudestada.

Se simulan eventos correspondientes a los años Enero 1999, Enero 2000, estos dos considerados como períodos de estiaje muy pronunciados, Mayo 2000 (sudestada con caudales mayores a los anteriores) y un evento de sudestada artificial conformado por los caudales del período Enero 2000 y niveles de Mayo 2000. Para el evento de Enero 2000 los caudales se encuentran entre 500 y 3600m³/s, y los niveles en Fray Bentos entre 0.8 y 2.6m respecto al cero Wharton.

En el estudio de los posibles impactos de la pluma del emisario, se analiza las posibles afectaciones a la zona costera en la zona de influencia del proyecto, para los diferentes eventos.

Se analiza los efectos del difusor en la dilución inicial, determinando concentraciones en los puntos de interés para diferentes configuraciones del mismo. Se concluye que los eventos de sudestada no generan condiciones más comprometidas que las resultantes del evento Enero 2000, y que este último representa la condición más crítica en cuanto a las concentraciones del trazador. La situación más crítica se presenta en la desembocadura del arroyo Los Perros para el evento Enero 2000.

2.5.3. Aplicaciones en ríos de la región

En las aplicaciones bidimensionales antes presentadas se opta por la utilización del software RMA de elementos finitos, por lo que optar por dicha herramienta podría ser una opción para el presente proyecto.

Sin embargo, se opta por ampliar el campo de búsqueda de antecedentes, efectuando un relevamiento de modelaciones numéricas hidrodinámicas y/o de transporte de contaminantes, en ríos de la región.

El primer caso hallado, es el realizado por el Instituto Nacional del Agua (Argentina), el cual se corresponde a un tramo del río Alto Paraná (Ré et al., 2009) de 2500 metros de longitud, ubicado próximo a la localidad de Puerto Esperanza, en la provincia de Misiones, Argentina. El tramo de estudio se caracteriza por disponer de una gran curvatura, donde se desarrollan corrientes secundarias. Se implementa el modelo hidrodinámico

3D MOHID y se compara con mediciones reales efectuadas, arrojando resultados muy satisfactorios.

El segundo, y tal vez, más vinculado hidrográficamente al río Uruguay es el Río de la Plata, cuya hidrodinámica y sedimentología ha sido objeto de estudio en varios proyectos de investigación a lo largo de los años (Prario et al., 2011), además de estudios vinculados a transporte de contaminantes (Fossati et al., 2013).

El IMFIA, particularmente, viene desarrollando desde hace varios años tareas de investigación y de modelación del Río de la Plata y su Frente Marítimo. En sí, el régimen de circulación del río se encuentra controlado, a través de varias escalas, por vientos, descargas de ríos, marea astronómica y meteorológica y batimetría (Fossati y Piedra-Cueva, 2013), lo que lo sitúa como un sistema complejo de abordar. Uno de los modelos más aplicados ha sido el RMA en sus diferentes módulos: RMA-2 (modelo hidrodinámico bidimensional integrado en la vertical), RMA-10 (modelo hidrodinámico baroclínico tridimensional), y el RMA-11 (modelo de transporte de sustancias). Buenos resultados se han obtenido en aplicaciones de estos modelos hidrodinámicos en su variante bidimensional: para analizar las circulaciones en el Río de la Plata (Piedra Cueva y Fossati, 2007), el comportamiento de la salinidad y su variación estacional (Fossati y Piedra-Cueva, 2003), entre otros. De especial interés son los resultados obtenidos en Piedra Cueva y Fossati (2007), los cuales incluyen escalas temporales de tiempos de residencia del Río de la Plata. Los autores utilizan el RMA-2 para analizar sus características hidrológicas y morfológicas obteniendo tiempos de residencia característicos en un rango entre 40 a 80 días debido a heterogeneidades en el dominio. Esta diversidad espacial en el tiempos de residencia en el Río de la Plata posteriormente es confirmado por Silva et al. (2013), observando que la orilla argentina presenta mayores valores que la margen uruguaya.

Desde principios del año 2006, se desencadena una línea de investigación desarrollada en el IMFIA con el objetivo de generar una herramienta numérica. Un modelo Pre-operacional del Río de la Plata-Río Uruguay se efectúa en el año 2008, con el fin de desarrollar una herramienta que pueda actuar como una ayuda para la navegación tanto fluvial como marítima (IMFIA, 2008). En el tramo del río Uruguay se implementa el modelo RMA-10 (modelo baroclínico hidrodinámico tridimensional), pero en cambio, en el tramo del río de la Plata y Frente Marítimo, se utiliza el software MOHID. Se aplica éste para estudiar la hidrodinámica del Río de la Plata utilizando la metodología de modelos encajados para aumentar la resolución (Barreto et al., 2009), debido a que el modelo de circulación debe contemplar diferentes escalas espaciales a modo de imponer las condiciones de borde de forma adecuada (Fernández et al., 2009). A pesar que el IMFIA ya cuenta con un amplio conocimiento de la herramienta RMA como ya fue comentado anteriormente, se prefirió aplicar el MOHID debido a las limitaciones

detectadas en cuanto a la representación de los procesos turbulentos, y el gran tiempo de cálculo computacional que requieren las simulaciones.

También aplicaciones del MOHID en el Río de la Plata han tenido otras utilidades. Un caso es la implementación de dicha herramienta con el objetivo de diseñar el vertido de los efluentes domésticos de la ciudad de Montevideo, una de las que yace en la margen uruguaya del río. Este es el caso de Fossati et al. (2013) en que se analizan diferentes alternativas contemplando variantes de configuraciones en cuanto a ubicaciones del emisario, longitudes y geometrías. Luego de obtener un modelo hidrodinámico tridimensional baroclínico calibrado, se procede al abordaje del análisis del transporte de partículas pasivas. Para ello consideran la emisión de contaminantes desde un enfoque Lagrangiano y se determina las características de la pluma de vertido. El MOHID cuenta con un módulo Lagrangiano, el cual utiliza ecuaciones de carácter randómico en donde la velocidad de la partícula es la suma de un término advectivo (del flujo) y un término turbulento, determinado a partir del primero (esto se presenta en más detalle en el Capítulo 6 Modelación de Contaminantes). Debido a no contar con datos de medidas reales, se considera inicialmente una intensidad de turbulencia del 20 %, comparando luego con los resultados de una intensidad de 40 %, siendo esta última la situación más exigente para el caso planteado.

Por otra parte, del lado argentino, también se han desarrollado líneas de investigación en cuanto a la hidrodinámica y fenómenos de transporte del Río de la Plata como son: Silva et al. (2013) utilizando el ELCOM (Estuary and Lake Computer Model), Kind (2004) utilizando el modelo tridimensional RPP-3D desarrollado por el autor y basado en el modelo POM (Princeton Ocean Model), Ré y Menéndez (2003) implementando el modelo cuasi-bidimensional HIDROBID II, basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas.

2.5.4. Selección del software

Si bien se ha mostrado varios softwares utilizados en ríos de la región para modelación matemática de cuerpos de agua, la selección del mismo se encuentra fuertemente vinculada a los objetivos que busca resolver el trabajo planteado.

En este sentido, se pretende implementar un modelo capaz de representar la compleja batimetría expuesta por el río Uruguay, así como también ser capaz de simular su hidrodinámica y transporte de sustancias en tiempos de simulación óptimos, de forma integrada o compatible con otros softwares de amplio uso y reconocidos.

Sin perjuicio de lo anterior, se considera importante la disponibilidad gratuita de dicha herramienta, a modo de posibilitar el traspaso del modelo a otras instituciones o grupos técnicos con interés de desarrollar nuevas líneas de investigación.

Referido a esto último, también se prefiere un modelo capaz de simular mallas tridimensionales. Si bien el presente trabajo se basa en una implementación 2D, sería deseable su mejora y adaptación a un modelo 3D.

Asimismo, se prioriza que la herramienta cuente con respaldo técnico continuo, con actualizaciones y mejora continuas, y con una amplia aplicación en problemas de diferentes características.

A partir de estas especificaciones, se selecciona el software MOHID, el cual está formulado con una aproximación de volúmenes finitos con coordenada vertical sigma o cartesiana u otras que permiten una buena simulación de los efectos topográficos (Serman & Asociados S.A, 2011). También tiene la capacidad de representar en forma muy estable condiciones complejas de flujo con llenado y vaciado de áreas de planicie (Barreto et al., 2009), lo que se considera muy importante para el caso del río Uruguay, como será expuesto más adelante. Sumado a lo anterior, es compatible con los conocimientos desarrollados en el IMFIA, lo que proporciona que el modelo aquí resultante sea fácilmente abordado para investigaciones a posteriori.

En este trabajo se utiliza el software MOHID STUDIO, el cual reúne varias aplicaciones del MOHID en una sola interfaz gráfica, siendo más amigable para el usuario desde el punto de vista de la visualización y manejo de datos.

2.6. Descripción del modelo

El MOHID (nombre que deriva de la abreviación de “Modelo HIDrodinámico”) es un sistema tridimensional de modelación numérica de cuerpos de agua y fue desarrollado por el equipo de profesionales de MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center, Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal). Si bien inicialmente fue creado como un modelo bidimensional destinado básicamente para estuarios y costas utilizando el método de diferencias finitas, a partir de ahí se comenzó un proceso continuo de mejora y ampliación de las capacidades del modelo, convirtiéndolo en uno tridimensional, utilizando el método de volúmenes finitos, ampliando las opciones de la coordenada vertical y acoplando modelos complementarios (modelo de transporte, lagrangiano, de calidad de aguas, entre otros).

El sistema de modelación MOHID actualmente adopta una filosofía integral, contemplando no solamente procesos (físico y biogeoquímico) sino también su aplicación a diferentes escalas físicas, con la posibilidad de aplicar modelos anidados, e inclusive diferentes escalas sistémicas (a escala de cuenca, cuerpo de agua o zona de estudio de éste, o redes de cuerpos de agua) (Braunschweig et al., 2003, 2004, Leitão et al., 2005). Cuenta con una filosofía de programación orientada a objetos (utilizando FORTRAN 95) (Braunschweig et al., 2004), y también con una estructura de módulos que se conectan entre sí a modo de intercambiar información.

La estructura del modelo antes descrita dio lugar a la construcción de lo que hoy existe como *Water Modeling System MOHID*, que es un conjunto de herramientas numéricas organizadas en tres centrales: MOHID Water, MOHID Land y MOHID Soil (Braunschweig et al., 2004). La primera es una versión mejorada de la versión original, la segunda es un modelo de cuenca hídrica, y la tercera es un modelo numérico que simula flujos en medios porosos. En este sentido, se cuenta con tres diferentes herramientas, cuya integración corresponde al ciclo del agua desde un enfoque sistémico.

MOHID Water entonces específicamente es un software de modelación de agua, que cuenta con una hidrodinámica robusta, un modelo de transporte que incluye transporte de sedimentos finos (Cancino y Neves, 1999), un modelo de calidad de aguas (Miranda, 1999, Pina, 2001, Portela, 1996, Saraiva et al., 2007), modelo ecológico (Mateus y Neves, 2008, Trancoso et al., 2005), modelo de dispersión de petróleo (Balseiro et al., 2003), modelo de trazador lagrangiano y modelo de descarga submarina lagrangiano-euleriano. Diversos trabajos de aplicación de MOHID se encuentran disponibles en MOHID Wiki.

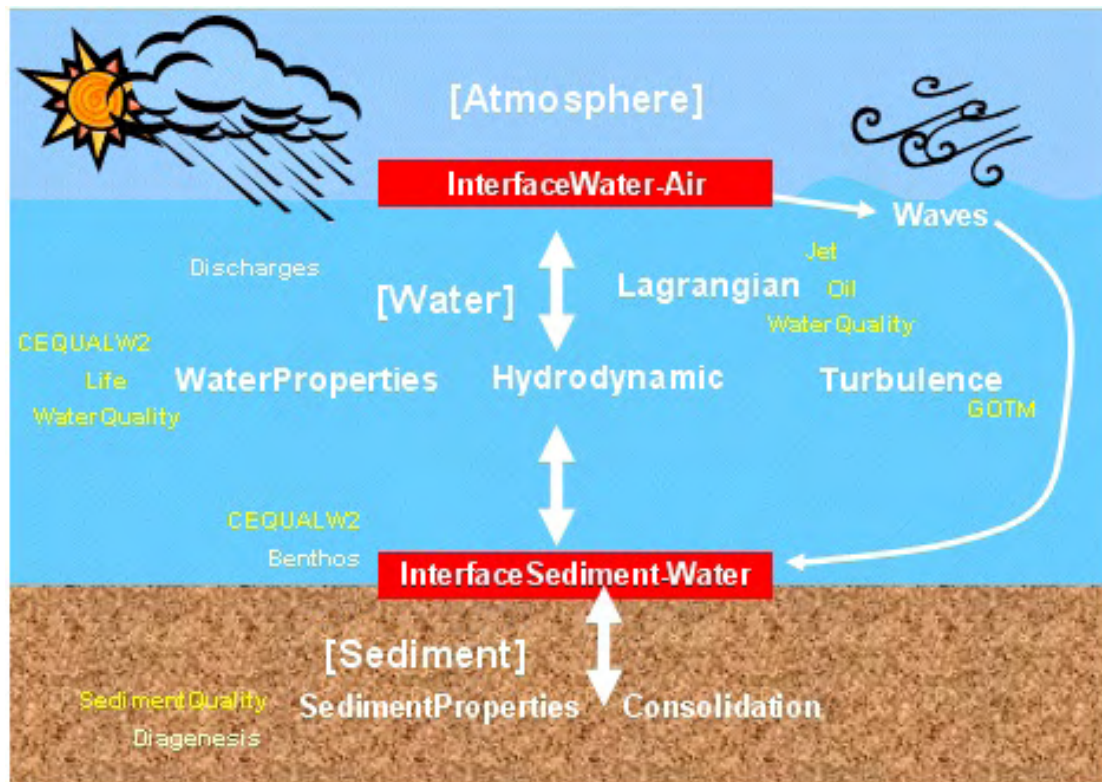
En la Figura 2.6 se esquematiza la estructura de MOHID Water y la interacción entre sus diferentes módulos.

Actualmente se cuenta con un foro técnico y página web wiki, lo que permite un continuo y rápido intercambio de experiencias a nivel mundial, así como también un mejor aprendizaje de las capacidades de MOHID.

2.6.1. Características generales

El modelo MOHID Water (a continuación se simplificará su mención por MOHID) es un modelo de flujo a superficie libre tridimensional baroclínico fundado sobre las ecuaciones de Navier-Stokes y con aproximación de Boussinesq e hidrostática. La malla tridimensional se configura con una aproximación de volúmenes finitos. Esta discretización permite que en cada una de los volúmenes (o celdas) se apliquen las ecuaciones macroscópicamente, lo que implica que la metodología de resolución de la ecuaciones sea independiente

FIGURA 2.6: Representación gráfica de MOHID (Fuente: MOHID Wiki)



de la geometría del volumen en donde las mismas son aplicadas, permitiendo el uso de una coordenada vertical genérica (Martins, 2000). Dentro de ésta, se puede considerar coordenada vertical sigma y/o cartesiana u otras que permiten una buena simulación de los efectos topográficos e inclusive de batimetrías muy irregulares (Martins, 2000).

En cuanto a la discretización temporal, se utiliza una grilla desfasada de tipo implícita ADI (Alternate Direction Implicit), minimizando problemas de estabilidad que ocurren en métodos explícitos y obteniendo una resolución más simple por matrices tridiagonales en el cálculo de la elevación de la superficie libre y velocidades horizontales. El término de la fuerza de Coriolis y el transporte horizontal se resuelven explícitamente, mientras que el modelo manipula un algoritmo implícito para resolver los términos de presión y el transporte vertical. Las ecuaciones son discretizadas horizontalmente en una grilla de tipo Arakawa-C.

El MOHID ha sido aplicado con éxito en varias zonas costeras y estuarios demostrando una gran capacidad para simular flujos con comportamientos complejos y de escalas variadas por su encare integral (Martins, 2000, Montero, 1999). Ha sido utilizado para casos de estudio de lagos (Malhadas et al., 2009a,b, 2010), ríos y estuarios (Vaz et al., 2007, 2009), regiones oceánicas con influencia de descargas de cuerpos fluviales (Marin y Campuzano, 2008) y dominios oceánicos regionales (Leitão et al., 2005).

En su versión actual el MOHID cuenta con más de 40 módulos, siendo los principales el módulo hidrodinámico, el de geometría, el de propiedades del agua, el módulo turbulencia, lagrangiano, calidad de agua, descarga, atmósfera, interfaz agua-fondo y agua-atmósfera. Los recién mencionados se describen en la Tabla 2.1 (Malhadas, 2008, MARETEC, 2003).

TABLA 2.1: Módulos del modelo MOHID

Nombre del Módulo	Descripción del Módulo
Model	Controla el flujo de información entre el módulo hidrodinámica y los módulos de transporte ; también la comunicación en modelos encajados
Hydrodynamic	Módulo hidrodinámico baroclínico 3D: calcula el nivel, las velocidades y los flujos de agua de cuerpos de agua a superficie libre
Water Properties (Eulerian Transport)	Módulo de transporte euleriano: controla la evaluación de las propiedades del agua (temperatura, salinidad, oxígeno, etc.)
Lagrangian	Módulo de transporte lagrangiano: controla la evolución de las mismas propiedades que el módulo de propiedades de agua usando una aproximación lagrangeana
Turbulence	Modelo de turbulencia: calcula los coeficientes de viscosidad horizontal y vertical y las difusividades para diferentes métodos de cierre de turbulencia
Geometry	Módulo en el que se define las características de la malla en la dirección vertical. Guarda y actualiza la información de los volúmenes de las celdas
Atmosphere	Módulo que contiene las condiciones atmosféricas
InterfaceWaterAir	Interacciones entre atmósfera y la columna de agua (tensiones de corte y flujos)
InterfaceSedimentWater	Condiciones de borde en el fondo de la columna de agua
Discharges	Descargas de flujos de agua originados por actividades antropogénicas, o como flujos de ríos

Además de los atributos positivos de MOHID mencionados anteriormente, también es capaz de reproducir modelos encajados con un enfoque en una dirección denominado “*downscaling*”: sucede que se dispone de un dominio de mayor escala (denominado “*padre*”) y otro de menor escala (“*hijo*”), usualmente este último de mayor resolución e inserto en el anterior. Todo modelo puede tener uno o más modelos hijos, los cuales, a su vez pueden tener uno o más modelos hijos, pero la configuración final dependerá de la

capacidad de cálculo que disponga el computador. El modelo mayor se ejecuta de forma independiente del menor, siendo los resultados obtenidos insumo para las condiciones de borde y el interior del dominio hijo. Por ende, al trabajar con modelos anidados las comunicaciones entre modelos se hacen en una sola vía y de forma recursiva.

2.6.2. Ecuaciones gobernantes

Se presenta un breve resumen de las características del modelo MOHID en cuanto a su modelo numérico, focalizándose en las aplicaciones del modelo al caso en estudio. La información presentada en la extensión del presente subcapítulo se recopila principalmente de documentos libres que presentan una detallada descripción de las características y capacidades del modelo (Leitão, 2002, MARETEC, 2003, Martins, 2000, Montero, 1999). Se advierte que la información aquí presentada es un breve resumen de MOHID; información más detallada puede encontrarse en los documentos recién mencionados, además de Braunschweig et al. (2004), Coelho et al. (2001), Villareal (2000), y otros trabajos como son Barreto et al. (2009, 2011), Santoro (2013).

2.6.2.1. Hidrodinámica

El modelo MOHID resuelve las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y conservación de masa para fluido incompresible. Se asume como válido el equilibrio hidrostático y se utilizan las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds. La primera hipótesis se efectúa debido a las grandes escalas horizontales generalmente existentes en el océano respecto a las verticales, por lo que se puede considerar que las aceleraciones verticales son pequeñas respecto a los otros términos que intervienen en la ecuación de momento en la dirección vertical. Esta ecuación queda reducida al balance hidrostático de las fuerzas. La segunda aproximación, consiste en considerar que las aceleraciones del flujo son menores que las de la gravedad y por tanto las variaciones de la densidad sólo son importantes cuando afectan a los términos gravitatorios y no a los términos de inercia. La aproximación de Reynolds consiste en descomponer las magnitudes en valores medios y fluctuantes.

Las ecuaciones de cantidad de movimiento para las velocidades horizontales del flujo medio en coordenadas cartesianas se presentan en las Ecuaciones 2.2 y 2.3. Ellas expresan que la evolución temporal de las velocidades es igual al transporte advectivo, la fuerza de Coriolis, el gradiente de presiones y la difusión turbulenta. La ecuación homóloga asociada a la dirección vertical se corresponde con la Ecuación 2.4, en la que se expresa la aproximación hidrostática donde g es la gravedad y ρ la densidad:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{(\partial uu)}{\partial x} - \frac{(\partial uv)}{\partial y} - \frac{(\partial uw)}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left((\nu_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\nu_H + \nu) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\nu_t + \nu) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{(\partial vu)}{\partial x} - \frac{(\partial vv)}{\partial y} - \frac{(\partial vw)}{\partial z} + fu - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left((\nu_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\nu_H + \nu) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\nu_t + \nu) \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + gp = 0 \quad (2.4)$$

Donde u , v , w son las componentes del vector velocidad en la dirección x , y , z respectivamente, f es el parámetro de Coriolis, ν_H y ν_t son las viscosidades turbulentas en las direcciones horizontal y vertical, ν es la viscosidad cinemática turbulenta, ρ es la densidad y p es la presión.

Por su parte la densidad se determina en función de las variables salinidad y presión, según la ecuación de estado establecida por UNESCO (1981).

Además, se utiliza la ecuación 2.5 de continuidad para fluido incompresible, con la se calcula w a partir de la integración en la dirección vertical:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

2.6.2.2. Turbulencia

A modo de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes es necesario métodos para el cierre de turbulencia. Los procesos turbulentos se relacionan de forma proporcional al gradiente de velocidades, por medio de una viscosidad turbulenta.

En el plano horizontal la viscosidad se puede considerar constante, una función del gradiente de velocidades, proporcional a la profundidad y al cuadrado de la velocidad o utilizando la formulación de Smagorinsky⁸. Dicha fórmula es la presentada en la Ecuación 2.6.

⁸Según MOHID Wiki

$$\nu_H = k \cdot dx \cdot dy \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.6)$$

En cambio, en la dirección vertical se disponen de más opciones para el cálculo de la viscosidad turbulenta, variando desde parametrizaciones empíricas a modelos de una y dos ecuaciones. En este sentido, las opciones son un valor constante, Nihoul (1984), Leendertse y Liu (1978), Backhaus y Hainbucher (1987), Pacanowski y Philander (1981), y GOTM (General Ocean Turbulence Model, Burchard et al.). Este último es un modelo de columna de agua unidimensional que permite elegir entre varias parametrizaciones de la mezcla vertical turbulenta, enlazado a MOHID, conteniendo el modelo $k - \epsilon$ y el modelo de cierre de segundo orden Mellor-Yamada.

A partir de las viscosidades turbulentas horizontales y verticales y un factor de proporcionalidad, el Número de Schmidt, se determinan los coeficientes horizontales y verticales de difusividad.

2.6.2.3. Transporte

Las ecuaciones de transporte euleriano son utilizadas para determinar la evolución de propiedades del agua en la columna de agua. Dada una propiedad (P) y coeficiente de difusión turbulenta (k_Θ) (horizontal/vertical), las ecuaciones diferenciales 3D en un sistema cartesiano ($x_j = x, y, z$) contienen una serie de procesos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{(\partial P)}{\partial t} + u_j \frac{(\partial P)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_\Theta \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) + (fuentes - salidas) \quad (2.7)$$

Salidas y fuentes se asocian con reacciones químicas y procesos biológicos, así como condiciones de frontera (atmósfera), intercambio entre columna de agua y fondo, y descargas puntuales (descargas de ríos).

La temperatura y salinidad pueden adoptar valores constantes o cambiar a lo largo del tiempo debido al efecto de transporte de descargas puntuales, de flujos con las condiciones de borde abiertas, y por efecto de la atmósfera por medio de intercambios de calor en el caso de la temperatura (radiación solar, radiación infrarroja, calor latente y sensible) e intercambios de masa en el caso de la salinidad (evaporación y/o precipitación).

2.6.3. Discretización de las ecuaciones

2.6.3.1. Discretización espacial

MOHID utiliza la aproximación de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones de movimiento. En esta aproximación se aplica la forma integral de las ecuaciones gobernantes en un volumen de control denominado celda. De forma individual la ecuación de conservación para una propiedad U_j con una fuente Q en un volumen de control Ω_j se escribe según la Ecuación 2.8:

$$\frac{\partial(U_j\Omega_j)}{\partial t} + \sum_{caras} \vec{F}_m \vec{n} S_m = Q_j\Omega_j \quad (2.8)$$

, donde F representa los flujos del escalar a través de la superficie frontera del volumen considerado (caras) y n la normal exterior de la superficie.

Esto trae consigo que solamente sean necesarios los flujos a través de las celdas, siendo el procedimiento para resolver las ecuaciones, independiente de la geometría de la celda. Como el volumen puede variar a lo largo de la simulación, la geometría se actualiza en cada paso de tiempo luego de calcular las variables físicas. Además las coordenadas espaciales son independientes y cualquier geometría puede elegirse para cada dimensión.

El dominio de estudio puede representarse en varios tipos de sistemas de coordenadas, siendo las más utilizadas las proyecciones métricas y coordenadas geográficas. E independientemente del sistema elegido, la discretización horizontal y vertical puede enmarcarse en diferentes esquemas. Los tipos de grillas en el plano horizontal son mallas rectangulares (regulares o con paso variable) o curvilíneas. En la dirección vertical MOHID ofrece diferentes opciones: sigma, cartesianas, lagrangianas, con espaciamiento fijo y armónicas.

Con una malla desfasada del tipo Arakawa C, el MOHID computa las velocidades horizontales en el centro de las caras verticales de la celda de cálculo, mientras que la elevación y las magnitudes turbulentas, así como también las propiedades de estado del fluido (temperatura, salinidad) se determinan en el centro de la misma. De forma análoga, en la dirección vertical, la velocidad y las magnitudes turbulentas se determinan por medio de una grilla desfasada en las caras superior e inferior de la celda.

2.6.3.2. Discretización temporal

Los términos que limitan la estabilidad de las ecuaciones del modelo son la presión barotrópica (asociada a celeridad de ondas gravíticas), la rugosidad del fondo y la difusión vertical (Leitão, 2002).

En el modelo MOHID, la discretización temporal de las ecuaciones presentadas anteriormente, discretizadas en cada una de las celdas de cálculo, se realiza por el algoritmo semi-implícito ADI (Alternate Direction Implicit). El sistema de ecuaciones resultante de este algoritmo, a diferencia de uno totalmente implícito, es tridiagonal pudiendo ser resuelto de forma más eficiente. Este algoritmo calcula en cada iteración, de forma alternada, una de las componentes de la velocidad horizontal de forma implícita mientras que la otra se calcula explícita. MOHID contiene dos diferentes esquemas posibles para la discretización temporal y determinar la elevación de la superficie libre: Leendertse y S21, difiriendo en la cantidad y el sistema de ecuaciones a resolver. En la dirección vertical, los términos implícitos son la rugosidad y la presión barotrópica y la velocidad se determina explícitamente (Leitão, 2002).

2.6.4. Condiciones iniciales y de borde

Para la resolución del sistema de ecuaciones del modelo es necesaria la especificación de las condiciones iniciales y de frontera (Montero, 1999). Las ecuaciones para el cálculo de la elevación de la superficie libre, de la velocidad y del transporte de salinidad y temperatura forman un sistema, el cual necesita condiciones iniciales en todo el dominio y condiciones de borde durante toda la simulación, para poder resolverse (IMFIA, 2008).

2.6.4.1. Condiciones iniciales

La condición inicial usualmente se considera el reposo, con una elevación inicial constante especificada para todo el dominio. Esta condición inicial, al ser irreal ya que los cuerpos de agua presentan movimientos continuos, hace necesario que al comienzo de una simulación el modelo requiera un cierto tiempo de relajación (*spin up*), en el cual la velocidad y la elevación adquieran un régimen normal.

Para las propiedades del agua como salinidad o temperatura sucede algo similar y se imponen en general valores uniformes en todo el dominio como condición inicial.

2.6.4.2. Condiciones de borde

Las condiciones de borde deben estar definidas tanto en las fronteras horizontales laterales que circunscriben al cuerpo de agua, como en el fondo del cauce y en la superficie.

En primer lugar, las condiciones de frontera lateral pueden ser abierta o cerrada. En el caso de esta última, los bordes laterales cerrados son los límites del dominio de cálculo

con la tierra en donde los flujos advectivos y difusivos de cantidad de movimiento, temperatura y salinidad son nulos. Los ríos o efluentes ingresados en fronteras cerradas, son definidos como descargas de flujo en la columna de agua, las cuales pueden contener propiedades hidrodinámicas (cantidad de movimiento) o de agua (temperatura, salinidad, materia suspendida, contaminantes, nutrientes, fitoplancton) (Bernardes, 2007).

La condición de frontera abierta es compleja de establecer adecuadamente para un caso determinado. Un extenso análisis en las opciones que dispone MOHID y sus características se presenta en Leitão (2002). Básicamente la bibliografía divide las condiciones en dos tipos: radiativas y de relajación. La primera permite la salida de las perturbaciones originadas en el dominio y la segunda concierne a la transmisión de información desde el exterior al modelo considerado, permitiendo la definición de coeficientes de relajación ponderando las soluciones internas y externas al modelo en cada celda. La condición de marea es un caso aplicable a este tipo de fronteras, en donde se impone niveles como condición y se calculan las velocidades y los caudales por continuidad a partir de la elevación. También deben especificarse los valores de salinidad y temperatura del agua que ingresa por estas fronteras.

Usualmente también existen fronteras móviles, zonas del dominio que se cubren y descubren con el tiempo, como por ejemplo zonas intermareales, en donde según el nivel de marea pueden encontrarse o no cubiertos por agua. Información más detallada puede encontrarse en Montero (1999) y Riflet (2010). Es necesario entonces definir una profundidad de celda, a partir de la cual la celda se considera con agua, y para niveles por debajo de dicho valor la celda se considera vacía imponiendo velocidad nula. Para la salinidad y la temperatura también se considera una profundidad mínima a partir de la cual se calculan sus valores, permaneciendo constantes por el contrario cuando la profundidad total de la célula sea menor que ésta. La elección adecuada de ambas profundidades mínimas de agua evitan inestabilidades numéricas, atenuando las perturbaciones numéricas introducidas con estas fronteras móviles causadas por la variación discontinua de las velocidades (Montero, 1999).

En el caso de la frontera con el fondo del río, sólo se tiene en cuenta el flujo de cantidad de movimiento, considerando nulos los flujos de calor y masa. Se considera el flujo difusivo de cantidad de movimiento de la cara inferior de las celdas del fondo, en donde se impone una tensión de corte, función de la velocidad de la celda de fondo por medio de ley cuadrática. Siendo C_f el coeficiente drag de fondo, κ la constante de von-Karman y z_o^b el tamaño de la rugosidad absoluta de fondo.

$$v \frac{\partial \vec{v}_H}{\partial z} = \overline{\tau_{fondo}} = C_f \vec{v}_H |\vec{v}_H| \quad (2.9)$$

$$C_f = \left(\frac{\kappa}{\log\left(\frac{z+z_o^b}{z_o^b}\right)} \right)^2 \quad (2.10)$$

Al igual que en la condición de fondo, en la superficie del agua, denominada usualmente como superficie libre, todos los flujos advectivos son considerados nulos, además de los flujos difusivos de temperatura y salinidad, a diferencia del flujo difusivo de *cantidad de movimiento* que se impone por medio de la tensión de viento en la superficie. Esta se calcula con la Ecuación 2.11; siendo C_D el coeficiente de drag función de la velocidad del viento, ρ_a es la densidad del aire al nivel de la superficie del agua y W es la intensidad del viento a 10m sobre la superficie libre.

$$v \frac{\partial \vec{v}_H}{\partial z} = \vec{\tau}_W = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}| \quad (2.11)$$

Para la especificación de los flujos de calor y masa en la superficie se utilizan dos tipos de metodología diferentes o una combinación de ambas (Montero, 1999). La primera metodología consiste en el cálculo directo de estos flujos, teniendo en cuenta los fenómenos que contribuyen a la transferencia de estas cantidades en la interface atmósfera-agua (radiación, presión atmosférica, evaporación, etc.). La segunda metodología concierne a la técnica de relajación a valores climatológicos conocidos, permitiendo atenuar dificultades provenientes de la falta de precisión en los valores que son necesarios suministrar a las fórmulas (Montero, 1999).

2.6.5. Trazadores lagrangeanos

Los contaminantes considerados en la columna de agua pueden ser simulados con un enfoque de trazadores lagrangeanos, cuya gran ventaja es que es aplicable donde ocurren grandes gradientes evitando problemas de difusión numérica que caracteriza a los modelos de transporte euleriano (Malhadas, 2008). Dicha difusión se encuentra asociada al término advectivo de la ecuación de transporte de sustancias (Leitão, 2002).

El movimiento de los trazadores puede ser configurado, según las preferencias del investigador. Es posible considerar las variables de campo de velocidades, el viento, dispersión de petróleo, velocidad randómica o también puede ser configurado para asociarse a transporte de sedimentos incluyendo velocidad de sedimentación (IST, 2009).

Las características de este módulo lo posicionan como una herramienta para determinar tiempos de residencia zonales o del dominio, tiempos de tránsito y escalas temporales de renovación de flujo (Braunschweig et al., 2003, IST, 2009).

Al trazador se le puede asignar diferentes características: coordenadas espaciales, masa, volumen, coeficiente de decaimiento, tiempo de decaimiento; y su descarga es posible de hacer por diversas formas: puntual, en boxes, lineal (fuentes difusas), y en cuanto a duración, puede ser temporal o instantánea.

Asimismo, es posible establecer boxes de monitoreo, en donde se obtiene las concentraciones del trazador a lo largo del tiempo.

La metodología de determinar el desplazamiento de la partícula lagrangiana viene dada por la Ecuación 2.12, resuelta explícitamente.

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \Delta t u_i^{t+\Delta t} \quad (2.12)$$

Siendo la variable x el desplazamiento según la dirección x , u la velocidad y Δt el paso temporal. La velocidad consiste de una velocidad media determinada por las velocidades advectivas del flujo (Ecuación 2.13, donde u_x y $u_x + d_x$ son calculadas con un modelo hidrodinámico en las caras del volumen considerado con un paso espacial dx), a la cual se le puede adicionar un término aleatorio debido a la turbulencia.

$$u_m = \frac{u_x dx_2 + u_{x+dx} dx_1}{dx_1 + dx_2} \quad (2.13)$$

El término aleatorio de velocidad se formula según el procedimiento abordado por Sullivan (1971) y por Allen (1982). Consiste en que esta velocidad puede ser descompuesta en un término proporcional al advectivo y una constante. Por medio de esta formulación se considera que la trayectoria de los trazadores es afectada por los vórtices de tamaño mayor a ellos, y que en cambio, los vórtices de menor tamaño que los trazadores provocan la mezcla incrementando el volumen de la mezcla y disminuyendo la concentración (Leitão, 2002).

El desplazamiento randómico se determina utilizando la longitud de mezcla y la desviación estándar de la componente de velocidad turbulenta. Las partículas disponen esa velocidad durante el tiempo necesario para desarrollar el movimiento randómico, la cual depende de la longitud de mezcla turbulenta de forma local (MARETEC, 2003).

El módulo lagrangeano es presentado en más detalle en el capítulo 6.

Capítulo 3

Análisis Hidrológico

3.1. Introducción

Este capítulo comprende el análisis de la información hidrológica accedida y seguidamente la selección de los períodos temporales a ser establecidos como escenarios de interés para su análisis.

A nivel de Uruguay, junto con Argentina, existen varios organismos que llevan registros de datos hidrológicos en distintos puntos del río Uruguay: del lado uruguayo se cuenta con el SOHMA y DNH; del lado opuesto se cuenta con la DNVN, la Subsecretaría de Recursos Hídricos y el INA en menor medida; y en cuanto a organismos binacionales se cuenta con la CARU y la CTM.

De libre acceso son los datos de la “*Base de Datos Hidrológica Integrada*” de la Subsecretaría de Recursos Hídricos (Argentina) y también de la CARU, a través de su página web. Sin embargo, la base de datos ofrecidos por estas fuentes es poco densa e insuficiente para realizar algún análisis comparativo con otras fuentes, que pudiera arrojar resultados confiables.

La primera información hidrológica de base se obtuvo de la DNH, consistiendo en datos de escalas limnimétricas de las estaciones en Salto, Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, junto con datos de caudales también en Salto. Diferido en el tiempo, se accedió a información de caudales horarios erogados por la Represa Salto Grande. Este último, consiste en caudales horarios vertidos y turbinados por la Represa en el período temporal comprendido entre enero 1995 a julio 2012.

Disponibles ambos conjuntos de datos de caudales se efectuó una comparativa entre ellos, a modo de analizar su consistencia. Se complementó dicho análisis con la determinación

de valores de parámetros hidrológicos característicos y de comportamiento anual, lo que se compara con bibliografía consultada.

También se analizó la relación entre los niveles registrados en Salto y los caudales registrados en la Represa, con el objetivo de determinar una relación entre ambos. Seguidamente se analizó la correlación entre los datos de caudales y los datos de niveles registrados en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira.

Si bien en el presente capítulo se despliega una breve descripción de los datos y los resultados de los análisis antes mencionados, en el Anexo A se presenta en mayor detalle la metodología desarrollada, además de comparaciones de la información hidrológica con bibliografía consultada.

Ya verificada la validez de los datos hidrológicos, se los utilizó con el fin de seleccionar los períodos escenarios de caudales bajos, medios y altos. En cuanto a los escenarios de caudales extremos tanto altos como bajos, se procuró seleccionar las ventanas temporales que superan o se encuentran por debajo de umbrales establecidos. Dichos umbrales equivalen a caudales característicos mensuales hallados a partir de la información disponible.

El conjunto de ventanas temporales que cumplen las condiciones recién expuestas se restringe al vincularlas con eventos asociados con variabilidad climática, y una vez obtenido un conjunto más acotado de períodos se seleccionaron los períodos representativos de caudales altos y bajos a tomar como base para la simulación del modelo hidrodinámico.

Obtenidas las ventanas temporales que cumplen con los dos criterios presentados, se seleccionan tramos continuos que contengan buena densidad de información en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira.

Luego de definir los períodos de caudales medios, se solicitó información hidrológica de mejor resolución tanto a la DNH como a la DNVN. En el primer caso se obtuvieron datos horarios de niveles en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, y en el segundo, se accedió a registros diarios en Boca Gualeguaychú. A partir de la información recabada por ambas fuentes, se analiza las características de las series de niveles entre sí y su asimilación con la curva de registros de caudales.

Será frecuente encontrar la mención de las ciudades Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, representadas por Pdú, FB y NP respectivamente, a modo de alivianar la lectura. Boca Gualeguaychú se abrevia por BcaGchú.

3.2. Datos hidrológicos de base

Como fue anticipado anteriormente, la información hidrológica obtenida a partir de la DNH consistió en datos de escalas limnimétricas de las estaciones en Salto, Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, junto con datos de caudales también en Salto. La ubicación geográfica de las fuentes de información de las cuatro escalas corresponde a los puertos respectivos de cada ciudad, y su relación con la escala Wharton es la presentada en la Tabla 3.1.

TABLA 3.1: Relación entre ceros locales y cero Wharton

Escala de DNH	Ubicación del puerto	Elevación de ceros de escala en metros (respecto a Wharton)
Salto	(407103.00 m E, 6527134.00 m S)	2.01
Paysandú	(396025.00 m E, 6424181.00 m S)	1.02
Fray Bentos	(377445.00 m E, 6335655.00 m S)	0.55
Nueva Palmira	(368608.00 m E, 6250633.00 m S)	0.72

Los datos de niveles son diarios, obtenidos a partir de 3 o 4 lecturas diarias, o una lectura por hora, en función de la época y la estación. Dicha serie histórica se encuentra delimitada por los años 1983 y 2011, período iniciado a partir de la puesta en operación de la Represa Salto Grande.

Los datos de caudal diarios son determinados a partir de una ecuación empírica de aforo que correlaciona los caudales con los niveles registrados en el puerto de Salto, de acuerdo a las Ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$Q = 0,156(H + 8,11)^{3,391} \text{ para } -0,99 \leq H \leq -0,38 \quad (3.1)$$

$$Q = 229,83501(H + 1,19)^{1,717} \text{ para } -0,38 \leq H \leq 11,81 \quad (3.2)$$

A partir de la serie de datos diarios de niveles registrados se analiza en primer lugar la densidad de puntos en la misma. Esto arroja los siguientes valores de cantidad de datos que se disponen de la serie temporal comprendida desde 1983 hasta mediados o fines del 2011, según se muestra en la Tabla 3.2.

A modo de analizar la validez de la información de DNH, se compara los datos de caudales y niveles en Salto con los datos de caudales brindados por CTM, resultando una muy buena correlación entre ambas series. Sin embargo, eliminando los datos del año 2011 se mejora la correlación. Esto resulta en que en la sección del río a la altura

TABLA 3.2: Densidad de registros en serie de niveles brindados por DNH

	Período	Densidad
Salto	01/01/1983 26/07/2011	96 %
Paysandú	01/01/1983 31/12/2011	93 %
Fray Bentos	01/01/1983 31/12/2011	98 %
Nueva Palmira	01/01/1983 31/12/2011	89 %

de Salto existe una relación biunívoca entre los niveles y los caudales erogados por la Represa. Esto se presenta en mayor detalle en el Anexo A.

En segundo lugar, también con el fin de efectuar un análisis de validez, aunque más cualitativo, se determina la curva media anual de caudales de la serie y se la compara con bibliografía sobre el tema. Se obtienen resultados satisfactorios.

En cuanto a las series de niveles de las otras ciudades (Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira), se observa la existencia de bucles por el efecto de las ondas de crecida. También es posible visualizar el efecto de marea, el cual ocasionalmente puede alcanzar la ciudad de Paysandú. Esto significa que a pesar que se está tratando de datos diarios, lo que podría acentuarse si se tratase de datos horarios, el efecto de marea es notable. Asimismo, debido a la importancia del efecto de marea del Río de la Plata traducido en los niveles de Nueva Palmira, en el Anexo A se presenta una breve descripción de las características hidrodinámicas del Río de la Plata.

Una vez validada la serie de caudales, se continúa con la determinación de los caudales característicos y luego con un análisis estadístico de la información hidrológica.

3.2.1. Caudales característicos

A partir de los datos diarios de la serie histórica comprendida entre enero de 1983 y diciembre de 2010 brindada por DNH (se excluyen los datos de 2011 por lo advertido antes), se obtienen valores de caudales mensuales y se obtienen los caudales característicos para ambas situaciones, como lo presenta la Tabla 3.3. El caudal mínimo absoluto es el que presenta la mayor desviación respecto a su homólogo valor mensual.

La Tabla 3.4 presenta valores de caudales definidos como bajo (percentil 75 de superación), medio y alto (percentil 25 de superación) de la serie de caudales.

Se complementa con una comparación con caudales característicos de bibliografía, lo que se expone en el Anexo A. Esto sumado a la consistencia demostrada ante los registros brindados por CTM, se concluye que la serie suministrada por la DNH de caudales es

TABLA 3.3: Caudales mensuales y diarios característicos

	Valores diarios (m ³ /s)	Valores mensuales (m ³ /s)
Caudal Mínimo Absoluto	193	500
Caudal Mínimo Característico (95 %)	729	908
Caudal Semipermanente (50 %)	4106	4489
Caudal Máximo Característico (5 %)	15911	15201
Caudal Máximo Absoluto	29750	22510

TABLA 3.4: Caudales mensuales característicos

	Valores mensuales (m ³ /s)
Caudal Bajo	2276
Caudal Medio	5699
Caudal Alto	7682

consistente y confiable, considerándose como buen pilar de base para realizar los estudios a posteriori.

3.2.2. Análisis Estadístico

A continuación se presentan en la Tabla 3.5 los estadísticos más relevantes para los datos diarios de caudales y niveles brindados por la DNH. Se aclara que los valores de niveles están referidos al cero Wharton.

TABLA 3.5: Principales estadísticos descriptivos de datos diarios

Estadística	Caudal Salto (m ³ /s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Mínimo	193	0.61	0.70	0.57
Máximo	29750	9.94	5.08	3.86
1° Cuartil	1795	2.06	1.63	1.48
Mediana	4159	2.83	1.99	1.73
3° Cuartil	8014	4.01	2.45	2.05
Media	5875	3.26	2.11	1.80

Para el caso de Nueva Palmira, la diferencia entre los valores extremos resulta en unos 3.2m con datos diarios, lo que podría resultar un tanto mayor si se hiciera el mismo análisis con datos horarios debido a la frecuencia de marea del Río de la Plata.

Con el objetivo de anticipar la influencia de los caudales de la Represa respecto a los niveles a lo largo del río, representados por Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, se determina la correlación entre la serie de caudales y las correspondientes series de niveles

registrados en dichas ciudades. La Tabla 3.6 presenta la disminución de correlación a medida que el observador se traslada hacia aguas abajo del río.

TABLA 3.6: Matriz de correlación (Pearson)

Variable	Caudal Salto (m ³ /s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Caudal Salto (m ³ /s)	1	0.919	0.782	0.568
Niveles Pdú (m)	0.919	1	0.905	0.691
Niveles FB (m)	0.782	0.905	1	0.897
Niveles NP (m)	0.568	0.691	0.897	1

Como conclusión, a medida que aumenta la distancia entre Salto y la estación de registro se observa una disminución en el valor de correlación de niveles y caudales erogados por la Represa. En el caso de Nueva Palmira solamente se tiene una correlación de casi un 57 %, ocasionado por la influencia del Río de la Plata y del río Paraná. Como otra conclusión a mencionar, es que los datos de Fray Bentos presentan una mejor correlación con los registros de Nueva Palmira que con los caudales de la Represa.

3.3. Selección de escenarios

Es de interés de este estudio como forma de obtener un modelo hidrodinámico calibrado y validado del río Uruguay legítimo para eventos hidrológicos de variada magnitud, considerar condiciones de aguas altas, medias y bajas.

Para el caso de caudales extremos, tanto bajos como altos, se pretende identificar la existencia de algún tipo de relación entre los eventos extremos de la serie histórica y los fenómenos climáticos asociados a Oscilación Sur (SO, por sus siglas en inglés), los cuales se vinculan con desastres ambientales a nivel mundial a lo largo de la historia (Kuhnel y Coates, 2000, Nicolls, 2001), así como también impactos socioeconómicos (Hales et al., 2000).

Actualmente existe una tendencia mundial a investigar estos fenómenos, y así determinar sus implicancias y métodos para su pronóstico, anticipando su ocurrencia. A nivel global y regional existen varios estudios que detectan una clara relación entre SO y anomalías en variables hidrológicas, como pueden ser parámetros de flujo o eventos de precipitación. Los resultados más relevantes a efectos de esta Tesis se exhiben en el presente subcapítulo.

Es por ello que se considera importante la inclusión de estos fenómenos al momento de seleccionar los períodos a simular para la calibración y validación del modelo a implementar.

3.3.1. Los fenómenos SO

El SO es una fluctuación interanual e irregular de los valores de presión del nivel de mar de los hemisferios este y oeste, causada por interacciones complejas entre condiciones atmosféricas y oceánicas, lo que complejiza su análisis. Las principales variables involucradas en este fenómeno son la presión a nivel del mar, temperatura de la superficie del mar, las precipitaciones y vientos. La escala de tiempo de la SO es del orden de tres años, pero al ser la oscilación tan irregular las variables meteorológicas en los trópicos tienen un pico en el rango entre 2 a 10 años.

Fluctuaciones en los valores de presión dan lugar a los estados de El Niño y La Niña, denominadas comúnmente ENSO (El Niño Oscilación Sur), debido a la condición cíclica del fenómeno. Los términos El Niño y La Niña comprenden un amplio rango de condiciones, tanto en duración como en intensidad. Durante la fase de El Niño, la presión a nivel del mar son altas en el oeste y bajas en el sudeste del Pacífico Tropical, con lluvias intensas, aguas superficiales inusualmente cálidas, y vientos alisios leves en el centro y este del Pacífico tropical. Los episodios El Niño ocurren aproximadamente cada 4 a 5 años y pueden durar hasta entre 12 y 18 meses.

La Niña es opuesta a la fase El Niño, comprendiendo temperaturas de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) en la zona central y este del Pacífico tropical de magnitud inusualmente bajas y vientos alisios muy intensos. Generalmente sus efectos son menos pronunciados que el Niño (Hales et al., 2000).

El foco de acción de SO se encuentra en el Pacífico Tropical y en el océano Índico, por ende, el Pacífico tropical se encuentra en una fase de la SO, conocida como El Niño, o en su fase complementaria La Niña.

Sin embargo, el SO también afecta condiciones oceánicas y de temperatura a nivel global, por lo que actualmente El Niño se asocia con desastres ecológicos y económicos que coinciden con devastadoras secas en el oeste Pacífico tropical, inundaciones sobre el este Pacífico Tropical e inusuales patrones climáticos en todo el mundo (Philander, 1990).

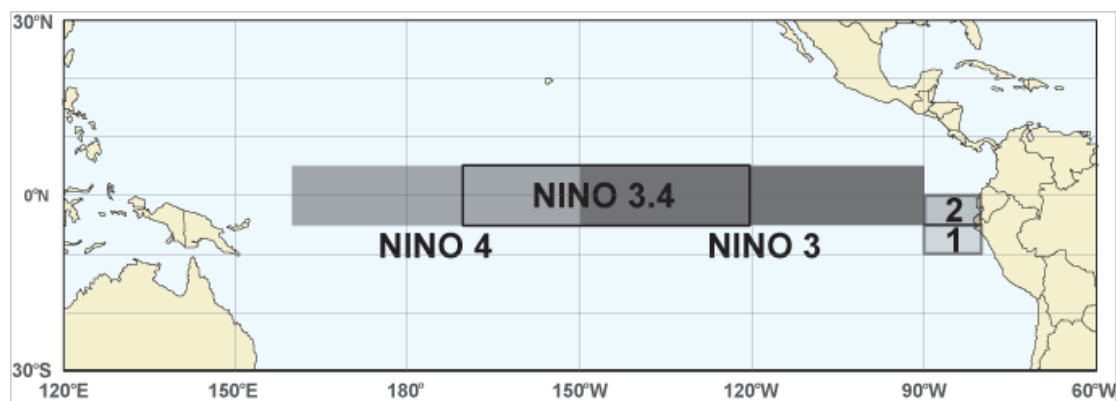
Esto ha despertado la necesidad de monitorear y analizar este fenómeno, con el fin de predecir sus futuros impactos. Por ello se han establecido índices para determinar el estado del ENSO, siendo el más conocido el Índice Oscilación Sur (SOI) que deriva de la diferencia de presión atmosférica entre Darwin (Australia) y Thaití (Polinesia Francesa). Mientras sucede El Niño el índice toma valores negativos, y cuando ocurre La Niña ocurre lo contrario.

Pero debido a la complejidad del fenómeno SO, no existe una única variable para controlar este fenómeno y, por lo tanto, existen varios índices relacionados a diferentes

parámetros. Sin embargo, es importante que los índices se calculen a partir de mediciones de los parámetros en puntos donde ocurren los procesos climáticos de la SO. Pues, cada variable tiene asociada una región núcleo que justifica de forma mayoritaria la varianza del SO, y no necesariamente coinciden. La presión sobre el nivel del mar (SLP por sus siglas en inglés), por ejemplo, tiene dos regiones núcleo: una se ubica en la zona sudeste del Pacífico Tropical y la otra en el Continente Marítimo (región sudeste de Asia); para el caso de la SST, la región núcleo se ubica en la parte central-este del Pacífico, cercana al Ecuador.

Otros índices son los “NIÑO”, los que se refieren a la diferencia entre un valor promedio de SST (obtenido a partir de un largo período) y la SST registrada en varias regiones ubicadas a lo largo de su región núcleo. Estas regiones, esquematizadas en la Figura 3.1, se denominan Niño 1 y Niño 2 (los cuales yacen sobre la costa sudamericana), Niño 3 y Niño 4 (ubicados en el este y central Pacífico ecuatorial) y el Niño 3.4 (que parcialmente intercepta a las áreas Niño 3 y Niño 4). Las regiones El Niño 3.4 y Niño 4 acompañan el área donde leves cambios en la SST, sean aumentos o descensos, pueden ocasionar un gran impacto en la ubicación de la zona de convección en el Pacífico oeste y central, y por tanto son áreas clave para monitorear y predecir los eventos ENSO.

FIGURA 3.1: Ubicación de las regiones Niño en el Océano Pacífico. (Extraída de: Oficina de Meteorología de Australia)



Por otra parte, también se recurre a un índice denominado Índice Niño Oceánico (ONI), utilizado por el Centro de Predicción Climático (CPC por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. El ONI se calcula a partir de desviaciones de la SST respecto al valor promedio, medidas en la región Niño 3.4. Los episodios El Niño y La Niña se definen como los períodos en que se exceden umbrales predefinidos en cinco períodos consecutivos.

A su vez, el CPC determina el índice SOI con las diferencias de los valores de SLP registrados en Tahití (Polinesia Francesa) y Darwin (Australia). Valores positivos elevados y

sostenidos del índice SOI indican eventos La Niña, y viceversa indica eventos El Niño.

3.3.2. ENSO y los recursos hídricos

Debido a los importantes y severos impactos que han mostrado desarrollar los eventos ENSO a nivel global, se ha desatado un interés en investigar la correlación entre los factores climáticos y la información hidrológica, insumo crucial para la gestión de recursos hídricos (Abtew, 2010, Kim et al., 2003, Meza, 2007, Ryu, 2010, Yoon et al., 2013).

Aplicaciones a América del Sur en las que se busca analizar los efectos de los eventos ENSO son variadas: desde eventos de inundación y cobertura vegetal (Moxey, 2002), hasta análisis con anomalías de precipitación (Aceituno, 1988, 1990, Aceituno et al., 2009, Pisciotano et al., 1994, Ropelewski y Halpert, 1987, 1989, Steinhoff et al., 2014) y caudales de cursos de agua (Maciel et al., 2010, Mechoso y Perez Iribarren, 1992).

Particularmente, Ropelewski y Halpert (1987, 1989) establecen que las precipitaciones en la zona sudeste de Sudamérica (SSA) tienden a incrementar con respecto al promedio en el período comprendido entre noviembre y el siguiente febrero en años El Niño, y a ser menor que el promedio entre junio y diciembre en años La Niña. Por otra parte, Aceituno (1988, 1990) determina que las precipitaciones entre noviembre y diciembre en una región similar a SSA y el régimen hídrico del río Paraná se correlacionan negativamente con el índice SOI.

En menor escala de abordaje que lo anterior, en Uruguay se identifica que en los años en que se desarrolla un evento El Niño se tiende a tener precipitaciones de mayor magnitud que un año promedio, especialmente en el período comprendido entre noviembre y enero siguiente, particularmente en las zonas oeste y norte del país. Opuestamente, años con eventos La Niña tienden a tener precipitaciones de menor magnitud que la promedio, especialmente entre los meses de octubre a diciembre. En la zona norte, en los períodos de marzo a julio siguientes a años El Niño y La Niña ocurren aumentos y reducciones, respectivamente, en la magnitud de las precipitaciones (Pisciotano et al., 1994).

Aunque es sabido que la relación entre precipitación y caudal es compleja, lo anterior se confirma indirectamente por Mechoso y Perez Iribarren (1992) quienes estudian la relación entre ENSO y los caudales de los ríos Uruguay y Negro, encontrando para ambos ríos una tendencia a anomalía negativa de caudal desde junio a diciembre de un año La Niña y una tendencia, aunque un poco más débil, a anomalía positiva de caudal de noviembre de un año El Niño a febrero del año siguiente.

Por otra parte, Maciel et al. (2010) analizaron la variabilidad multi-anual de caudales de los ríos Paraná, Uruguay y Negro, pertenecientes a la cuenca del Plata, con series

históricas del 1901-1999, 1909-2007 y 1908-2007 respectivamente en base anual y estacional. Tanto para las series anuales como para las trimestrales se utilizaron métodos estadísticos multivariados, con el fin de detectar tendencias, comportamientos cíclicos, y la relación de éstos con índices oscilatorios (Niño 3.4 y Oscilación del Pacífico, PDO por sus siglas en inglés). Para los tres ríos analizados, se detectan pseudo-períodos de entre 2.5 y 6.5 años, probablemente asociados al fenómeno ENSO.

Estos estudios se direccionan hacia determinar una relación entre los parámetros de flujo de los cursos fluviales en Uruguay y las condiciones climáticas asociadas a los eventos El Niño y La Niña, mostrando resultados más intensos en unos casos que en otros.

Por tanto, resulta válido seleccionar los escenarios de modelación articulando con índices que reproduzcan el efecto de dichos eventos. Se presenta en el próximo subcapítulo la metodología para seleccionar los períodos a utilizar para la calibración y validación del modelo hidrodinámico.

3.3.3. Selección de períodos de simulación

3.3.3.1. Introducción

En este punto se describe la metodología implementada para la definición de los escenarios hidrológicos a ser contemplados para la calibración y validación del modelo, a modo de abarcar el amplio espectro que puede presentar el río Uruguay en sus condiciones hidrológicas.

Como criterios de selección se adoptan dos: el primero vinculado con los índices de variabilidad climática y luego limitando la media móvil trimestral de caudales mensuales a valores umbrales de extremos altos y bajos. Este último, una vez efectuado el anterior, se refiere a seleccionar para los caudales extremos altos los períodos en que la media móvil trimestral de caudales mensuales supera un valor determinado. De forma análoga, para la selección de períodos de caudales extremos bajos se identifican los que presentan valores de caudales menores a otro valor definido. Dichos umbrales se conforman por el tercer y primer percentil respectivamente de la serie conformada por los caudales mensuales. Por lo tanto, los umbrales máximos y mínimos para considerar caudales extremos bajos y altos se definen como 2276 y 7682m³/s respectivamente, de acuerdo a la Tabla 3.4 .

A partir del conjunto de ventanas temporales que cumplen las condiciones recién expuestas, se seleccionan los períodos representativos de caudales altos y bajos a tomar como base para la simulación del modelo hidrodinámico.

En este marco, como primer paso, se compara los datos registrados de caudales con series de índices históricos representativos de los eventos ENSO. Con los datos de caudales diarios brindados por DNH, se determinan valores de caudales mensuales para la serie histórica comprendida entre 1983 y 2011, y con ellos la Media Móvil Trimestral de la misma. Cabe recordarse que dichos datos corresponden a la ciudad de Salto y han sido validados con los caudales horarios erogados por la Represa Salto Grande brindados por CTM, pero se utilizan los de DNH debido a que la serie es más extensa, conformando por lo tanto una mayor ventana temporal de comparación. En cuanto a los datos correspondientes al año 2011 de la serie de caudales de la DNH, que se había visualizado diferencias con la serie de CTM, los mismos se sustituyen por los calculados a partir de la información disponible de CTM.

Recordando la no exclusividad de las variables para representar de forma única los eventos ENSO, se efectúa la comparación de caudales con dos índices diferentes: el ONI (determinados a partir de la variable Temperatura) y el SOI (determinados a partir de la variable presión), ambos publicados y determinados por el CPC del NOAA.

En cuanto al primero, información histórica del ONI se encuentra de forma libre en la página web del CPC. El ONI se calcula a partir de desviaciones de la SST respecto al valor promedio (comúnmente denominada anomalía), siendo las temperaturas medidas en la región Niño 3.4, y se define como la media móvil trimestral de estas desviaciones. El valor promedio adoptado por la CPC para calcular las anomalías es el determinado al considerar la serie histórica de base del período 1981-2010. La NOAA define operacionalmente a El Niño y La Niña a un valor positivo mayor o igual que $+0.5^{\circ}\text{C}$ y un valor negativo menor o igual que -0.5°C , respectivamente, y mientras dichos umbrales son excedidos en cinco períodos consecutivos, siendo estos períodos una móvil de estación de 3 meses solapados entre sí.

En la Tabla 3.7 se presenta los períodos en que suceden eventos El Niño y La Niña desde 1951 hasta 2012, junto con su valor máximo o mínimo respectivamente del índice ONI determinado para las ventanas trimestrales móviles incluidas en los mismos. Dichas ventanas se conforman: enero-febrero-marzo (EFM), febrero-marzo-junio (FMJ), marzo-junio-julio (MJJ), junio-julio-agosto (JJA), julio-agosto-setiembre (JAS), agosto-setiembre-octubre (ASO), setiembre-octubre-noviembre (SON), octubre-noviembre-diciembre (OND), noviembre-diciembre-enero (NDE) y diciembre-enero-febrero (DEF). Se señalan con colores los que se ubican dentro de la faja temporal en la que se dispone información de caudales (1983-2011).

A partir de esta tabla se observa que los períodos de episodios El Niño más importantes fueron de abril de 1982 a Julio de 1983, y de abril de 1997 a mayo de 1998, y los episodios

TABLA 3.7: Episodios históricos EN y LN basados en el ONI

El Niño	Valor ONI	La Niña	Valor ONI
JJA 1951 – DEF 1951/52	1.2	ASO 1949 – JAS 1950	-1.4
DEF 1952/53 – EFM 1954	0.8	SON 1950 – EFM 1951	-0.8
MAM 1957 – JJA 1958	1.8	AMJ 1954 – NDE 1956/57	-1.7
OND 1958 – FMA 1959	0.6	AMJ 1964 – DEF 1964/65	-0.8
MJJ 1963 – EFM 1964	1.4	JJA 1970 – DEF 1971/72	-1.3
AMJ 1965 – MAM 1966	1.9	AMJ 1973 – JJA 1974	-2.0
JAS 1968 – DEF 1969/70	1.1	SON 1974 – MAM 1976	-1.7
AMJ 1972 – FMA 1973	2.1	ASO 1983 – DEF 1983/84	-0.9
ASO 1976 – EFM 1977	0.8	SON 1984 – ASO 1985	-1.1
ASO 1977 – EFM 1978	0.8	AMJ 1988 – AMJ 1989	-1.9
AMJ 1982 – MJJ 1983	2.2	ASO 1995 – FMA 1996	-0.9
JAS 1986 – EFM 1988	1.6	JJA 1998 – FMA 2001	-1.7
AMJ 1991 – MJJ 1992	1.6	OND 2005 – FMA 2006	-0.9
ASO 1994 – FMA 1995	1.2	JAS 2007 – MJJ 2008	-1.5
AMJ 1997 – MAM 1998	2.4	JJA 2010 – MAM 2011	-1.5
AMJ 2002 – EFM 2003	1.3	ASO 2011 – FMA 2012	-1.0
JJA 2004 – DEF 2004/05	0.7		
ASO 2006 – DEF 2006/07	1.0		
JJA 2009 – MAM 2010	1.6		

La Niña más importantes tuvieron lugar de abril de 1988 a junio del año siguiente, y de junio de 1998 a abril de 2001.

En cuanto al segundo índice considerado en el presente estudio, el CPC determina el índice SOI con las diferencias de los valores de SLP, las cuales se calculan una vez éstos son estandarizados respecto a un valor promedio determinado a partir de una serie histórica de base comprendiendo el período 1981-2010. Cabe aclararse que este índice puede ser determinado por otro método, como lo realiza la Oficina de Meteorología de Australia, pero en este análisis se utiliza el determinado por el CPC.

A modo conceptual, se establece una relación directamente proporcional con la diferencia estandarizada de los SLP en Tahití (149,23 W; 17,78 S) y Darwin (130,83 E; 12,45 S), según la Ecuación 3.3.

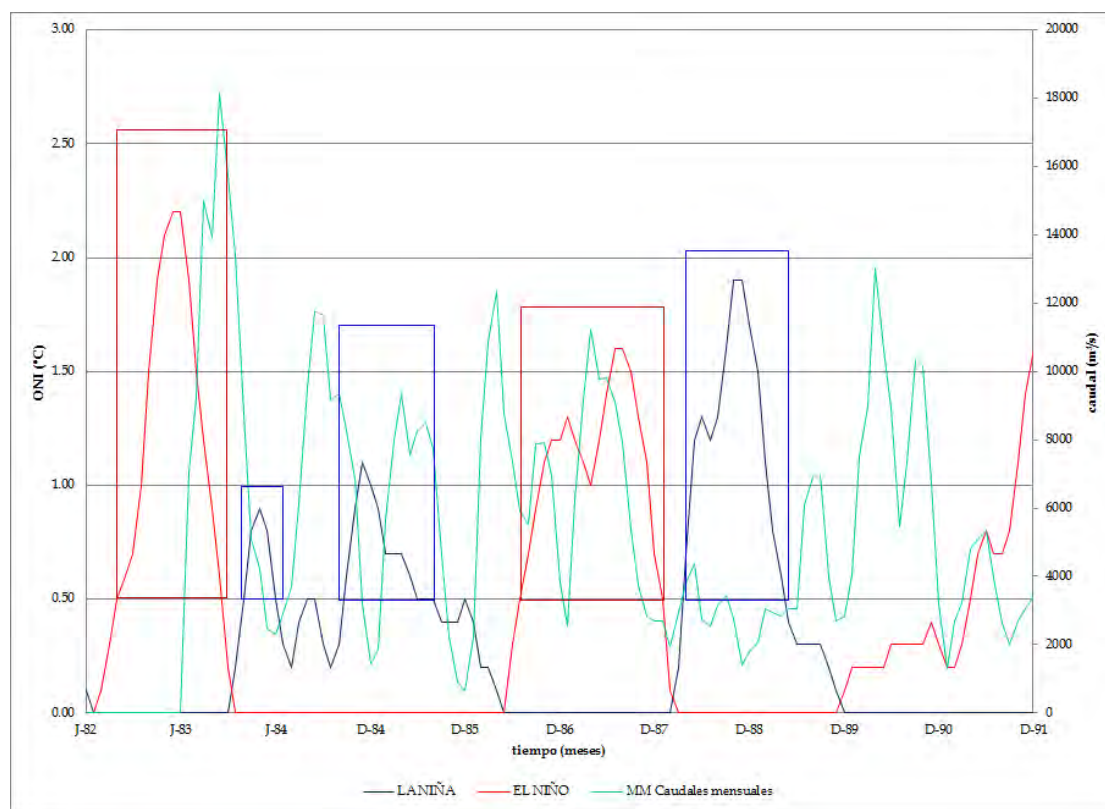
$$SOI \propto \frac{(Tahiti - Darwin)}{SD(T - D)} \quad (3.3)$$

Las anomalías son desviaciones del valor promedio de base. Anomalías positivas, o valores positivos elevados y sostenidos del índice SOI indican eventos La Niña, y viceversa indica eventos El Niño.

3.3.3.2. Análisis entre caudales y ONI

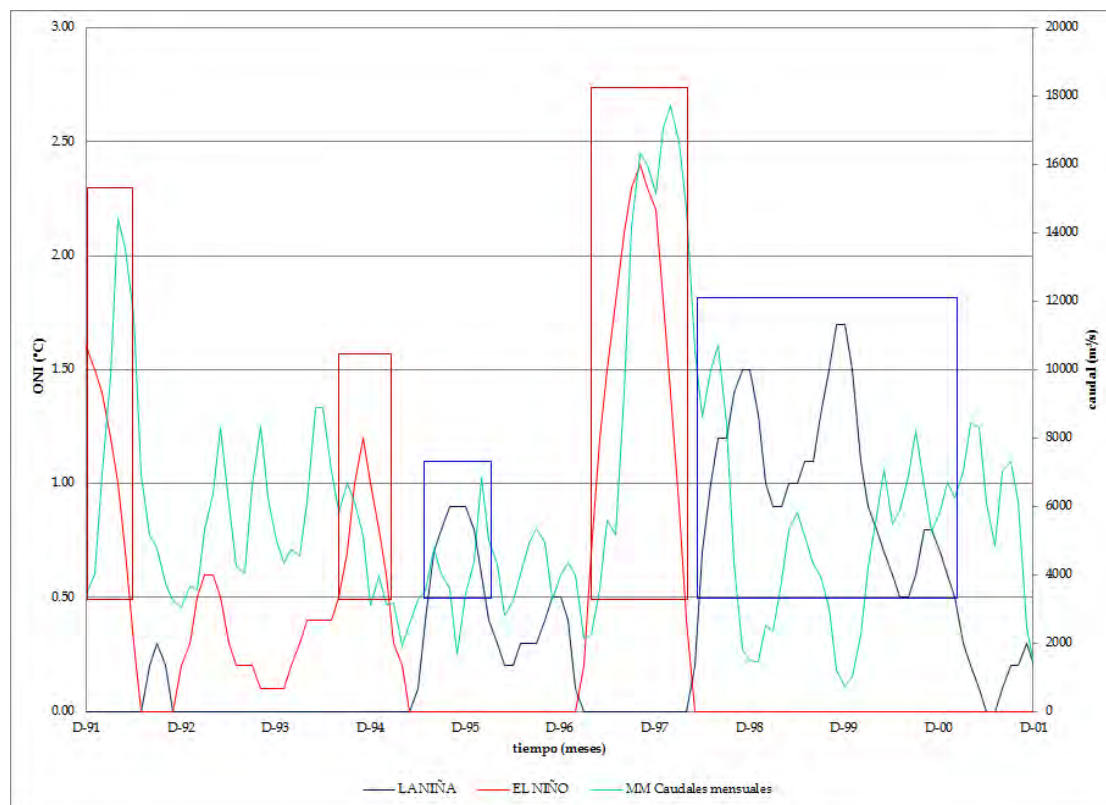
En primer lugar se presenta la comparativa entre los caudales y los valores del índice ONI para el período comprendido entre 1982 y 2011. Los datos de caudales a ser comparados son los obtenidos con una media móvil trimestral de los datos mensuales de caudal. Se esquematiza ambos conjuntos de datos en tres figuras, cada una comprendiendo una ventana temporal de 10 años de la serie. En la Figura 3.2 representa la información para el período comprendido entre enero de 1982 a diciembre de 1991, la Figura 3.3 de enero de 1992 a diciembre de 2001 y la Figura 3.4 de enero de 2002 a diciembre de 2011. En las figuras las líneas azules representan los valores de anomalías negativas y las líneas rojas representan anomalías positivas. Los episodios El Niño y La Niña según CPC coincidentes con incrementos o disminuciones de caudales respectivamente se resaltan con rectángulos (a modo aproximado), donde el color rojo indica eventos El Niño y color azul eventos La Niña.

FIGURA 3.2: Comparación entre índice ONI y Media Móvil Trimestral de caudales mensuales del río Uruguay (período Ene/82 a Dic/91)



De los recuadros esquematizados se busca seleccionar los que se corresponden con caudales extremos bajos y elevados. Para ello se adopta como criterio los valores de caudal asociado al primer y tercer cuartil respectivamente de la serie conformada por los caudales mensuales. Recordando de la Tabla 3.4, el primer cuartil comprende el primer 25 %

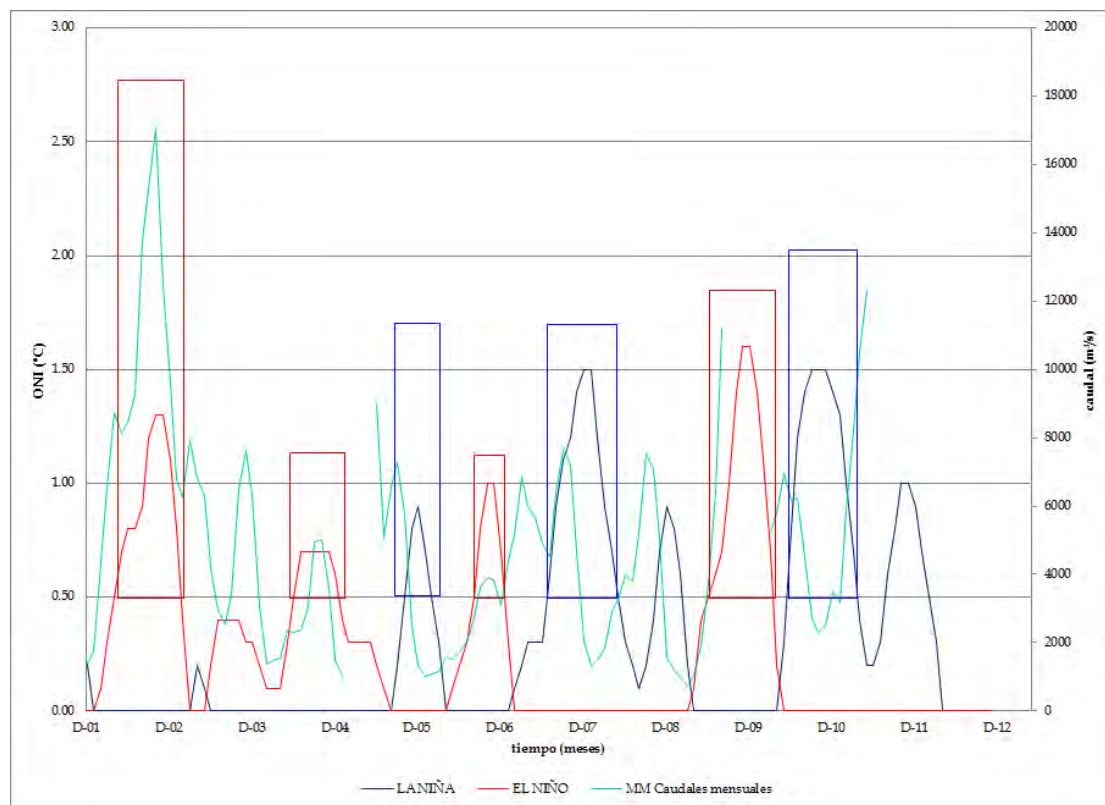
FIGURA 3.3: Comparación entre índice ONI y Media Móvil Trimestral de caudales mensuales del río Uruguay (período Ene/92 a Dic/01)



de la muestra, conteniendo los valores más bajos de la serie; con registros de caudales menores o iguales a $2276\text{m}^3/\text{s}$. El tercer cuartil comprende el cuarto con los registros más elevados de la serie de caudales mensuales, con caudales superiores o iguales a $7682\text{m}^3/\text{s}$. Por lo tanto, los umbrales máximos y mínimos para considerar caudales extremos bajos y altos se definen como 2276 y $7682\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente.

En cuanto a los eventos El Niño, establecidos por CPC, al comparar con los datos hidrológicos (serie media móvil trimestral de caudales mensuales) se identificaron cinco de ellos coincidentes con períodos en los cuales se alcanzan caudales altos (superiores o iguales a $7682\text{m}^3/\text{s}$) en el período temporal considerado. Ellos son: EFM 1983 – MJJ 1983 (el episodio es desde AMJ 1982 pero se dispone de valores de caudales a partir de 1983), JAS 1986 – EFM 1988, AMJ 1991 – MJJ 1992, AMJ 1997 – MAM 1998, AMJ 2002 – EFM 2003. Los cinco valores más altos de la serie de caudales coinciden con los períodos de eventos El Niño con los cinco valores más altos del índice ONI. El episodio entre los años 2009 y 2010, no se tuvo en cuenta ya que no se dispone de datos de caudales en ese período, y para los restantes episodios identificados no se visualiza una correspondencia con caudales superiores al umbral establecido.

FIGURA 3.4: Comparación entre índice ONI y Media Móvil Trimestral de caudales mensuales del río Uruguay (período Ene/02 a Dic/11)



Es importante mencionar que para los casos en que valores altos de ONI coinciden con valores altos de la serie de caudales (media móvil trimestral de caudales mensuales) no se identifica una relación lineal directa entre ambas variables. Cuanto mayor es el valor de ONI, no necesariamente implica un mayor valor de caudal, y asimismo, no todos los caudales altos se corresponden a este tipo de episodios. A modo de ejemplo, se menciona los altos caudales en el año 1990, en donde predominan los caudales elevados pero el índice ONI es inferior a 0.5°C en toda su extensión.

Por otra parte, se compara de forma análoga para los eventos La Niña, difiriendo del caso anterior en que se buscan coincidencias con los períodos de los eventos que presentan caudales menores o iguales a $2.276\text{m}^3/\text{s}$. Se encontraron los períodos: SON 1984 – ASO 1985, AMJ 1988 – AMJ 1989, ASO 1995 – FMA 1996, JJA 1998 – FMA 2001, OND 2005 – FMA 2006, JAS 2007 – MJJ 2008.

De los períodos de El Niño y La Niña escogidos como coincidentes con caudales extremos altos y bajos respectivamente, se restringe los mismos a los que presenten por lo menos un valor de caudal mensual superior o igual al caudal máximo o inferior o igual al mínimo característico, respectivamente. Dichos valores ascienden a $15201\text{m}^3/\text{s}$ y $908\text{m}^3/\text{s}$ como los umbrales que contienen el 95 y 5 % respectivamente, como se presenta en la Tabla

3.3. La Tabla 3.8 presenta los eventos El Niño y La Niña que cumplen con dicho criterio, los cuales se acompañan con sus valores de caudal mensual máximo o mínimo según corresponda.

TABLA 3.8: Eventos EN y LN conteniendo caudales mensuales máximos y mínimos, mayores y menores a los valores característicos determinados para la serie de caudales mensuales

Eventos EN con caudales máximos superiores al característico	Caudal máximo (m^3/s)
AMJ 1982 – MJJ	22510
AMJ 1991 – MJJ 1992	18873
AMJ 1997 – MAM 1998	21798
AMJ 2002 – EFM 2003	20670
Eventos LN con caudales mínimos inferiores al característico	Caudal mínimo (m^3/s)
AMJ 1988 – AMJ 1989	797
JJA 1998 – FMA 2001	704
OND 2005 – FMA 2006	876
JAS 2007 – MJJ 2008	573

Los episodios El Niño con mayores índices ONI coinciden con ocurrencias de caudales altos extremos: de abril de 1982 a julio de 1983 contiene a un máximo caudal mensual de $22510\text{m}^3/\text{s}$ (que corresponde al máximo valor de la serie de caudales mensuales), y de abril de 1997 a mayo de 1998 con un valor de caudal máximo de $21798\text{m}^3/\text{s}$.

Los episodios La Niña de mayor magnitud tuvieron lugar de abril de 1988 a junio del año siguiente con un caudal mínimo de $797\text{m}^3/\text{s}$, y de junio de 1998 a abril de 2001 con un valor mínimo de caudal mensual de $704\text{m}^3/\text{s}$. Ninguno de ambos casos contienen el caudal mínimo mensual absoluto de la serie (caudal mensual de $500\text{m}^3/\text{s}$, según Tabla 3.3), sino que éste sucede en diciembre de 1985 sin asociarse de forma explícita a eventos La Niña.

3.3.3.3. Análisis entre caudales y SOI

Como fue anticipado anteriormente, se complementa lo anterior con la inclusión al presente análisis de otro índice representativo de los eventos SO, el SOI. Con ello se pretende, al igual que el caso anterior, determinar ventanas temporales en las que la serie de caudales muestra una relación con los eventos El Niño y La Niña, esta vez representados por el índice SOI. Los valores de dicho índice se extraen de la página oficial de CPC, y consiste en determinar las anomalías de SLP entre Thaití y Darwin.

Sin embargo, a diferencia del caso anterior, aquí se implementa una metodología diferente, basada en la expuesta por Mechoso y Perez Iribarren (1992). Ellos identifican para los ríos Negro y Uruguay una clara tendencia a presentar valores de caudal debajo del promedio entre el período comprendido entre junio y diciembre para los años con SOI elevados, episodios La Niña, y una leve tendencia a presentar valores de caudal por encima del promedio en el período comprendido entre los meses de noviembre y febrero de los años El Niño. En caso de que estas afirmaciones fueran representadas en la información disponible de caudales, los períodos seleccionados como escenarios podrían ser escogidos según estos criterios.

Cabe advertir que el presente trabajo dispone de una serie histórica limitada de registros de caudales, desde el año 1983 al 2010, mientras que el estudio de Mechoso y Perez Iribarren (1992) se realiza contando una serie sensiblemente más extensa, comprendida entre los años 1875 al 1983. Por lo anterior, lo aquí presentado puede resultar en un análisis modesto aunque tal vez indicativo para determinar la existencia de períodos de influencia de los fenómenos.

En el trabajo antes citado, la clasificación de años El Niño o La Niña se basa en el criterio adoptado en Ropelewski y Halpert (1989) en donde se establece que los años con elevado índice SO son identificados a través de características estadísticas del índice SOI. El valor extremo superior del SOI es definido como esos años en los que el SOI permanece dentro del 25 % superior de la distribución por cinco meses o más. De forma análoga se define el valor extremo inferior del SOI.

Según los criterios recién descritos se definen los períodos El Niño y La Niña. Como presenta la Tabla 3.9, se identifican con color naranja los períodos temporales de al menos 5 meses en que se supera el umbral superior de los valores positivos del índice SOI (vinculados a eventos La Niña) y en color azul los períodos temporales de al menos 5 meses en que los valores negativos del índice SOI se mantienen por debajo del umbral inferior (vinculados a eventos El Niño). Para cada uno de ellos, se determina el caudal mensual promedio del período de influencia, de noviembre a febrero si el año es El Niño y de junio a diciembre si el año es La Niña, y se lo compara con el promedio asociado al mismo período de meses de toda la serie histórica disponible de caudales mensuales. Estos caudales se presentan en la Tabla 3.10, en la que se señalan en color gris las celdas que corresponden a años en que no se dispone datos de caudal de forma completa en el período a comparar, por lo que no son contemplados en el análisis. Al efectuar una comparación entre los años definidos como EN y LN, como determina dicha tabla, respecto a los años definidos por el índice ONI, según muestra la Tabla 3.7, puede observarse que en su mayoría coinciden, exceptuando los años 1989 y 2008 como eventos La Niña, y el año 1993 como año El Niño.

Los valores promedio de la serie, según lo mencionado recién, resultan en 4221 y 6260m³/s como el promedio de noviembre a febrero de la serie, y el promedio de junio a diciembre de la serie, respectivamente.

TABLA 3.9: Clasificación años EN y LN según criterios Ropelewski y Halpert (1989)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1982	2	0.4	1	0.1	-0.6	-1.7	-2.5	-2.9	-2.9	-2.8	-4.3	-3.7
1983	-5.8	-6	-4	-1.5	1	0.1	-1	0.2	1.4	0.7	-0.2	0
1984	0.3	1.4	-0.4	0.6	0.3	-0.6	0.3	0.7	0.2	-0.5	0.4	-0.2
1985	-0.5	2	1.3	1.9	0.7	-0.6	-0.2	1.6	0	-0.6	-0.3	0.4
1986	1.6	-1.7	0.8	0.5	-0.4	1.6	0.5	-0.6	-0.8	1.1	-2	-2.4
1987	-1.1	-2.1	-2.1	-2.3	-2.1	-1.8	-2.2	-1.5	-1.7	-0.6	0	-0.8
1988	-0.2	-0.6	1.1	0.2	1.5	0.1	1.7	2.5	3	2.3	2.8	2
1989	2.5	2	1.8	2.7	2	1.2	1.5	-0.5	0.8	1.3	-0.4	-0.9
1990	-0.1	-3	-0.7	0.3	2	0.5	0.9	-0.3	-1.2	0.4	-0.8	-0.4
1991	1	0.4	-1.1	-1	-1.7	-0.2	0	-0.7	-2.5	-1.7	-1.1	-2.9
1992	-4.7	-1.5	-3.3	-1.7	0.4	-1	-1	0.6	0.1	-2.3	-1.1	-0.9
1993	-1.5	-1.2	-0.8	-1.9	-0.6	-1.4	-1.3	-1.6	-1.2	-1.8	-0.1	0.3
1994	-0.2	0.4	-1.1	-2.1	-1.1	-0.7	-2.2	-2	-2.6	-1.9	-0.9	-2
1995	-0.7	-0.2	1.2	-1.1	-0.6	0.2	0.7	0.5	0.4	0	0.1	-0.8
1996	1.6	0.4	1.9	1.3	0.5	1.9	1.1	1.2	1	1	-0.1	1.5
1997	0.8	2.9	-0.7	-1	-2.2	-2.3	-1.2	-2.4	-2.4	-2.4	-2	-1.6
1998	-4.4	-3.4	-4	-2.4	0.4	1.6	2	1.9	1.7	1.8	1.7	2.3
1999	3	1.6	2.1	2.3	0.4	0.4	0.9	0.6	-0.1	1.6	1.7	2.4
2000	1.1	2.7	2.2	2	0.6	-0.3	-0.3	1.2	1.4	1.8	3	1.3
2001	1.6	2.8	1.5	0.3	-0.8	0.5	-0.3	-0.7	0.3	-0.1	1.1	-1.4
2002	0.7	1.8	-0.4	-0.1	-1.4	-0.4	-0.8	-1.6	-1	-0.6	-0.7	-1.8
2003	-0.3	-1.1	-0.5	-0.2	-0.5	-1	0.5	0.2	-0.2	0	-0.5	1.8
2004	-2.2	2	0.7	-1.5	1.7	-1.4	-0.8	-0.5	-0.6	-0.1	-1.1	-1.3
2005	0.6	-5.2	0.5	-1	-1.3	0.7	0.3	-0.6	0.6	2	-0.3	0
2006	2.7	0.2	2.9	1.8	-0.8	-0.4	-1	-1.7	-1	-2.1	0.1	-0.5
2007	-1.3	-0.1	0.3	-0.2	-0.2	0.9	-0.5	0.7	0.3	1.2	1.4	2.7
2008	2.9	4.4	2.4	1.1	-0.1	1	0.5	1.7	2	2.1	2.2	2.4
2009	1.8	3.1	0.7	1.3	-0.2	0.2	0.4	-0.3	0.5	-2	-1	-1.2
2010	-1.8	-2.4	-1.1	2	1.5	0.6	3	3	3.7	2.9	2.1	4.8
2011	3.8	4.5	4.2	3.1	0.6	0.4	1.6	0.7	1.7	1.2	1.8	4.1
2012	1.8	0.8	1.2	-0.4	0.1	-0.7						

El 50% de los años El Niño en los que se dispone de datos completos, cumple que se supera el valor medio correspondiente al promedio de los períodos de noviembre a febrero de la serie completa. Ellos son los años 1993 y 1997.

Por el contrario, ante eventos La Niña, 6 casos de 7 sucede que el promedio es inferior al promedio de la serie en los meses comprendidos entre junio a diciembre (exceptuando el año 1998 que no cumple con dicha condición), por lo que se observa una mayor

TABLA 3.10: Caudales medios mensuales de años EN y LN en período de análisis

Año	Caudal Mensual Promedio Noviembre a Febrero (m^3/s) (EN)	Caudal Mensual Promedio Junio a Diciembre (m^3/s) (LN)
1982		
1987	2 974.45	
1988		2 797.57
1989		4 537.45
1991	3 057.45	
1993	6 294.30	
1997	16 813.19	
1998		7 480.28
1999		4 297.96
2000		6 238.75
2008		5 217.94
2009		
2010		4 399.79

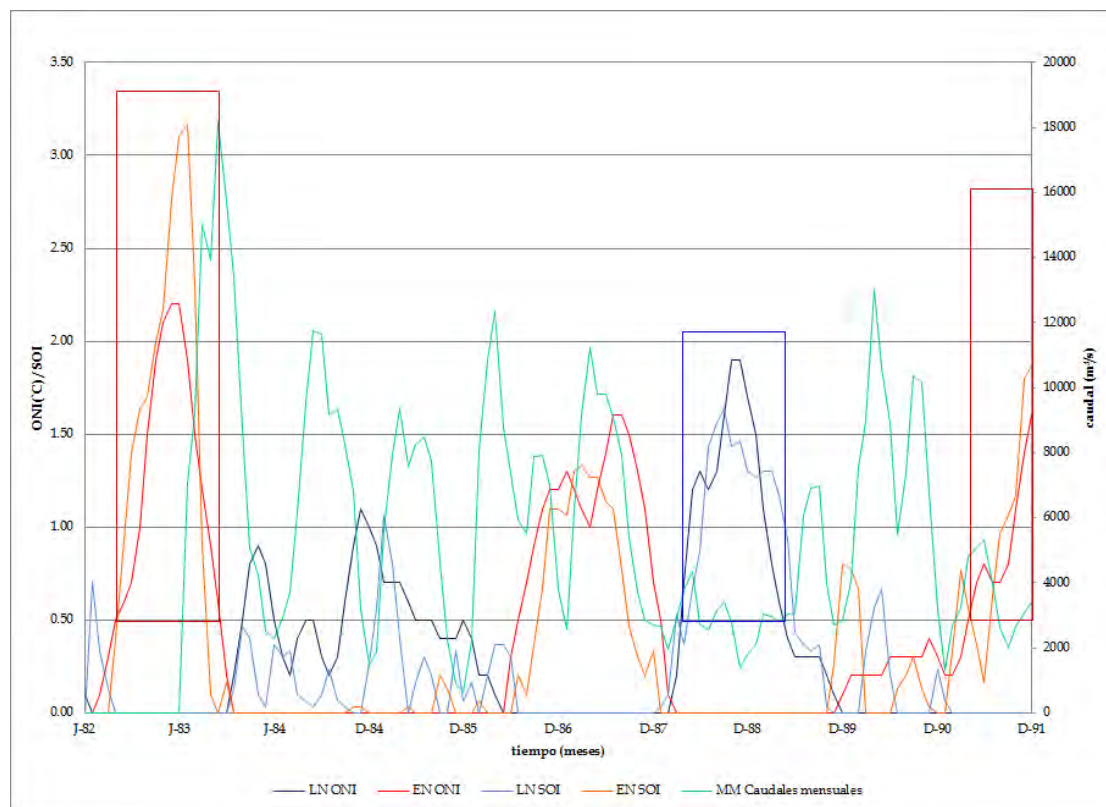
consistencia en los eventos La Niña que los eventos El Niño, como menciona Mechoso y Perez Iribarren (1992).

Esto lleva a que no sea suficiente efectuar dicha comparación para la selección de los períodos de caudales extremos como escenarios de modelación. Por ello, contemplando los resultados extraídos de la comparación entre caudales y el índice ONI, se adiciona la inclusión de los valores del índice SOI a los períodos determinados por dicho cotejo. Se analiza si los períodos mencionados en la Tabla 3.8 corresponden a valores extremos del índice SOI. Las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 contienen la representación de las series de los índices ONI y SOI junto con la serie media móvil trimestral de caudales mensuales, con la señalización de los eventos previamente seleccionados mencionados en la Tabla 3.8: en color rojo se enmarcan los eventos El Niño y en azul los correspondientes a eventos La Niña.

A partir de dichas figuras se extrae que en todos los eventos previamente seleccionados, el índice SOI representa la misma fase del fenómeno SO que el índice ONI. Sin embargo, la ocurrencia de máximos en sus valores absolutos del índice SOI no necesariamente coincide con los valores extremos de los valores ONI.

En base a lo antes comentado, es posible concluir que los períodos mencionados en la Tabla 3.8 coinciden con eventos El Niño o La Niña según ambos índices ONI y SOI.

FIGURA 3.5: Comparación de los eventos EN y LN seleccionados según valor de ONI y caudales, respecto a valores del índice SOI (período Ene/82 a Dic/91)



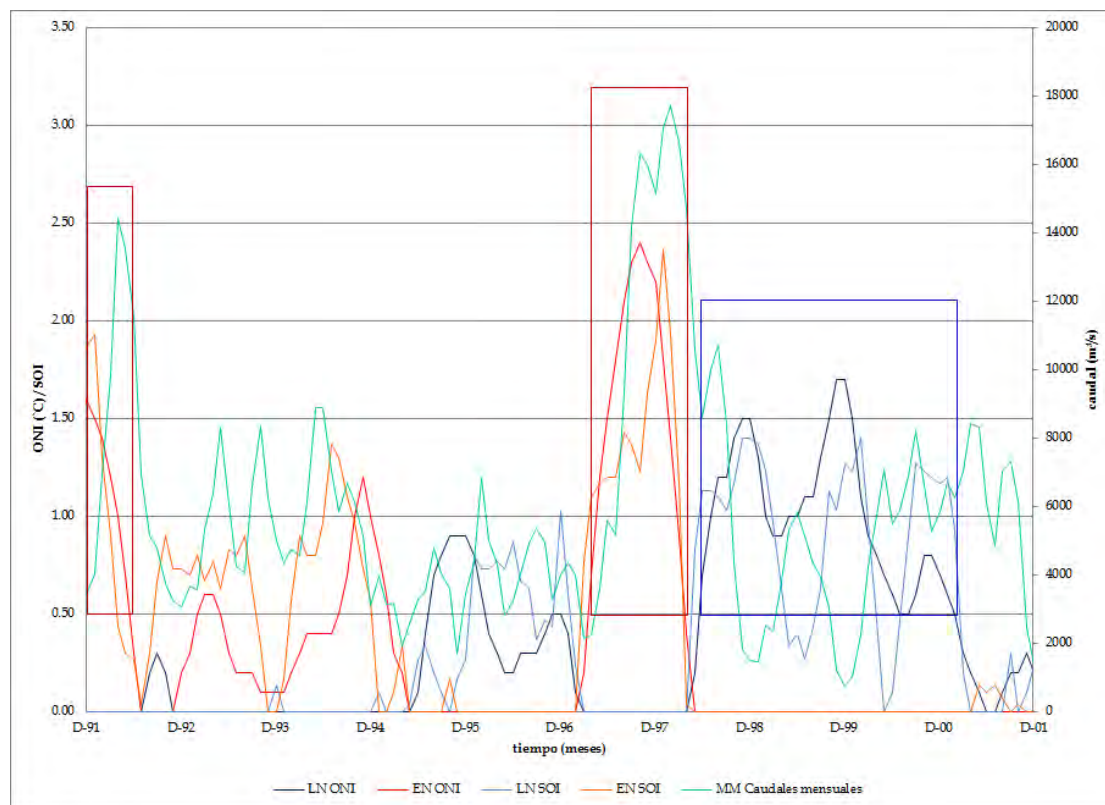
3.3.3.4. Resultados

Finalmente, a partir de los períodos temporales mencionados en la Tabla 3.8, se efectúa la selección a modo de representar escenarios de caudales altos y bajos, verificando en lo posible el cumplimiento de los siguientes puntos:

- la densidad de registros diarios de niveles en las distintas escalas de Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira del 100 %
- proximidad de los registros al período comprendido entre los años 1996-99, en el que se efectuó el relevamiento batimétrico del SOHMA (fuente de información más densa en la zona de estudio)
- posterioridad de los períodos a seleccionar respecto al año 1995, debido a que la información disponible de caudales horarios parten de dicho año

Teniendo como referencia los puntos recién expuestos, la Tabla 3.11 marca los períodos seleccionados a ser contemplados para la definición de los escenarios de altos y bajos caudales: los períodos seleccionados para la calibración se señalan en color azul y los

FIGURA 3.6: Comparación de los eventos EN y LN seleccionados según valor de ONI y caudales, respecto a valores del índice SOI (período Ene/92 a Dic/01)

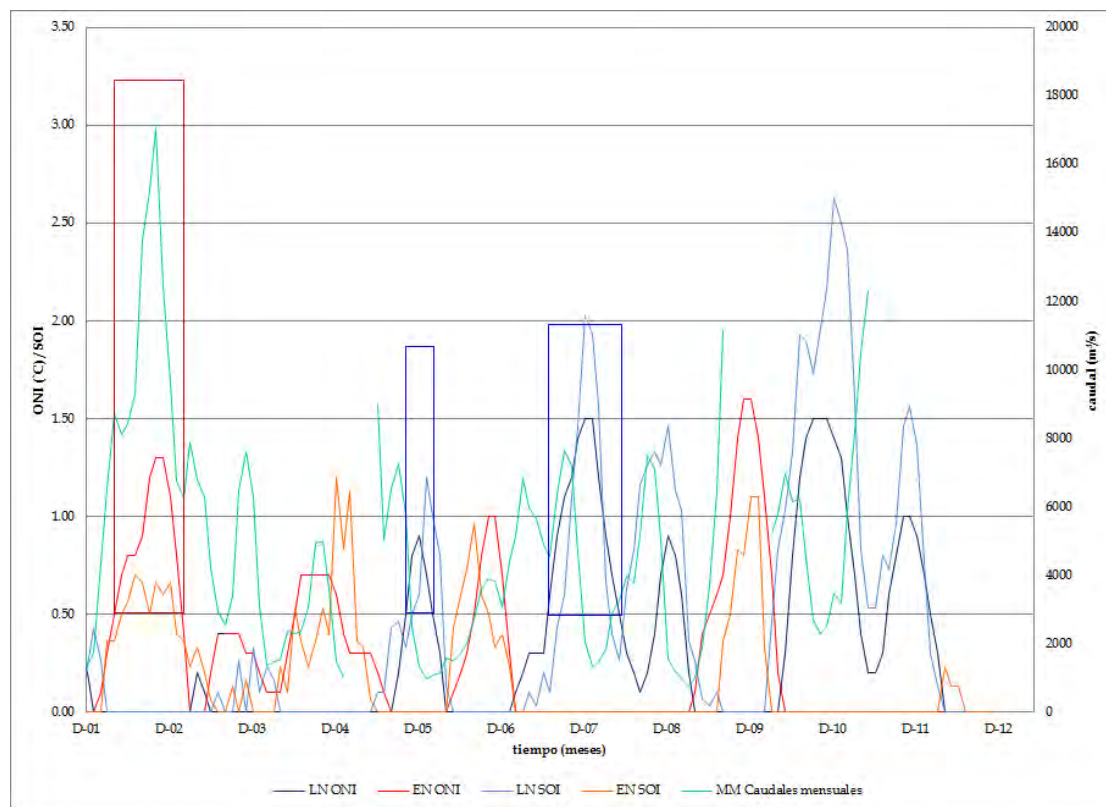


seleccionados para la etapa de validación del modelo hidrodinámico en color gris. En cada uno de los casos determinados incluidos en dicha tabla se selecciona una porción temporal significativa que contenga valores extremos de caudales, de duración mínima de tres meses.

TABLA 3.11: Períodos de base seleccionados para modelación y porcentaje de datos

	Período	Paysandú	Fray Bentos	Nueva Palmira
Eventos EN con caudales máximos superiores al característico				
AMJ 1982 – MJJ 1983	Abr-Jun 1983	100 %	100 %	100 %
AMJ 1991 – MJJ 1992	May-Jul 1992	94 %	100 %	100 %
AMJ 1997 – MAM 1998	Oct-Dic 1997	100 %	100 %	100 %
	Mar-May 1998	100 %	100 %	97 %
AMJ 2002 – EFM 2003	Set-Nov 2002	100 %	100 %	100 %
Eventos LN con caudales mínimos inferiores al característico				
AMJ 1988 – AMJ 1989	Feb-May 1988	100 %	98 %	100 %
JJA 1998 – FMA 2001	Oct 1999 - Abril 2000	39 %	100 %	100 %
JAS 2007 – MJJ 2008	Ene-Jun 2008	100 %	100 %	100 %
JJA 2010 – MAM 2011	Set-Dic 2010	100 %	84 %	100 %

FIGURA 3.7: Comparación de los eventos EN y LN seleccionados según valor de ONI y caudales, respecto a valores del índice SOI (período Ene/02 a Dic/11)



Sin embargo, existe una diferencia respecto a lo presentado en la Tabla 3.8. Esta se debe al episodio La Niña de JJA 2010 – MAM 2011 que no se había incluido en la selección preliminar debido a que su valor mínimo de caudal era superior al umbral característico. Ahora, se resuelve seleccionar dicho período para la etapa de calibración por poseer mayor densidad de datos al considerar la suma de los tres puntos en donde se dispone registros de niveles, y además debido a que Fray Bentos dispone una aceptable densidad de información.

Si bien la Tabla 3.8 presenta los períodos a ser considerados como extremos, resta definir las fajas temporales asociadas a condiciones de caudales medios. Se seleccionan los períodos del 16 de junio al 16 de agosto de 2007 y del 1 de junio al 31 de julio de 2010, para la calibración y validación respectivamente. Para la definición de dichos escenarios se efectúa considerando el valor de los caudales diarios, los que disponen en promedio una magnitud de caudales del entorno del promedio de la serie histórica de $5699 \text{ m}^3/\text{s}$ mencionado en la Tabla 3.4.

Una vez establecidos los límites temporales de los escenarios a ser simulados, para cada uno de los años asociados a los mismos, se solicitó a la DNH la serie anual de datos

horarios disponibles de niveles en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira. También se obtuvo información correspondiente a Boca Gualeguaychú, registrados por DNVN.

3.3.4. Análisis de información hidrológica horaria para los períodos seleccionados

A continuación se presentan los datos hidrológicos de cada período seleccionado, junto con la densidad de datos que se dispone, exceptuando el caso de Boca Gualeguaychú, el cual dispone de 100 % de densidad de datos, pero contempla solo una medición diaria a las 6 a.m. de cada día.

Los niveles se representan respecto al cero del modelo, establecido en 80cms por encima del cero Wharton, y en unidad metros.

Se comienza con la descripción del par de períodos de caudales bajos (uno para la etapa de calibración y otro para la validación), continuando con los pares de caudales medios y por último los altos. Se observa en los dos primeros pares una gran variabilidad de los caudales horarios, debido a la operación de la Represa en horarios picos de consumo.

A modo comparativo, se recuerda las magnitudes de los estadísticos de la serie de datos diarios en la Tabla 3.12, como fue presentado anteriormente en la Tabla 3.5, aunque esta vez los niveles se presentan considerando el cero de referencia del modelo, y no el cero Wharton como fue establecido oportunamente.

TABLA 3.12: Estadísticos de los datos hidrológicos diarios

Estadística	Caudal Represa (m ³ /s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Mínimo	193	-0.19	-0.10	-0.23
Máximo	29750	9.14	4.28	3.06
1° Cuartil	1795	1.26	0.83	0.68
Mediana	4159	2.03	1.19	0.93
3° Cuartil	8014	3.21	1.65	1.25
Media	5874	2.46	1.31	1.00

3.3.4.1. Períodos de caudales bajos

El par de períodos de caudales bajos, uno a ser utilizado en la etapa de calibración y el otro para la validación, presenta densidad de información hidrológica no del todo completa. El conjunto de datos de niveles en Nueva Palmira presenta 63 % de cantidad de datos en la ventana temporal correspondiente al escenario definido para la etapa de calibración. Esto se aprecia en la Tabla 3.13. El conjunto de datos de niveles horarios

en Fray Bentos, para el mismo escenario, solamente el 67 % es fiable según es expuesto más adelante.

TABLA 3.13: Densidad de información de niveles y caudales horarios en períodos de caudales bajos

Período	Porcentaje de de caudal Represa	Porcentaje de datos nivel Pdú	Porcentaje de datos nivel FB	Porcentaje de datos datos nivel NP
7/2-13/4/2008	100 %	99.90 %	67 %	63 %
22/9-21/11/2010	100 %	100 %	100 %	100 %

A partir de la Figura 3.8 es posible observar el comportamiento de las series de información hidrológica, en donde se esquematiza la serie de caudales horarios erogados por la Represa, y niveles horarios en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira. También se presentan los registros en Boca Gualeguaychú en dicha figura (un valor por día).

Una particularidad de la serie de caudales del período de calibración, como muestra la Figura 3.8, es la existencia de un lapso de tiempo con caudales relativamente más elevados, entre las horas 200 y 700 de la serie (15/2 al 7/3/2008), pero luego permanece en un caudal aproximadamente constante de unos $400\text{m}^3/\text{s}$. En este tramo posterior, se observan breves interrupciones intermitentes en la erogación del caudal por la Represa, por lo que en dichos momentos el caudal adopta valor cero. Estas interrupciones presentan un paso aproximadamente diario.

En cuanto a las series de niveles, las mismas presentan muy buena correlación en su evolución y se encuentran muy cercanas. Se observa que la curva de Nueva Palmira se reproduce en las curvas de Fray Bentos y de Paysandú, con una leve diferencia en sus niveles y con un desfase temporal. Por lo tanto, básicamente, las curvas de Fray Bentos y Paysandú equivalen a una traslación de la curva de Nueva Palmira hacia la derecha. En el lapso asociado a mayores caudales descrito anteriormente, además de la traslación se le suma un incremento en los niveles en Fray Bentos, y aún un poco más en Paysandú.

Esto se traduce en la clara influencia de marea proveniente del Río de la Plata en el río Uruguay, haciéndose visible la misma inclusive en la ciudad de Paysandú. E inclusive, aún en el lapso de caudales mayores de la serie, el forzante fluvial no es suficiente para atenuar la variación de los niveles reproducida por la influencia de marea.

Es importante advertir sin embargo la detección de errores en la serie de niveles de Fray Bentos. Esto se debe a que a partir de la hora 1077, dicha serie adopta valores sustantivamente inferiores a los de Nueva Palmira, lo que resulta físicamente imposible debido a las condiciones hidrológicas dadas sobre un lapso tan prolongado. Así pues, debido a

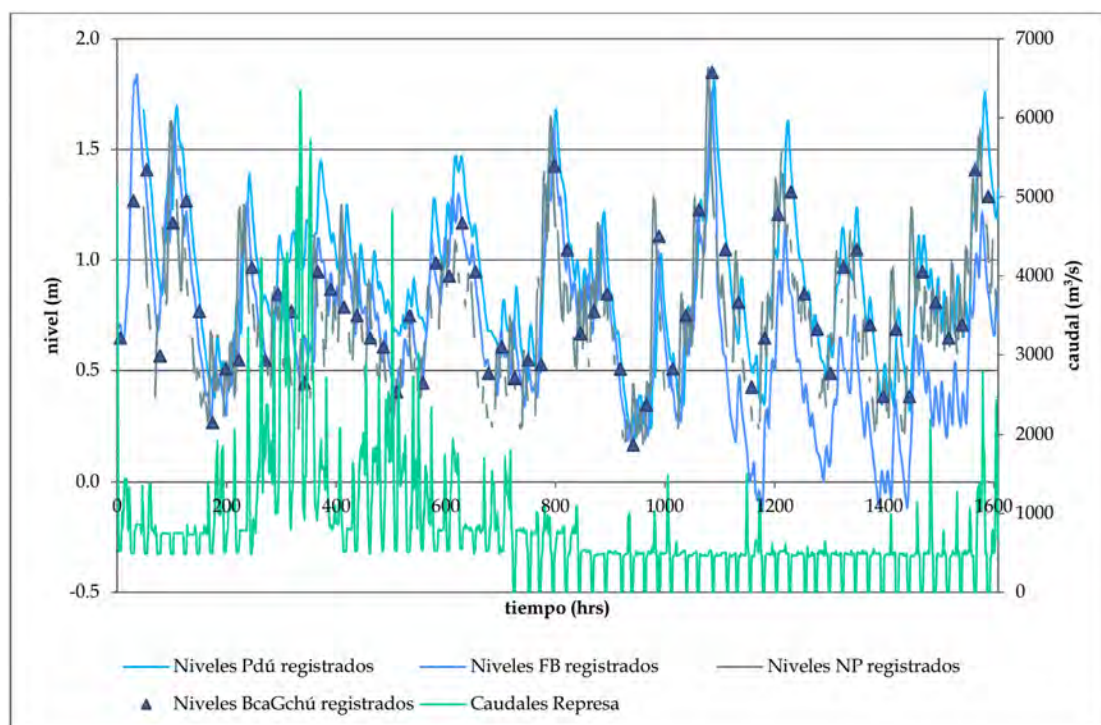
que los registros de Boca Gualeguaychú se encuentran relativamente más cercanos a la curva de Nueva Palmira que a la de Fray Bentos, es posible concluir que este último es el que presenta errores. Por ello, la serie de datos en Fray Bentos se reduce a un 67 % a modo de considerar solamente los datos confiables.

La Tabla 3.14 indica los valores mínimo, medio y máximo para los caudales de la Represa y los niveles en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira. El período temporal considerado para la obtención de estos valores es el de 7/2/2008 a 13/4/2008 para todos los casos, exceptuando para los niveles en Fray Bentos en que solamente se considera el tramo confiable de dicha serie temporal de acuerdo a lo mencionado antes.

TABLA 3.14: Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales bajos, etapa de calibración (7/2/2008-13/4/2008)

	Caudales Represa (m^3/s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Valor mínimo	0	0.20	0.16	0.15
Valor medio	838	0.92	0.78	0.77
Valor máximo	6354	1.93	1.84	1.96

FIGURA 3.8: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales bajos, etapa de calibración (7/2/2008-13/4/2008)



En cuanto al período seleccionado para la validación, el mismo cuenta con una densidad de información completa de los registros considerados. Comienza con valores elevados de caudales para luego ir atenuándolos a medida que se avanza en el tiempo. Asimismo,

la serie de caudales presenta variaciones en poco tiempo mucho más significativas que el caso anterior (Figura 3.9).

La disminución progresiva de caudales se ve acompañada de una reducción también progresiva en las diferencias entre las curvas de niveles de Paysandú y Fray Bentos, y entre Fray Bentos y Nueva Palmira, siendo de muy poca magnitud al final de la serie temporal.

Al comienzo de la serie el forzante fluvial domina el comportamiento de los niveles en Paysandú, no siendo así en Fray Bentos. Si bien el caudal erogado se encuentra dentro del tercer percentil de la serie de datos diarios, el nivel que ocurre en Nueva Palmira también pertenece al tercer percentil, por ello aquel no logra dominar sobre el efecto de marea en los niveles del río a la altura de Fray Bentos.

Al final de la serie, la influencia de marea se acentúa, acercando las curvas de niveles, al igual que el caso anterior.

Este patrón común a ambos períodos de caudales bajos, debido a la marcada influencia de la marea proveniente del Río de la Plata en los niveles a lo largo del río Uruguay, hace importante la densidad de información principalmente en Nueva Palmira. Debido a la presencia de marea astronómica, de carácter semidiurna, se requiere disponer de buena cantidad de datos posibilitando la representatividad de las variaciones ocasionada por la misma.

El rango de niveles en Nueva Palmira de esta serie temporal de validación es mayor que para la etapa de calibración (Tabla 3.15). También, el valor mínimo de la serie es menor al valor mínimo -0.23m identificado en la serie histórica de datos diarios, presentado anteriormente en la Tabla 3.12.

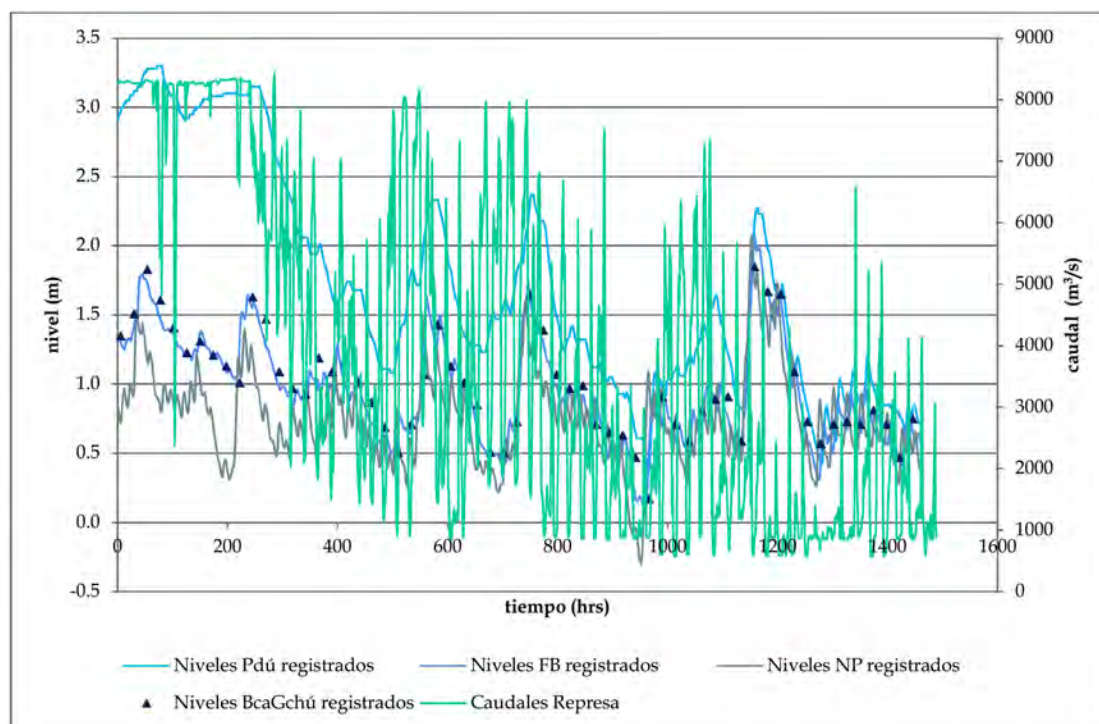
TABLA 3.15: Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales bajos, etapa de validación (22/9/2010-21/11/2010)

	Caudales Represa (m^3/s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Valor mínimo	563	0.37	0.06	-0.30
Valor medio	3871	1.71	0.95	0.76
Valor máximo	8433	3.30	2.07	2.07

3.3.4.2. Períodos de caudales medios

En ambos períodos de caudales medios se repite el importante ruido en la serie de caudales, debido a la gran variación temporal en los registros horarios ocasionada por la operación de la Represa. Esto se observa en las Figuras 3.10 y 3.12.

FIGURA 3.9: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales bajos, etapa de validación (22/9/2010-21/11/2010)



Asimismo, en ambos casos se cuenta con información incompleta en Nueva Palmira, siendo del entorno del 50 % (Tabla 3.16).

TABLA 3.16: Densidad de información de niveles y caudales horarios en períodos de caudales medios

Período	Porcentaje de de caudal Represa	Porcentaje de datos nivel Pdú	Porcentaje de datos nivel FB	Porcentaje de datos datos nivel NP
16/6-13/8/2007	100 %	100 %	100 %	45 %
1/6-31/7/2008	100 %	100 %	81 %	56 %

En las Tablas 3.17 y 3.18 se indican los valores mínimo, máximo y promedio de las series temporales para caudales medios, tanto para caudales en la Represa como para los niveles en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira.

En las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se presentan las series temporales de niveles en los puntos de medición: Paysandú, Fray Bentos, Boca Gualaguaychú y Nueva Palmira. Se observan similitudes en cuanto al comportamiento de las mismas. Las curvas de nivel en Paysandú, en general, se encuentran más separadas respecto a las curvas de Fray Bentos y Nueva Palmira que para el caso de caudales bajos, debido a que los caudales son superiores. Sin embargo, ocasionalmente pueden presentar algún acercamiento puntual, como se

visualiza en el tramo entre las 500 y 600 horas del período de calibración y en el entorno de las 1200 y las 1300 horas del de validación. En ambos casos Fray Bentos presenta gran similitud con la curva de Nueva Palmira. Sin embargo en Paysandú, si bien la evolución de la curva presenta un comportamiento similar a la de Nueva Palmira, las variaciones de niveles de alta frecuencia traducidas por el efecto de marea son sensiblemente atenuadas.

En cuanto al período seleccionado para la validación, se observa inconsistencia entre la curva de niveles de Fray Bentos y Nueva Palmira en el tramo inicial: desde el comienzo de ambas series hasta la hora 285 (21hrs del 12/06/2008). Al igual que el escenario de caudales bajos también para la calibración, los niveles en Fray Bentos se encuentran sustantivamente por debajo de la curva de Nueva Palmira. Debido a que los registros de Boca Gualeguaychú se encuentran relativamente más cercanos a la curva de Nueva Palmira que a la de Fray Bentos, se extrae que este último es el que presenta errores. Por ello, se considera fiable solamente el 81 % de la serie en Fray Bentos.

La Tabla 3.17 indica los valores mínimo, medio y máximo para los caudales de la Represa y los niveles en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira. El período temporal considerado para la obtención de estos valores es el de 16/6/2007 a 13/8/2007 para todos los casos, exceptuando para los niveles en Fray Bentos en que solamente se considera el tramo confiable de dicha serie temporal.

TABLA 3.17: Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales medios, etapa de calibración (16/6/2007-13/8/2007)

	Caudales Represa (m^3/s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Valor mínimo	513	0.95	0.44	0.27
Valor medio	4439	1.98	1.06	0.84
Valor máximo	8102	3.20	2.00	1.77

TABLA 3.18: Información hidrológica de niveles del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de validación (1/6/2008-31/7/2008)

	Caudales Represa (m^3/s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Valor mínimo	0	0.78	0.31	0.14
Valor medio	3916	1.60	0.89	0.73
Valor máximo	8163	3.05	2.28	1.95

3.3.4.3. Períodos de caudales altos

En ambas series de caudales altos, como es posible observar de las Figuras 3.14 y 3.15, las variaciones horarias de caudal son significativamente inferiores a los casos antes

FIGURA 3.10: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de calibración (16/6/2007-13/8/2007)

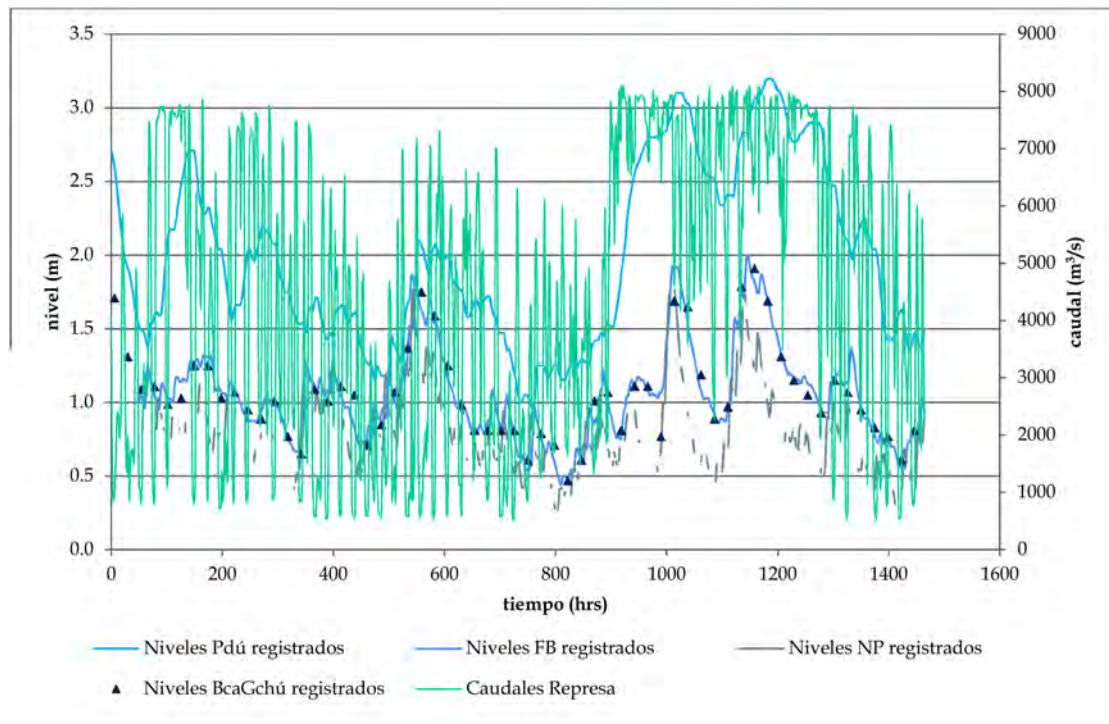


FIGURA 3.11: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de calibración (16/6/2007-13/8/2007)

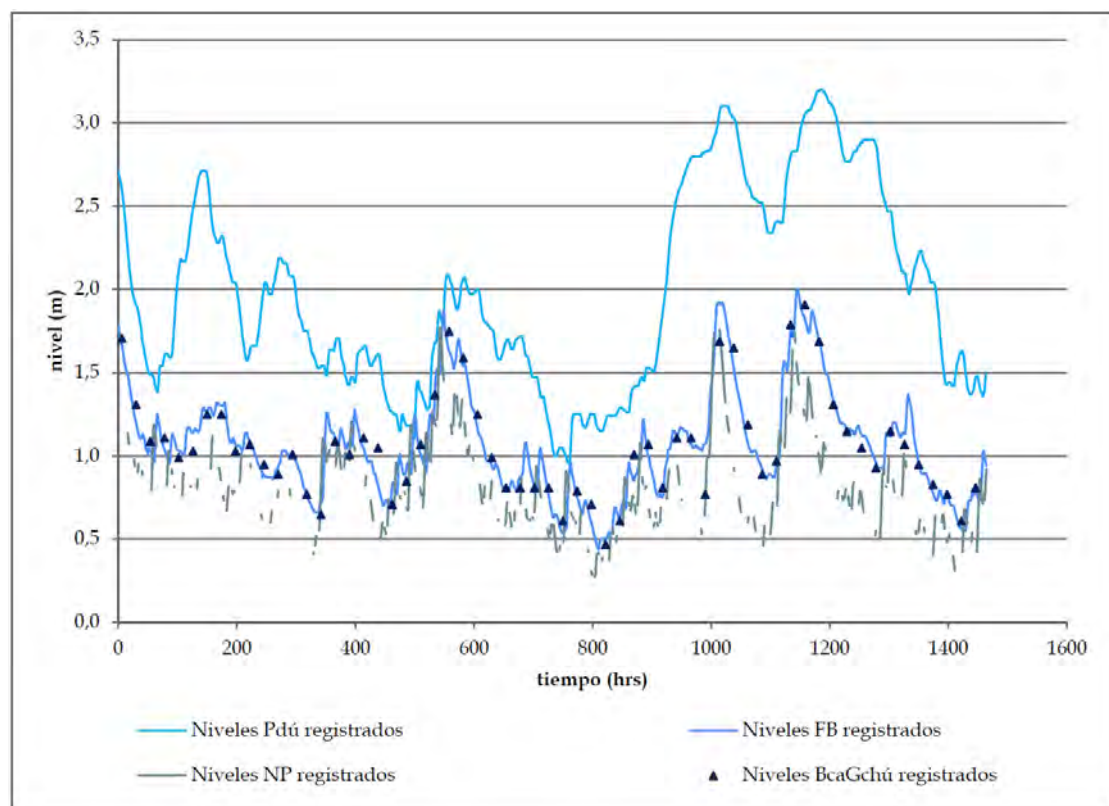


FIGURA 3.12: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de validación (1/6/2008-31/7/2008)

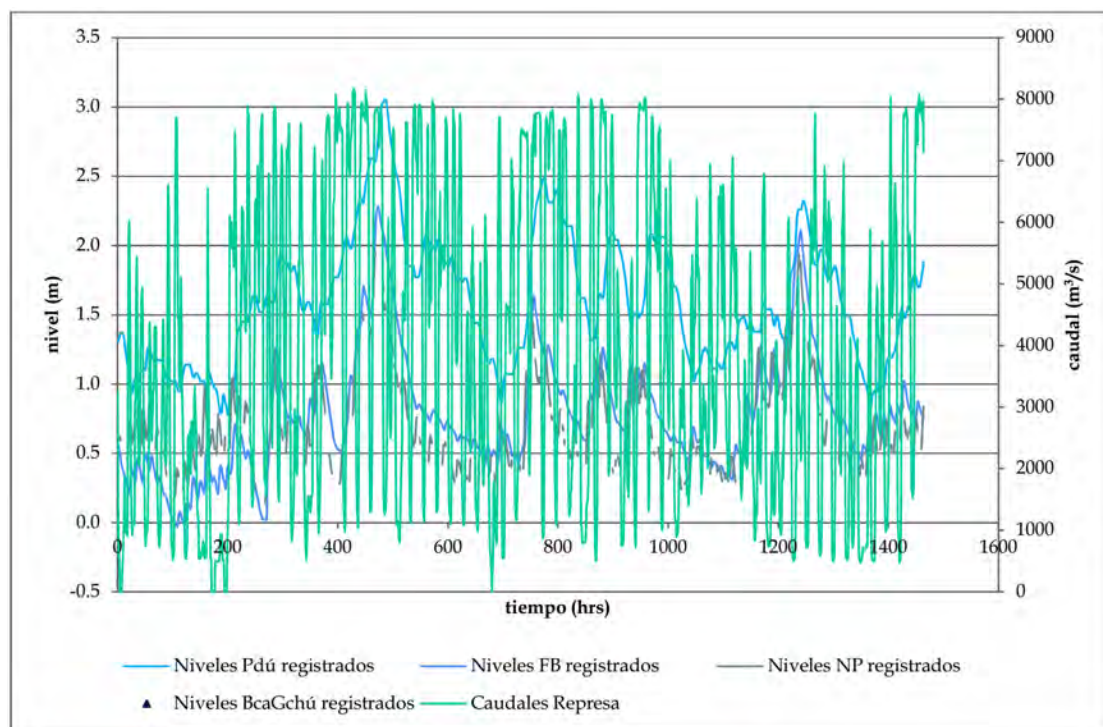
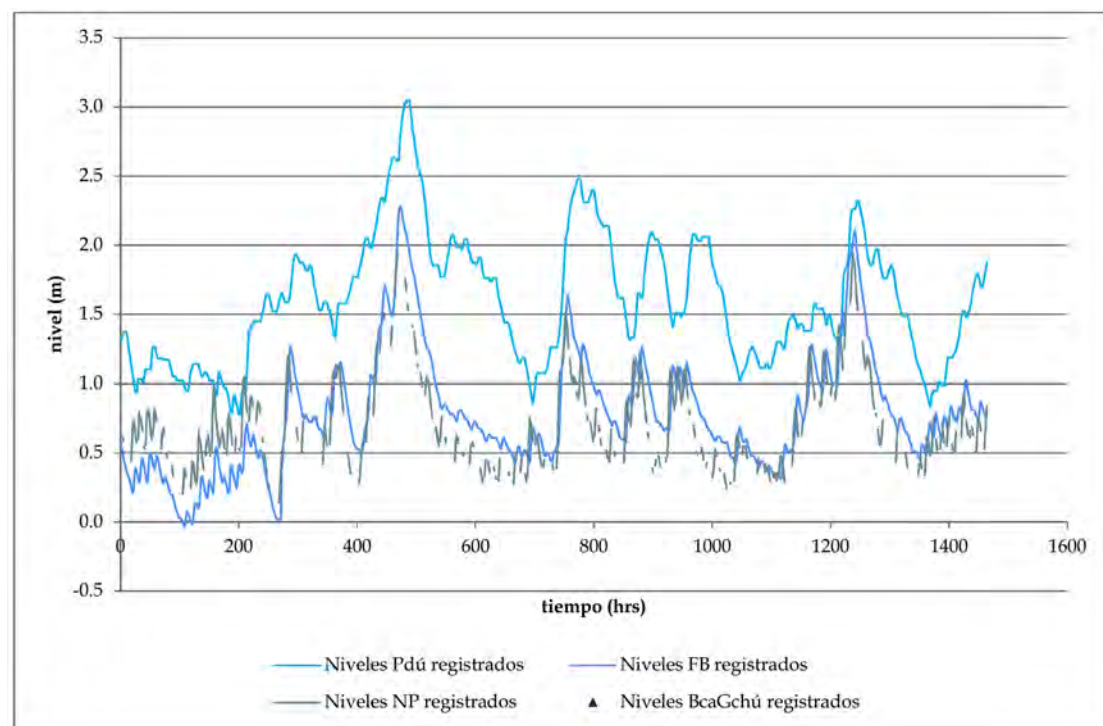


FIGURA 3.13: Información hidrológica de niveles del período de simulación para escenario de caudales medios, etapa de validación (1/6/2008-31/7/2008)



mostrados, seguramente debido a la gran acumulación de volumen de agua almacenado por la Represa, e inclusive en ambos casos se superan valores de caudal de $20000\text{m}^3/\text{s}$.

Al igual que los casos anteriores, en las Tablas 3.20 y 3.21 se indican los valores mínimo, máximo y promedio de las series temporales para caudales altos, tanto para caudales como para los niveles en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira.

Para el primer caso que se presenta (Figura 3.14), asociado a la etapa de calibración, la serie de caudales se inicia con un gran incremento, desde unos 17000 hasta superar $25000\text{m}^3/\text{s}$. Luego de esta pendiente positiva, prácticamente se mantiene por unas 600 horas (25 días) para luego decrecer en unos 8 días más de $15000\text{m}^3/\text{s}$. La gran magnitud del caudal que predomina en la serie ocasiona que Fray Bentos y Paysandú sean prácticamente inmunes al efecto de marea por parte de Nueva Palmira.

TABLA 3.19: Densidad de información de niveles y caudales horarios en períodos de caudales altos

Período	Porcentaje de de caudal Represa	Porcentaje de datos nivel Pdú	Porcentaje de datos nivel FB	Porcentaje de datos datos nivel NP
12/10-30/11/1997	100 %	100 %	100 %	96 %
1/09-31/10/2002	100 %	100 %	47 %	100 %

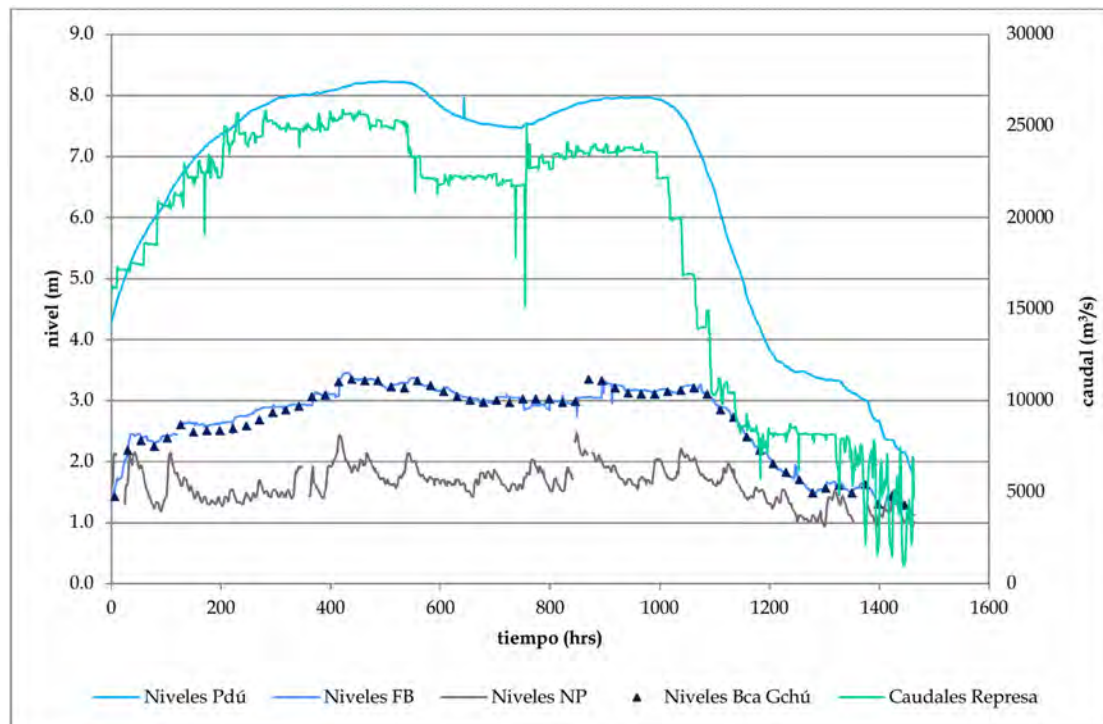
TABLA 3.20: Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales altos, etapa de calibración (12/10/1997-30/11/1997)

	Caudales Represa (m^3/s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Valor mínimo	1016	1.79	1.13	0.92
Valor medio	18714	6.54	2.68	1.63
Valor máximo	25890	8.23	3.46	2.48

Diferenciándose del anterior, el período de caudales altos para la etapa de validación comienza con caudales bajos para luego ir incrementándolos con dos grandes ondas (Figura 3.15). Si bien coincide con el caso recién expuesto de no reproducir la influencia de marea en los niveles de Fray Bentos y Paysandú, se observa que las tres curvas de niveles, inclusive Nueva Palmira, reproducen una tendencia positiva al crecimiento del caudal.

No obstante, Nueva Palmira presenta desviaciones de niveles respecto a la tendencia, las cuales se corresponden con el efecto de marea. Esto último significa que en dicho punto del río, la acción del forzante fluvial no logra eliminar completamente el efecto de marea proveniente del Río de la Plata aún en esta condición de caudales muy altos.

FIGURA 3.14: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales altos, etapa de calibración (12/10/1997-30/11/1997)



Dicha influencia se encuentra conformada por marea meteorológica y astronómica, lo que es posible inferir al observar las Figuras 3.14 y 3.15, en donde ambas series de Nueva Palmira disponen de prácticamente una densidad de información completa. Las variaciones de nivel de pequeña magnitud se corresponderían con el efecto de marea astronómica y las perturbaciones de mayor magnitud a la marea meteorológica.

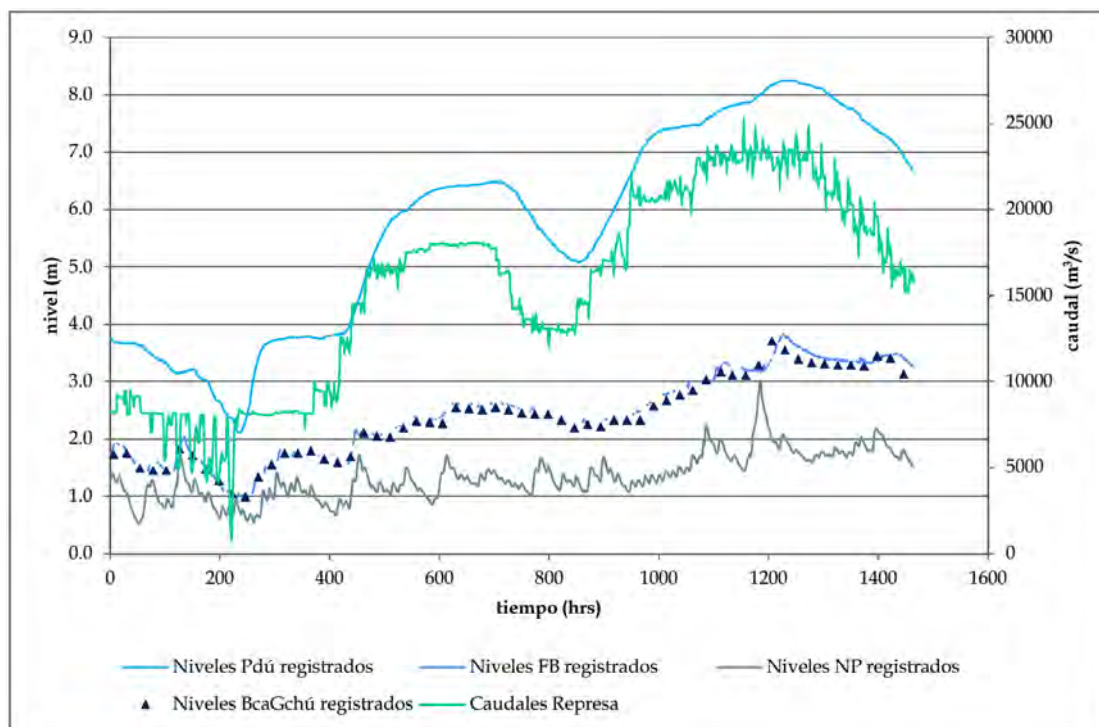
TABLA 3.21: Valores mínimos, medios y máximos de la serie de datos horarios para el período de caudales altos, etapa de validación (1/09/2002-31/10/2002)

	Caudales Represa (m ³ /s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Valor mínimo	752	2.11	0.98	0.52
Valor medio	15436	5.74	2.61	1.35
Valor máximo	25339	8.25	3.83	3.01

3.3.4.4. Conclusiones

A partir de los escenarios presentados y descritos precedentemente, se observa gran variación horaria en los valores de caudales erogados por la Represa, particularmente en los escenarios de caudales bajos como medios.

FIGURA 3.15: Información hidrológica del período de simulación para escenario de caudales altos, etapa de validación (1/09/2002-31/10/2002)



Al efectuar un análisis visual de las curvas de registros de niveles disponibles en Paysandú, Fray Bentos, Nueva Palmira y Boca Gualaguaychú, es posible anticipar inconsistencias puntuales en los registros de Fray Bentos en algunos de los períodos temporales seleccionados. Uno de ellos es el escenario de caudales bajos de la etapa de calibración, y el otro el escenario de caudales medios de la etapa de validación.

Se observa que los registros de Boca Gualaguaychú acompañan el comportamiento de los registros de Fray Bentos en todos los escenarios. Por ello, la evolución de ambas curvas de datos reales son muy similares.

Por último se destaca la gran influencia del Río de la Plata, traducida en los niveles de Nueva Palmira. La misma puede llegar a afectar los niveles en Paysandú y Fray Bentos en caudales bajos, Fray Bentos en caudales medios, ó restringirse únicamente a Nueva Palmira en caudales altos.

En este último caso, gracias a la completitud en los datos de niveles en Nueva Palmira, se observa claramente las componentes de marea meteorológica y astronómica proveniente del Río de la Plata.

En este contexto, es importante el rango de niveles en Nueva Palmira y Fray Bentos para los escenarios seleccionados. En Nueva Palmira se encuentra comprendido entre

0.50 y 2.87m para caudales bajos, 0.94 y 2.75m para caudales medios y 1.32 y 3.81m para el caudales altos. Para el caso de Fray Bentos, se encuentra comprendido entre 0.86 y 2.87m en para caudales bajos, 1.11 y 3.08m para caudales medios y 1.78 y 4.63m para el caudales altos. Todos los niveles son respecto al cero de referencia Wharton.

Capítulo 4

Batimetría

4.1. Introducción

Como se anticipa en el Capítulo 1 titulado Introducción, la obtención de la batimetría como insumo para la implementación del modelo conllevó tareas de recopilación y procesamiento de información que no estaban previstas inicialmente. Esto se debió a dos razones: 1) el dominio de simulación resultó de mayor extensión a la zona inmediata a la planta de celulosa UPM, por lo que se requirió mayor cantidad de información a la inicialmente prevista, y 2) la información batimétrica disponible resultó en un abanico de conjuntos de datos con diferencias en su densidad, cero de referencia y sistema de coordenadas, así como también en el formato en que se recibió la información. A seguir se presenta una introducción a los inconvenientes encontrados seguidos con una profundización de la metodología implementada en el siguiente punto.

Inicialmente, se realizaron gestiones ante diferentes organismos de forma de obtener información batimétrica. Los organismos que disponen de relevamiento batimétrico parcial o total del río Uruguay son: el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) del lado uruguayo; la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN) del lado argentino; y en cuanto a organismos binacionales se cuenta con la CARU.

Con la facilitación por parte del SOHMA se accedió a información batimétrica muy útil, a pesar que estuvo limitada a un tramo de longitud de 30km del río en las inmediaciones de UPM y Fray Bentos.

Asimismo, si bien la CARU ha rechazado la solicitud de cualquier información referente al río Uruguay, la Delegación Uruguaya ha puesto a disposición documentación disponible en la Cancillería Uruguaya. Así se accedió a un croquis elaborado por el SHN (2009)

que contiene curvas batimétricas del río, junto con puntos relevados por la DNVN en el canal de navegación principal y un atlas del río Uruguay elaborado por el SOHMA.

Estos dos conjuntos de datos se vinculan con información en el cauce del río, por lo que fue necesario adicionar información batimétrica asociada a las planicies del río utilizando información satelital de libre acceso.

Por lo tanto, las diferentes fuentes de información fueron: topografía obtenida a partir de imágenes satelitales, curvas de nivel batimétricas del Croquis del SHN, puntos batimétricos de la zona de UPM brindados por el SOHMA y puntos de relevamiento efectuado por la DNVN en el canal principal de navegación.

Esta conjunción de fuentes de información de diferentes características trajo asociado trabajos de digitalización, transformación de sistemas de coordenadas, transformación de ceros de referencia, comparación con otras fuentes de información y también modificación manual de la información. A continuación se desarrolla las características de la información accedida, la metodología implementada y los resultados obtenidos. Se presenta primero los conjuntos de información asociados al cauce del río Uruguay y por último la información satelital utilizada para las planicies del mismo.

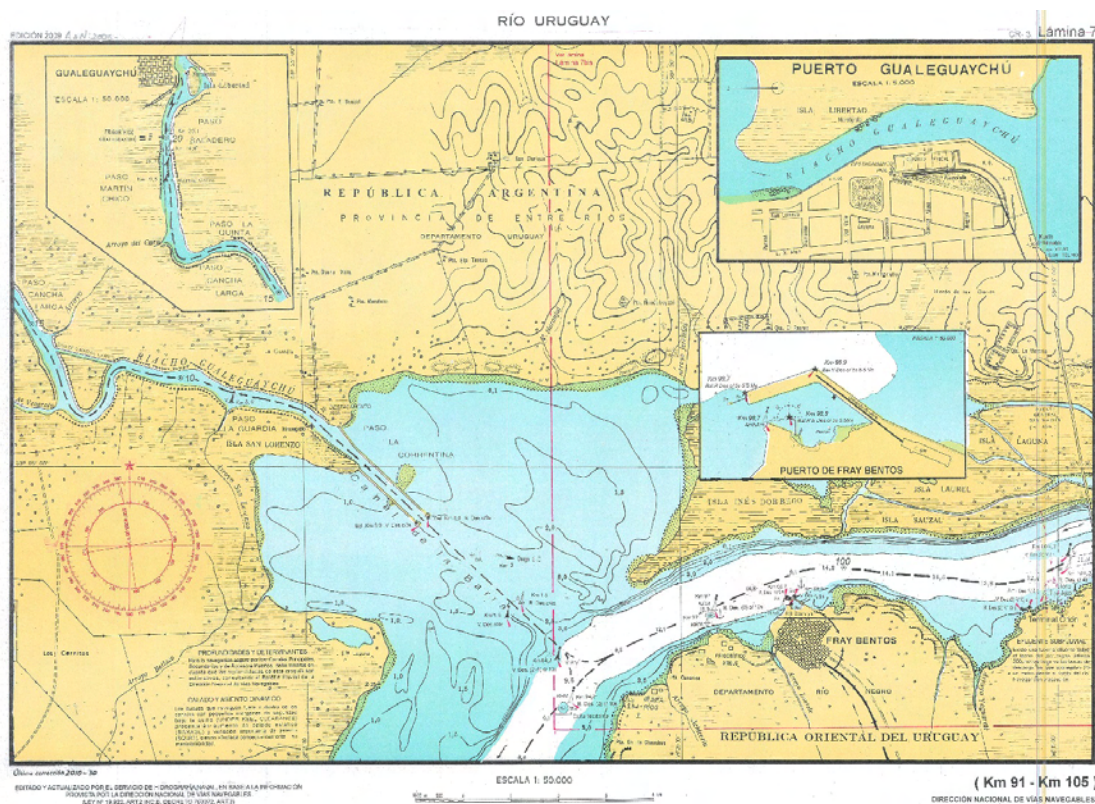
4.2. Curvas de nivel batimétricas

Dentro la información facilitada por la Delegación Uruguaya ante la CARU, se encuentran el documento Croquis de los Ríos: río Uruguay (Edición 2009, SHN), el cual contiene láminas de planos con curvas de nivel batimétricas en escala 1:50.000.

El documento se constituye de 21 láminas extendiéndose desde Punta Gorda (Km0) hasta prácticamente la Represa de Salto Grande (aguas arriba del km330). Sin embargo, solamente 6 láminas se utilizan debido a que son las que se cuenta con densidad de información adecuada. Estas láminas seleccionadas comprenden el tramo entre las progresivas 14.3 y 105km a lo largo del eje del río, en donde las curvas de nivel batimétricas se extienden de orilla a orilla, exceptuando el canal de navegación, y se presentan con discretización de un metro o medio metro de altura según las características de la zona. La Figura 4.1 presenta una de las láminas, la cual es el extremo superior seleccionado correspondiente a la zona aledaña a UPM y Fray Bentos.

El formato en que esta documentación se presenta implicó un procesamiento laborioso de la información para obtenerla en formato compatible y ser utilizado para la conformación de la batimetría del modelo. Esta documentación fue otorgada en versión papel,

FIGURA 4.1: Ejemplo de láminas de los croquis elaborados por SHN (2009)



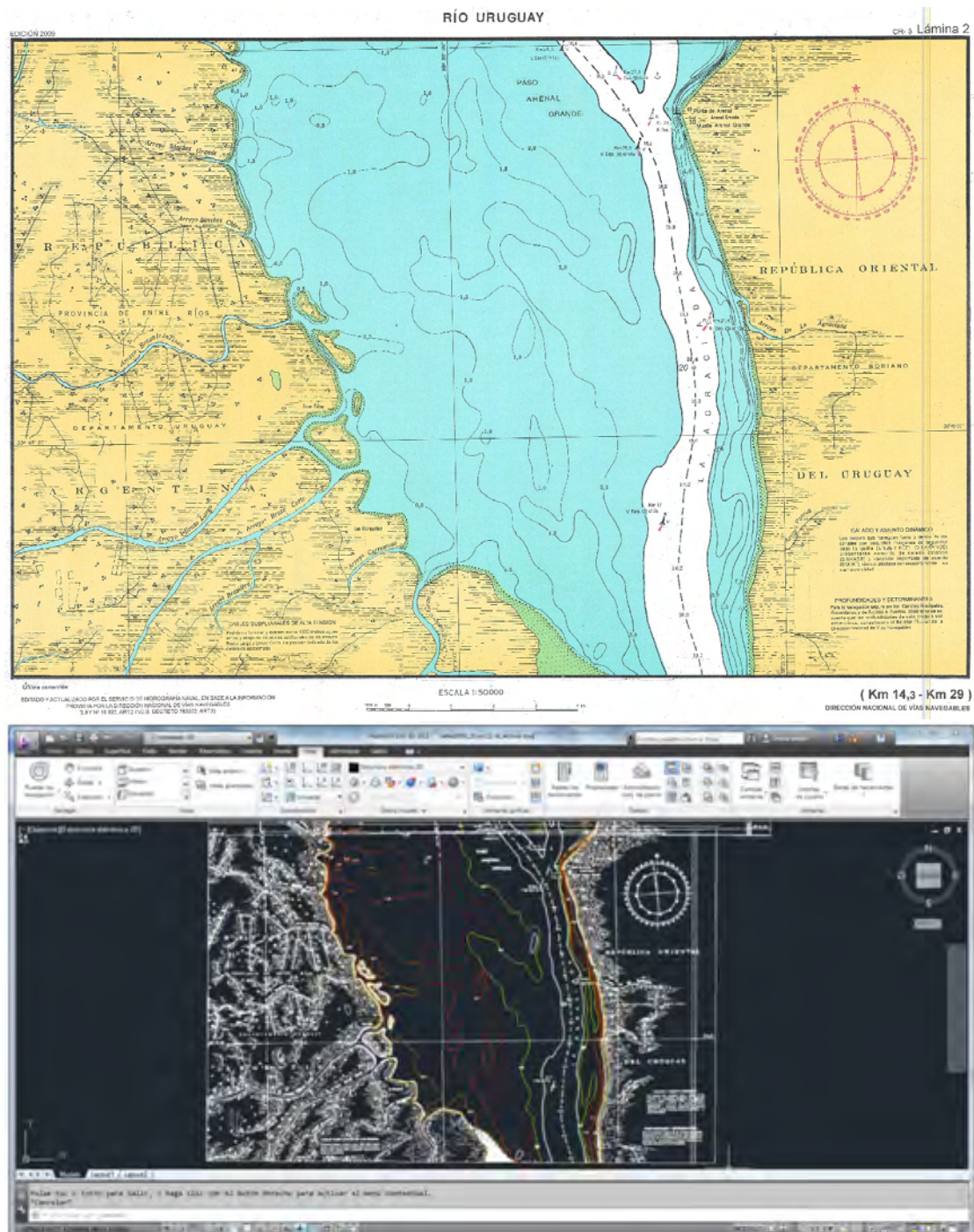
por lo que fue necesario la digitalización en alta definición. Una vez obtenidas las imágenes escaneadas, para disponer de las curvas en campo vectorial, fue necesario trabajar con el software Civil CAD 2013 y su herramienta Raster. La Figura 4.2 presenta un antes y después del procesamiento efectuado: en el panel superior se presenta la lámina correspondiente a la zona final del dominio en su versión original, y en el panel inferior se presenta la misma lámina luego de efectuada la vectorización, visualizando las curvas de nivel en diferentes colores.

Es importante aclarar que en estas cartas de curvas de nivel no se mencionan explícitamente ni el sistema de coordenadas a la cual se asocia la información ni tampoco el cero de referencia respecto al cual se establecieron las cotas de las curvas de nivel. Para ello se efectuó una comparación con la información brindada por el SOHMA, lo que implicó un corrimiento espacial pero ninguna modificación en las cotas de las curvas de nivel.

4.3. Puntos batimétricos en las inmediaciones de UPM

Como fue anticipado anteriormente, el SOHMA brindó información batimétrica en un tramo del río Uruguay, de longitud aproximada de 30km en dirección del eje del mismo.

FIGURA 4.2: Procesamiento de planos SHN (2009): información original (arriba) y resultado luego de efectuar el procesamiento de vectorización (abajo)

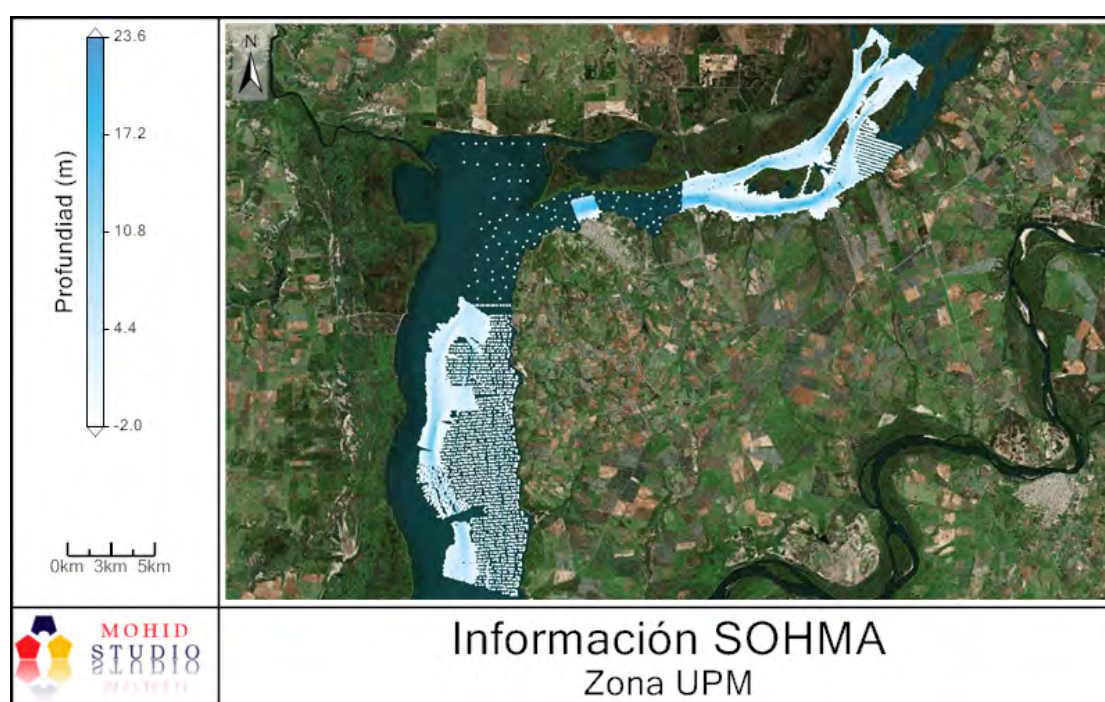


La Figura 4.3 esquematiza los puntos batimétricos accedidos.

Los puntos fueron entregados en un archivo compatible con el software utilizado, por lo que únicamente fue necesario efectuar el cambio de coordenadas de los mismos: de proyección UTM-21S respecto al sistema WGS84 a coordenadas geográficas respecto al mismo sistema.

La densidad de los puntos es variable, identificándose zonas vacías de información, por lo que para complementarla se adicionó los datos provenientes del resto de la información batimétrica accedida.

FIGURA 4.3: Información batimétrica del cauce del río Uruguay brindada por SOHMA



4.4. Puntos batimétricos del canal de navegación

Facilitado también por la Delegación Uruguaya ante la CARU, se dispuso de puntos batimétricos relevados en julio del 2006 por la DNVN de Argentina. Los mismos constituyen un relevamiento al canal de navegación del río Uruguay en el tramo comprendido entre Punta Gorda (progresiva 0km) y la progresiva 187.1km, pocos kilómetros aguas abajo de la isla Almirón y un poco menos de 10km aguas abajo de la ciudad de Paysandú. En total se compuso de 29 planos de longitudes de información variables.

Debido a que esta información comprende únicamente el canal principal, no contiene información respecto a otros brazos que pudiera tener el río.

El sistema de proyección de coordenadas es la faja 6 del sistema POSGAR 94 (POSiciones Geodésicas ARGENTINAS), y el cero de referencia de los planos va variando en función de la progresiva del tramo del río. Es decir, se efectúa la interpolación entre los ceros de referencia entre los cuales se ubica el tramo considerado, como se presenta en la Tabla 4.1.

La información fue provista en forma digital, en formato *.CAD, con la ubicación de los puntos relevados en planta acompañados de la cota de relevamiento presentado como texto. Por ello, se tuvo que asignar a cada punto su correspondiente cota, conformando puntos tridimensionales con coordenadas (x, y, z) .

Los planos procesados fueron los comprendidos entre las progresivas 0 y 80km, junto con los correspondientes al tramo entre progresivas 111,9km y 147,1km. El tramo entre las progresivas 80km y 111,9 no fue incluido ya que se cuenta con información del SOHMA, según se expuso en el punto anterior, siendo ésta más densa.

No se consideró relevante procesar hacia aguas arriba de la progresiva 147,1km (aproximadamente 20km aguas arriba de Nuevo Berlín y unos 15km aguas abajo de San Javier), debido a que el río se ramifica en varios brazos perdiendo sentido el disponer únicamente información detallada en el canal de navegación y representar los restantes sectores con información de calidad sensiblemente inferior. Asimismo, este límite superior se encuentra a unos 40 kilómetros de la planta UPM, lo que se considera una distancia prudencial en cuanto a la disponibilidad de información confiable en las inmediaciones de ésta.

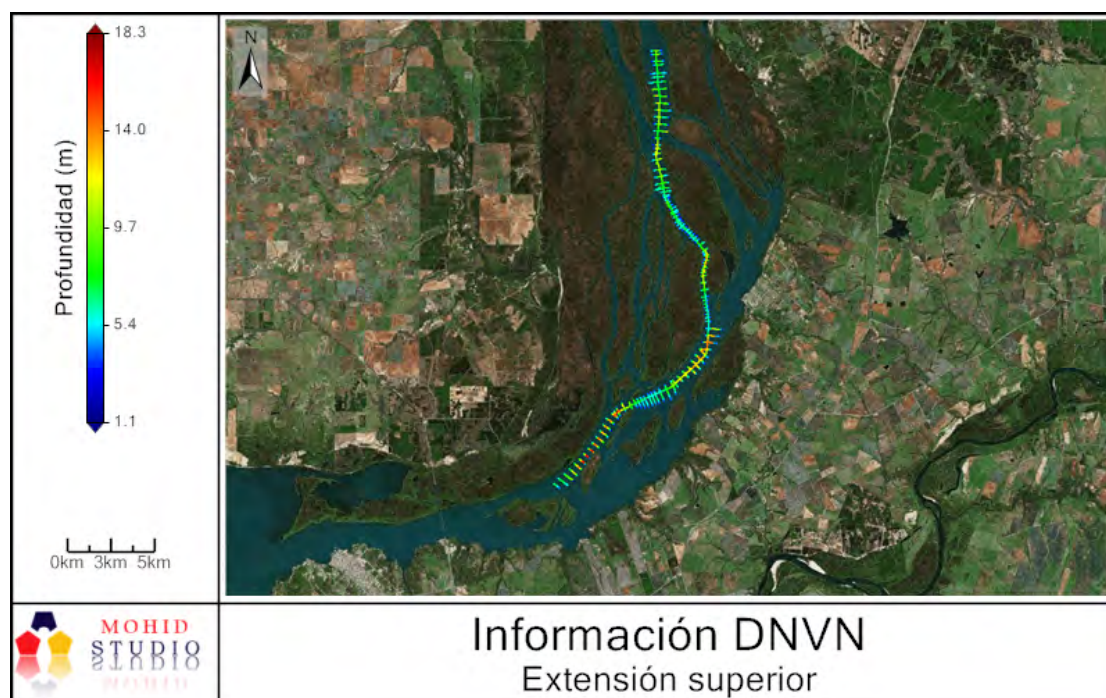
Una vez se obtuvo la serie de puntos de los planos mencionados, se les efectuó el cambio de coordenadas al sistema geográfico WGS84 para así poder utilizarla para el cálculo de la malla del modelo a implementar. En cuanto a las cotas, las mismas fueron fácilmente convertidas al cero de referencia del modelo.

Los datos obtenidos son importantes a modo de contar con información batimétrica. En primer lugar, en el tramo comprendido entre la progresiva 0 y 14.3km brinda información del canal de navegación. Este tramo no estaba incluido en la información del Croquis del SHN. En segundo lugar, complementa la información batimétrica en el tramo desde la progresiva 14.3km y el límite inferior de la zona con información brindada por el SOHMA. Pues, el Croquis del SHN no incluye información batimétrica suficiente de la zona del canal de navegación. Por último, extiende el tramo conformado con información confiable desde el extremo superior de la zona con datos de SOHMA hasta la progresiva 147km. La Figura 4.4 presenta este último caso en donde se visualiza la zona del tramo del río con información.

TABLA 4.1: Ceros de referencia de los planos batimétricos de la DNVN

Nº	Tramo	Cero de referencia
1	Km 000,000 al Km 008,600	Puerto Nueva Palmira (R.O.U.)
2	Km 008,600 al Km 017,000	Puerto Nueva Palmira (R.O.U.)
3	Km 017,000 al Km 021,400)	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
4	Km 021,400 al Km 025,600	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
5	Km 025,600 al Km 030,400	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
6	Km 030,400 al Km 039,700	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
7	Km 039,700 al Km 041,300	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
8	Km 041,300 al Km 046,400	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
9	km 046,400 al Km 049,800	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
10	Km 049,800 al Km 055,600	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
11	Km 055,600 al Km 058,700	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
12	Km 058,700 al Km 064,600	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
13	Km 064,600 al Km 070,300	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
14	Km 070,300 al Km 080,000	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
15	Km 080,000 al km 089,300	interpolada entre Puerto Nueva Palmira (R.O.U.) y Boca del Río Gualeguaychú (R.A.)
16	Km 089,300 al Km 094,300	Puerto Boca Río Gualeguaychú
17	Km 094,300 al Km 104,200	Puerto Boca Río Gualeguaychú
18	Km 104,200 al Km 111,900	Referidas al Cero del Puerto Boca Río Gualeguaychú
19	Km 111,900 al Km 117,800	la interpolada entre Puerto Boca Río Gualeguaychú y Puerto Campichuelo
20	Km 117,800 al Km 121,800	la interpolada entre Puerto Boca Río Gualeguaychú y Puerto Campichuelo
21	Km 121,800 al Km 128,400	la interpolada entre Puerto Boca Río Gualeguaychú y Puerto Campichuelo
22	Km 128,400 al Km 133,600	la interpolada entre Puerto Boca Río Gualeguaychú y Puerto Campichuelo
23	Km 133,600 al Km 141,700	la interpolada entre Puerto Boca Río Gualeguaychú y Puerto Campichuelo
24	Km 141,700 al Km 147,100	la interpolada entre Puerto Boca Río Gualeguaychú y Puerto Campichuelo
25	Km 147,100 al Km 155,800	Puerto Campichuelo
26	Km 155,800 al Km 165,600	Puerto Campichuelo
27	Km 165,600 al Km 170,600	Puerto Campichuelo
28	Km 170,600 al Km 179,900	la interpolada entre Puerto de Concepción del Uruguay y Puerto Campichuelo
29	Km 179,900 al Km 187,100	Puerto de Concepción del Uruguay

FIGURA 4.4: Datos procesados de planos elaborados por DNVN (2006)



4.5. Atlas del río Uruguay

El Atlas del río Uruguay, elaborado por el SOHMA, se compone de información de relevamientos efectuados tanto por el SOHMA como por el SHN, entre los años 1996 y 1999. Contiene curvas de nivel y puntos dispersos con cota del fondo del río.

El tramo del río contemplado en el mismo es desde Nueva Palmira hasta la ciudad de Colón, ubicada en el lado argentino, conformando 12 cartas en total. Seis de las cartas describen información en el tramo desde Fray Bentos hasta Colón, y las restantes el tramo inferior desde Fray Bentos hasta Nueva Palmira.

Posee puntos todo a lo ancho del río en el tramo de las seis cartas superiores exceptuando algunos ramales hacia el lado argentino. Aguas abajo de dicho tramo se dispone únicamente desde la orilla uruguaya hasta el límite del canal de navegación más próximo a Argentina.

Las coordenadas utilizadas son con el *datum* horizontal del sistema WGS84, y las profundidades, expresadas en metros, se refieren a diferentes ceros de referencia, variando en función del puerto más cercano.

Para el caso de las seis láminas del tramo superior, se consideran planos relacionados con el cero de la escala del Puerto de Fray Bentos y con el de Paysandú. Para las tres láminas cercanas a Fray Bentos, se utiliza un plano ubicado a +0.32m del cero de la

escala de mareas del Puerto de dicha ciudad (+0.07m del cero del nivel hidrográfico del modelo). Para las restantes tres, sus profundidades se establecen según un plano que coincide con el cero de la escala del puerto de Paysandú (+0.22m por encima del cero del modelo).

Este Atlas contiene la información batimétrica en imágenes digitalizadas, lo que hace que no sea fácilmente extraíble para su utilización. Si bien esta información no fue procesada, se la contempló para obtener estimaciones de profundidad en los tramos no accesibles a través de las otras fuentes. Esto fue para complementar los datos relevados por DNVN (2006) hasta la progresiva 147km del río, y además, para extender la batimetría desde esta progresiva hasta Colón.

En la Figura 4.5 se presenta una de las láminas del conjunto de planos incluidos en el Atlas consultado. A partir de la misma es posible notar que los ramales del lado argentino no cuentan con información completa, por lo que se omitirán los mismos del dominio del modelo. Esto se basa en que ya se cuenta con una distancia considerable respecto a la planta UPM, por lo que simplificaciones en la morfología del cauce seguramente no ocasionen grandes disturbios en la hidrodinámica en la zona aledaña a dicha planta, y por lo tanto, en el comportamiento de los contaminantes.

4.6. Imágenes satelitales

Las fuentes precedentes brindan información respecto al cauce del río Uruguay pero no incluyen información respecto a las planicies de inundación. Por ello, debe recurrirse a imágenes satelitales de dominio público. Se utilizaron las obtenidas a partir de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), dirigido por National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y adquiridas en el año 2000. Las mismas son del grupo denominado SRTM3 y disponen de cotas asociadas a cuadrados geográficos de lado 90 metros aproximadamente (arcos de 3 segundos). El sistema de coordenadas de esta información se corresponde con coordenadas geográficas según el Sistema Geodésico Internacional de 1984 (WGS84, según sus siglas en inglés). Las elevaciones se encuentran expresadas en metros, con *datum* vertical el Nivel Medio del Mar determinado con el geoide Earth Gravitational Model 1996. Dichas elevaciones son números enteros, lo que significa que no se dispone de precisión decimal.

La información SRTM se encuentra organizada en mosaicos cuadrados de 1 grado de latitud y longitud. Fueron consultados los mosaicos S33W058, S33W059, y S34W059 ¹ en su versión 2 (banco de datos de la USGS de Estados Unidos).

Sin embargo, debe aclararse que como toda información satelital, ésta puede disponer de errores o falencias o zonas de ausencia de información. Particularmente, en la zona de estudio se identificaron dos inconvenientes al momento de implementar esta información. El primero es la no inclusión de información batimétrica de lechos de cuerpos de agua, debido a la capacidad del agua de absorber las ondas emitidas por el radar. Sin embargo, se obtiene una elevación “media” del nivel de agua.

Y como segundo punto a contemplar, es el “ruido” presente en las riberas de los cauces, en zonas meandrosas o en las que existen pequeños almacenamientos de agua. La Figura 4.6 esquematiza ambas características negativas identificadas. Es posible visualizar el ruido de las zonas aledañas a la planta UPM (izquierda) y un tramo del delta aluvial del río, ubicado aguas arriba de la anterior (derecha).

Estos errores fueron detectados a nivel general por la organización que brinda esta información, editando una versión 2.1 posterior a la versión 2 en la que se implementaron metodologías científicas para reducir los mismos. Sin embargo, a partir de efectuar una comparación de ambas versiones de datos en la zona de análisis de este proyecto, no se identificaron diferencias para la última versión.

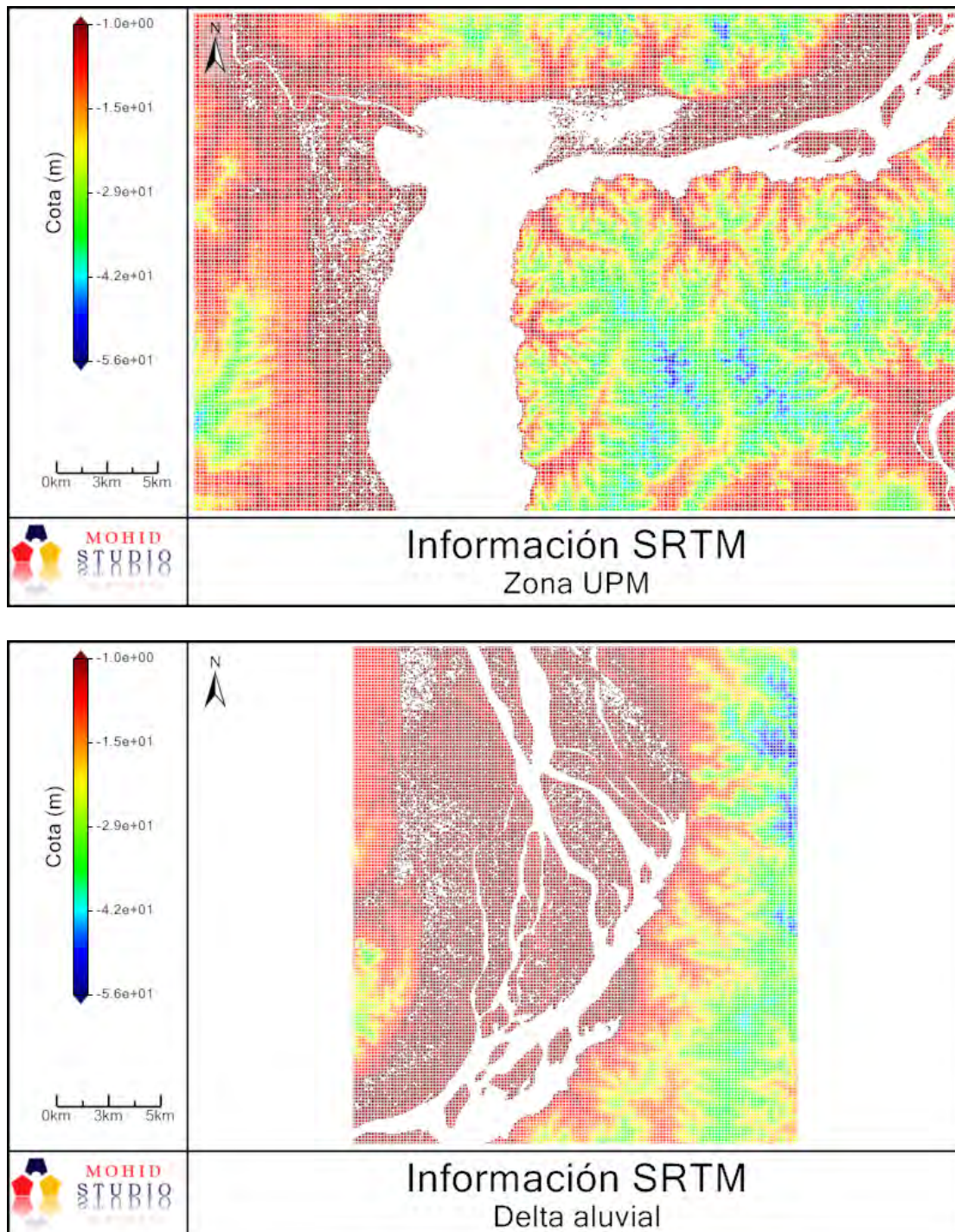
Otro punto a analizar es la relación del nivel de referencia de las elevaciones contempladas en las imágenes SRTM con el cero de referencia oficial de Uruguay (cero Wharton). Para ello se efectuó una comparación entre las cotas obtenidas con SRTM y el Plan Cartográfico del Uruguay 1:50000, las curvas de nivel del territorio uruguayo elaboradas por el Servicio Geográfico Militar del Ejército Nacional. Este plan se compone de cartas topográficas con curvas de nivel cada 10 metros de altura. El sistema de proyección utilizado es el de Gauss Krüger modificado, asociado al sistema de referencia ROU-USAMS (*datum* “Yacaré”, meridiano de contacto 55°48', elipsoide Hayford o Internacional 1924)².

Se seleccionó una zona lo más horizontalmente plana posible, cumpliéndose que sea próxima a la zona de estudio, pero no al río Uruguay debido al ruido mencionado antes. A partir de la selección de esta zona, se efectuó la comparación entre las dos fuentes de datos, sin observar diferencias significativas.

¹La denominación de los mosaicos se refiere a la latitud y longitud del vértice izquierdo inferior.

²Sistema de coordenadas ROU-USAMS, acorde al ajuste, realizado por el método de variación de coordenadas de la red geodésica de 1965 en EEUU por el Servicio Cartográfico de Ejército de los Estados Unidos (Pérez Rodino, R.).

FIGURA 4.6: Ruido detectado en la información satelital SRTM



Las cotas y valores altimétricos de las cartas del SGM son referidas al Cero Oficial de la República Oriental del Uruguay, coincidente con el nivel medio de las aguas del puerto de Montevideo. El Cero Oficial de Uruguay está 0,91 metros sobre el Cero Wharton, y a su vez, 0,11 metros sobre el cero de referencia establecido en el modelo.

Por lo anterior, se resolvió utilizar la información topográfica de SRTM sin efectuar cambio de referencia de elevaciones ya que se considera que 11cms son despreciables frente a los errores que dispone la información satelital SRTM.

4.7. Procesamiento información batimétrica

Una vez recopilada y procesada la información de base para la conformación de la batimetría del dominio comprendido entre Salto grande y Nueva Palmira, se realizaron tareas para la articulación de estos conjuntos de datos.

A continuación se presenta, en orden cronológico, un punteo de las actividades llevadas a cabo para el procesamiento de la información batimétrica mencionada en las secciones anteriores hacia la obtención de la malla de cálculo para la implementación del modelo:

- (1) Digitalización y vectorización de las curvas de nivel batimétricas esquematizadas en las cartas del Croquis elaborado por el SHN argentino
- (2) Análisis de la calidad de información de las curvas batimétricas obtenidas y detección de diferencias en cuanto al cero de referencia de las elevaciones, a partir de realizar una comparación visual entre las superficies obtenidas por los puntos relevados por el SOHMA y la superficie obtenida a partir de las curvas. Para ello, se elaboraron modelos digitales de terreno con triangulación (TIN) con cada uno de ellos y se analizó dónde se presencian diferencias significativas entre éstas superficies, siendo que esto ocurre en las cercanías del canal de navegación. Este resultado demuestra que la superficie originada a partir de los croquis representa adecuadamente la batimetría del río a excepción del canal de navegación, y que en éste se cuenta con los datos del SOHMA. En este contexto, es razonable construir una superficie a partir de ambos datos, utilizando los del SOHMA en donde se cuenta con ellos y complementando con las curvas de nivel obtenidas del croquis en las zonas en donde no se cuenta con ellos. Se presenta a continuación una esquematización de la superficie combinada. En la Figura 4.7 se visualizan los triángulos del modelo de terreno, visualizando dónde hay mayor y menor densidad de datos. En la Figura 4.8 se visualizan zonas con diferentes profundidades, según el color. A color más oscuro es más profundo, y a más claro lo menos profundos. Se puede visualizar claramente el canal de navegación.

FIGURA 4.7: Triangulación conformada por puntos de SOHMA y curvas batimétricas del Croquis de Ríos (SHN)



- (3) Como la comparación arrojó resultados favorables, se procedió a obtener una grilla de puntos a partir de la superficie del Modelo Digital de Terreno (MDT) determinada con ambos conjuntos de información. Se efectuó la transformación de coordenadas a geográficas WGS84. En este paso se utilizó el software Civil CAD. Se presenta la grilla de puntos obtenida en la Figura 4.9.
- (4) Por otro lado, se efectuó la digitalización de los puntos batimétricos relevados por el SHN, en los tramos comprendidos por las progresivas 0km a 80km (tramo inferior), y 111,9km hasta 147,1km (tramo superior).
- (5) El tramo inferior se articuló con las curvas batimétricas procesadas de las láminas del Croquis del SHN, obteniendo una grilla de puntos a partir de la superficie del MDT determinada con ambos conjuntos de información. Se efectuó la transformación de coordenadas a geográficas WGS84. El resultado obtenido de esta etapa se esquematiza en la Figura 4.10.
- (6) Obtención de la información topográfica a partir de las imágenes satelitales utilizando el software MOHID, y efectuando inversión de eje z y así asignar valores negativos

FIGURA 4.8: Modelo Digital de Terreno conformado por puntos de SOHMA y curvas batimétricas del Croquis de Ríos (SHN)



FIGURA 4.9: Rejilla de puntos obtenidas en la zona aledaña a UPM conformada por puntos de SOHMA y curvas de Croquis de Ríos del SHN

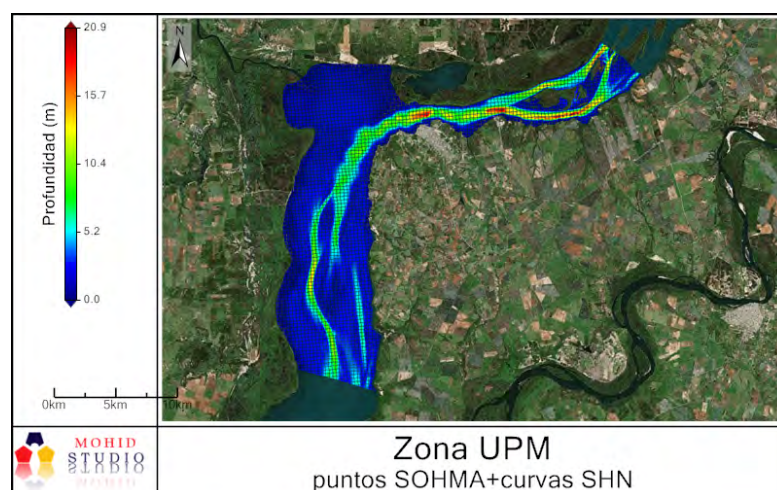
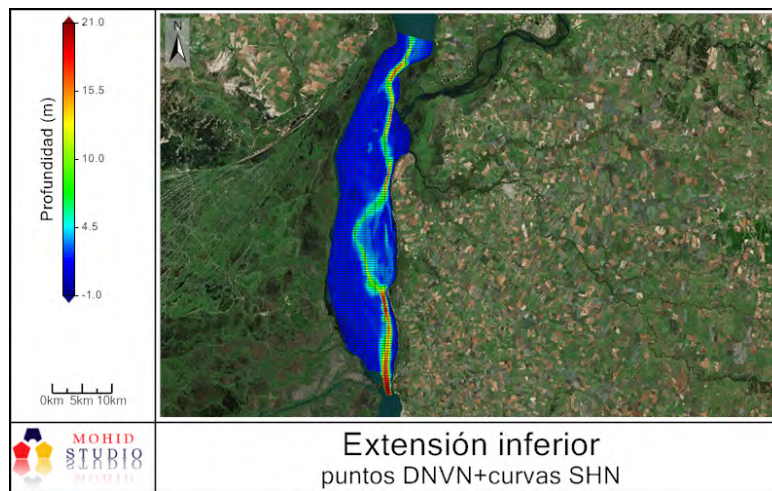


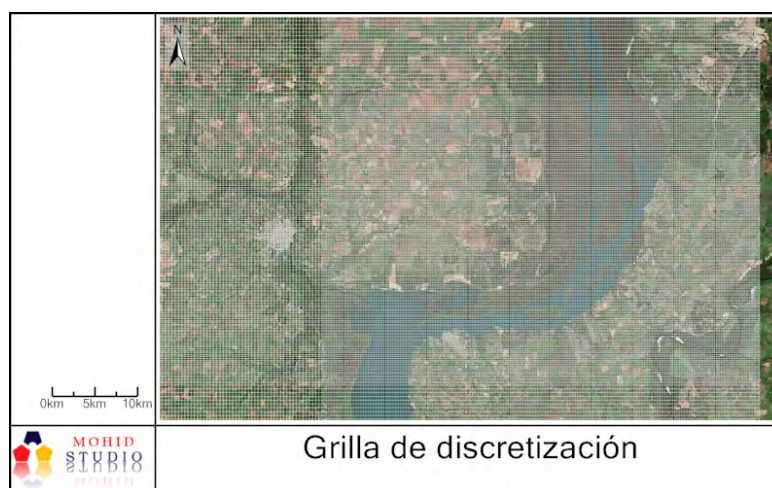
FIGURA 4.10: Rejilla de puntos obtenida en el tramo inferior, conformada por datos del Croquis de Ríos (SHN) y puntos de relevamiento de DNVN



a cotas ubicadas por encima del plano de referencia del modelo. Se consideran únicamente los valores de las planicies iguales o por encima de 1m respecto al cero del modelo.

- (7) Se confecciona la grilla de acuerdo a la resolución que se desea obtener para la malla de cálculo. Se selecciona un tipo de grilla rectangular de paso espacial variable, variando con celdas de 400 y 200 metros de lado (Figura 4.11). La zona de mayor resolución es la zona circundante a la zona de la planta UPM debido a que allí se requiere mayor detalle de información y además porque en dicha zona coexisten diversos factores morfológicos que pueden ocasionar inestabilidad en el modelo, como son, confluencia de ramificaciones, islas, curvas, etc.

FIGURA 4.11: Grilla de discretización horizontal del dominio



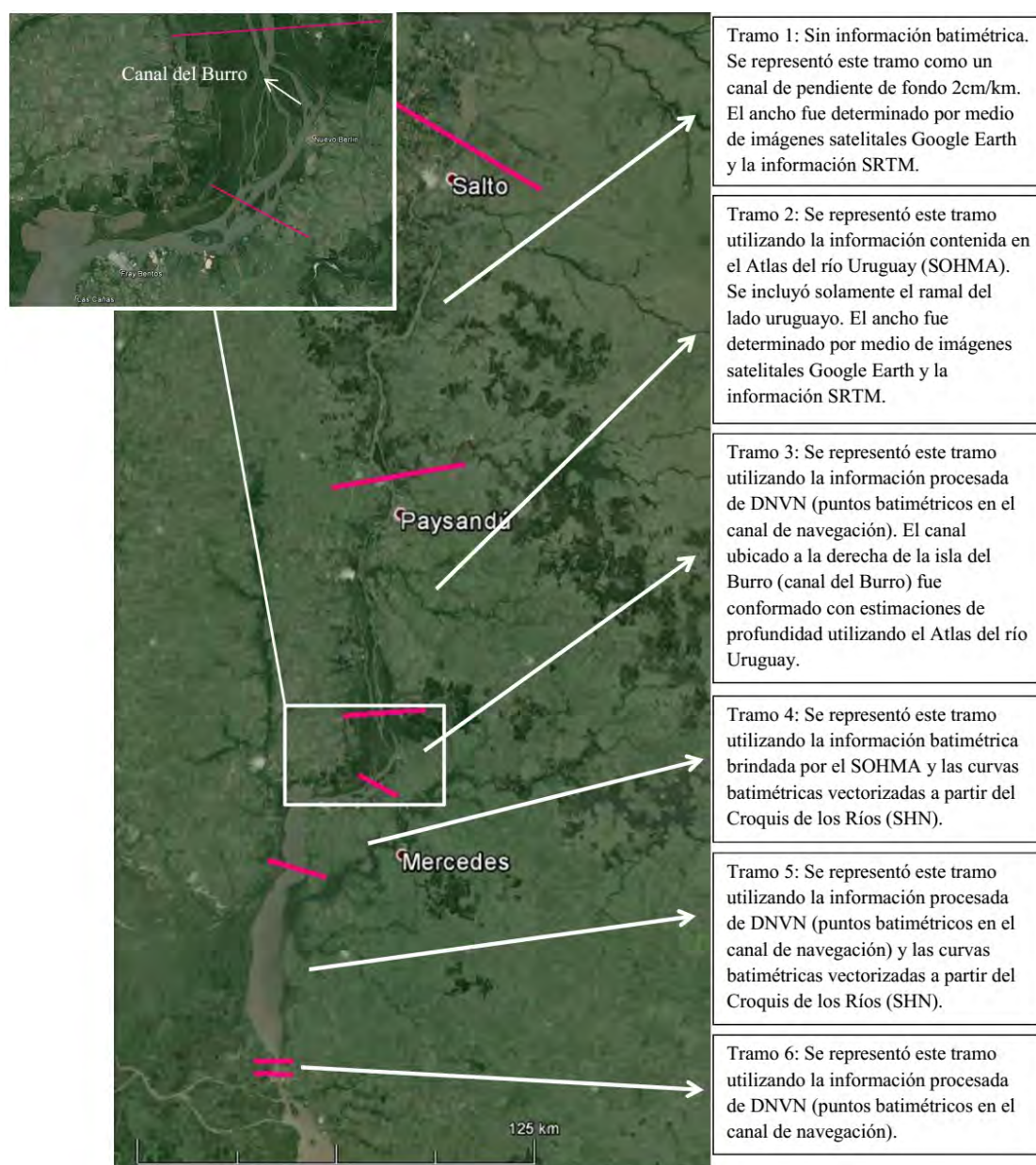
- (8) Determinación de la malla de cálculo del modelo utilizando diferentes aproximaciones (promedio, triangulación, IWD) y seleccionando la que mayor refleja la información de base. En función de los resultados obtenidos, se selecciona la malla obtenida a partir de efectuar un promedio con los puntos ubicados en la misma celda. Las celdas en las que no se disponen puntos se les asigna automáticamente un carácter de no computable, por lo cual es necesario asignarle manualmente un valor razonable a cada una de ellas. Esto sucede entre el área SRTM y los datos del cauce, visualizando algunos vacíos. También sucede en el tramo superior del cauce del río, desde la progresiva 140km hasta el extremo superior; en la laguna contigua al Martillo, ya que ninguna fuente contiene información batimétrica de la misma; y por último, aproximadamente a la altura de isla Filomena Grande, debido a que los puntos de la información de DNVN contienen información solamente en el canal, por lo que fue necesario modificar manualmente el brazo del río del lado uruguayo (Canal del Burro).
- (9) Se complementa hasta la ciudad de Colón con la información presentada en el Atlas del río Uruguay. Si bien en este tramo el río básicamente cuenta con dos canales principales, se representa solamente el canal derecho asumiendo una profundidad prácticamente constante a lo largo de la sección. Se asume que la representación solamente de un ramal no tendría que alterar los resultados en la zona aledaña a UPM ya que este tramo comprende el delta y, por lo tanto, cuenta con un área de planicie significativa. A lo largo de este tramo, en cada sección transversal la profundidad se estima a partir de la información contenida en el Atlas. El ancho del canal se establece según las márgenes impuestas por la información topográfica de SRTM.
- (10) Por último, para extender el dominio hasta la Represa de Salto Grande, se estima una variación de 2m en el zampeado del tramo del río entre Colón (límite superior de la información del Atlas del río Uruguay) y la Represa. La pendiente resulta en unos 2cm/km, considerado de orden cercano al valor de 10cm/km mencionado por BOTNIA (2004). En el caso de la laguna contigua al *Martillo*, se asume una profundidad de un metro respecto al cero del modelo. Se imputa los valores de las profundidades de estas celdas en la malla de cálculo de forma manual.

Como fue anticipado al comienzo de este capítulo, la elaboración de la batimetría del dominio de simulación comprendió una serie de actividades complejas y que requirió un desarrollo de conocimiento en el manejo de herramientas adicionales.

A lo largo del cauce del río Uruguay, la articulación de las diferentes fuentes de información, la metodología adoptada para la obtención de la información batimétrica para

el modelo y las simplificaciones adoptadas, divide el río en tramos. La Figura 4.12 esquematiza los diferentes tramos, con la intención de simplificar el entendimiento de la configuración batimétrica. Por otra parte, se recuerda que como la laguna contigua al Martillo no está incluida dentro de ninguna de las informaciones accedidas, se adopta un profundidad de 1 metro.

FIGURA 4.12: Segmentación en tramos para la configuración batimétrica



4.8. Configuración batimétrica obtenida

Por medio de las etapas antes mencionadas se determinó la batimetría a utilizar en el modelo. A continuación se presenta la misma en su versión resultante, advirtiéndose que se eliminaron las celdas con cotas de terreno superiores a 5 metros por encima del cero de referencia del modelo de forma de reducir las celdas computables y así reducir los tiempos de simulación. Asimismo, también fue efectuada una atenuación con la intención de reducir pendientes batimétricas que pudieran ocasionar inestabilidades en las simulaciones del modelo. Para ello se utilizó la herramienta FilterBathymetry, uno de los complementos del modelo MOHID.

La configuración batimétrica final se presenta en la Figura 4.13, en la que además se muestra la zona de UPM en más detalle (profundidades respecto al cero del modelo).

Básicamente la configuración batimétrica consiste en un rectángulo conformado por celdas computables y no computables. La extensión del río se asocia con celdas computables y se encuentra rodeada de celdas no computables, a excepción de la sección Nueva Palmira. En este último caso la frontera se encuentra abierta a efectos de permitir el ingreso y salida del agua. La Figura 4.14 diferencia las celdas computables de las no computables (en gris).

Asimismo, en la Figura 4.15 se resumen las más importantes simplificaciones adoptadas en la configuración de la batimetría: en el panel superior se esquematiza la zona aledaña a la planta UPM y en el panel inferior a tramos ubicados aguas arriba de dicha zona. Las simplificaciones son de gran importancia al momento de reconocer las debilidades del modelo obtenido finalmente.

El procesamiento de información batimétrica aquí desarrollado ha posibilitado componer una batimetría adecuada para realizar el estudio. No obstante, se considera que la misma puede ser mejorada en el futuro con información de relevamientos tanto del cauce como planicies.

La batimetría obtenida aquí es la utilizada para la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional y para el análisis de transporte de sustancias en la zona inmediata a la descarga de la planta UPM atento a los objetivos específicos planteados para esta tesis, lo que es desarrollado en los capítulos 5 y 6 respectivamente.

FIGURA 4.13: Configuración batimétrica definitiva del dominio: completa (arriba) y la zona aledaña a UPM (abajo)

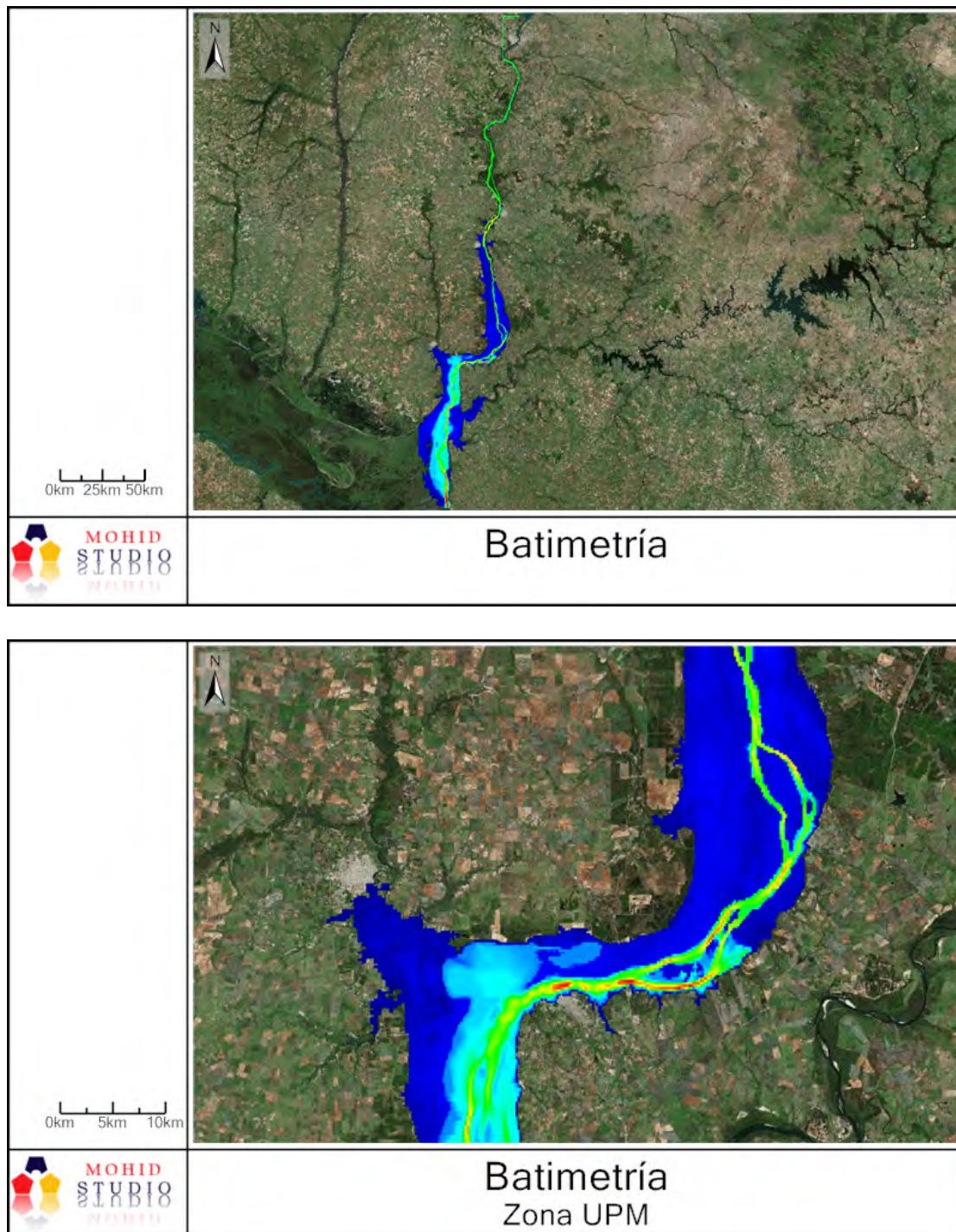


FIGURA 4.14: Celdas computables y no computables del dominio

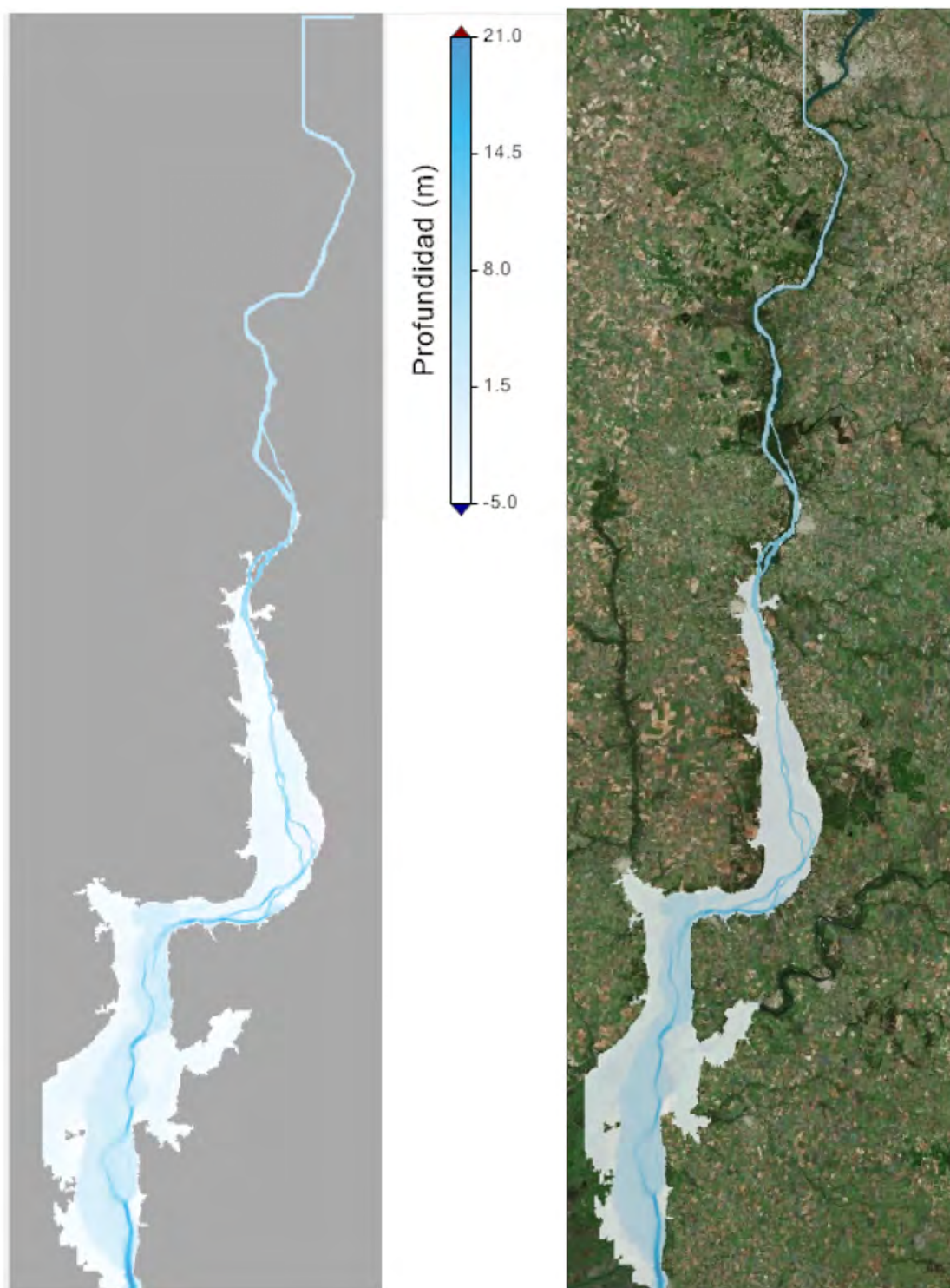
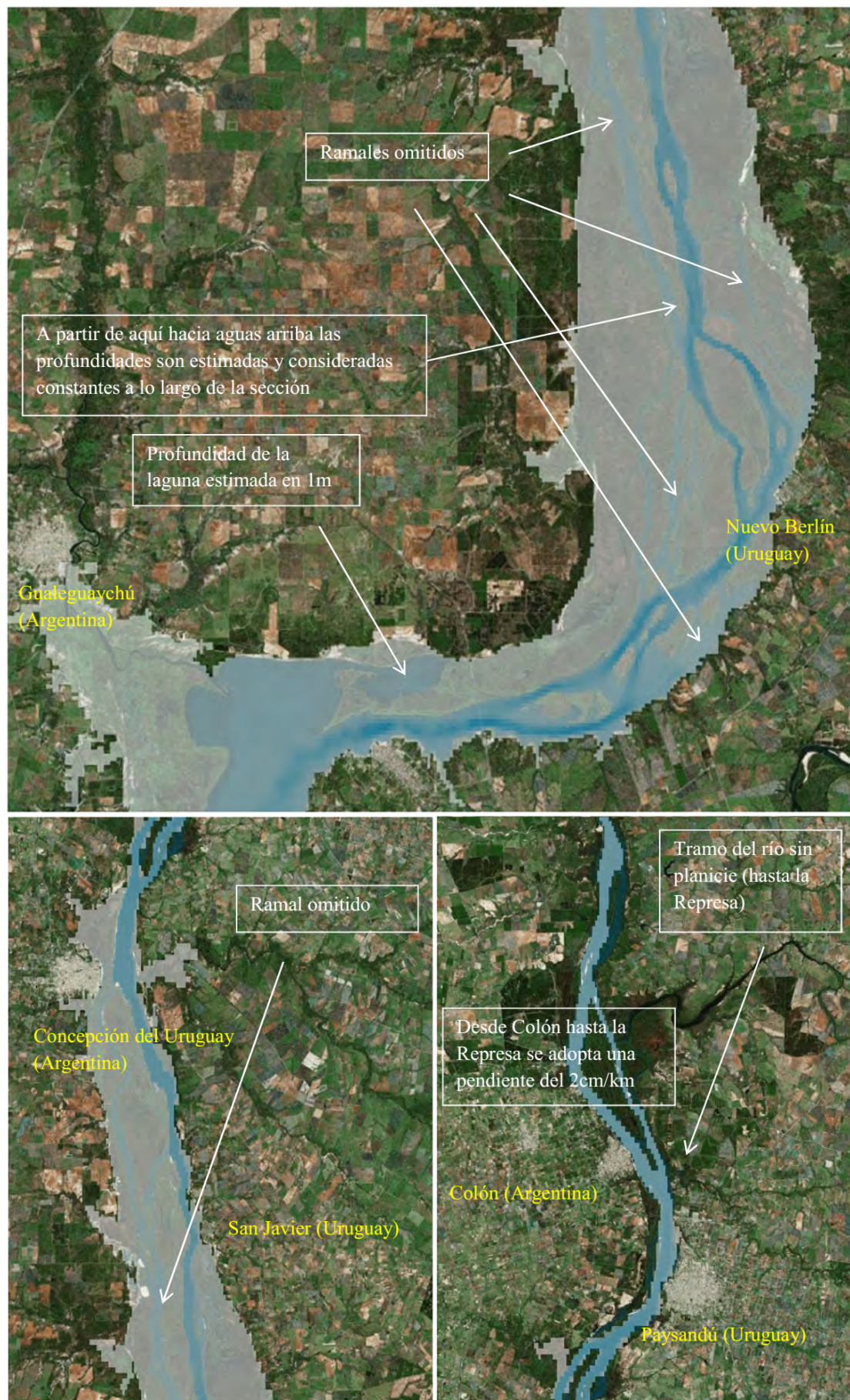


FIGURA 4.15: Simplificaciones adoptadas en el dominio



Capítulo 5

Modelación Hidrodinámica

5.1. Introducción

La hidrodinámica del río Uruguay muestra características complejas, como ha sido anticipado anteriormente, siendo ocasionalmente sometida a corrientes de ingreso de marea al mismo tiempo que al forzante de caudal de aporte de la Represa Salto Grande. Esos dos factores, según sus magnitudes y la relación entre ellos, pueden conllevar a inundaciones en planicies de las márgenes del río, así como también a la ocurrencia de eventos de inversión de flujo por cortos o prolongados períodos de tiempo. Inclusive ambos procesos pueden ser afectados según condiciones de viento dadas.

En este capítulo se describe el proceso de la obtención de una configuración del modelo MOHID para los estudios posteriores de transporte de sustancias. Primeramente se analizan variables de ajuste del modelo, con intención de incluir al modelo los más relevantes. Una vez seleccionados y efectuados los ajustes necesarios, se continúa con una etapa de calibración del modelo y posteriormente una de validación. A lo largo de todo el proceso, se analiza el comportamiento hidrodinámico del cuerpo de agua en estudio para diferentes escenarios establecidos según condiciones de flujo. Estos escenarios son los definidos como característicos de condiciones de caudal bajo, medio y alto, como fue desarrollado previamente en el Capítulo 3.

Por lo tanto, este capítulo se constituye en tres grandes etapas. Partiendo de la configuración del modelo de malla gruesa descripta en el Capítulo 4, la primera etapa se corresponde con una fase de ajuste en la que se desarrolla un *análisis de sensibilidad* de diferentes variables para identificar cuales podrían afectar los resultados de forma más significativa; ante variaciones de un parámetro determinado se analiza el aumento o disminución en los niveles y velocidades del modelo. Las variables analizadas son la

influencia del aporte de caudal del río Negro, de caudal del río Gualeguaychú, la influencia del efecto del viento y variaciones en la batimetría. También dentro de esta etapa se incluye un análisis de las oscilaciones numéricas del modelo. Seguidamente, se procede a la calibración del modelo para el ajuste de la rugosidad como parámetro del modelo. Una vez calibrado este parámetro, en la tercera etapa se efectúa la validación del modelo con el objetivo de definir un modelo de resolución gruesa, y por lo tanto menor costo computacional, como modelo Padre de un encaje de modelos de resolución creciente.

Una vez definida la esquematización a adoptarse como modelo Padre para posteriores estudios, se presentan sus fortalezas y debilidades como conclusiones finales. Finalmente, a partir de dicho modelo Padre se conforma un modelo anidado Padre-Hijo, donde este último proporciona información más detallada en la zona de estudio. Tanto el modelo Padre como el modelo anidado Padre-Hijo serán utilizados posteriormente para analizar el transporte de contaminantes en la zona de UPM, desarrollado en el Capítulo 6.

A lo largo del presente capítulo, los resultados del modelo son comparados con los datos reales disponibles en Fray Bentos, Paysandú y Boca Gualeguaychú. A modo de alivianar la lectura, las denominaciones Fray Bentos, Paysandú, Nueva Palmira y Boca Gualeguaychú podrán en ocasiones encontrarse denominadas como “FB”, “Pdú”, “NP” y “BcaGchú” respectivamente.

5.2. Estrategia de implementación

El dominio del modelo se encuentra limitado por la Represa Salto Grande y por la ciudad de Nueva Palmira, comprendiendo una extensión total de unos 330km de longitud en el sentido del eje del río Uruguay. La frontera superior del modelo se corresponde con la Represa y la frontera inferior con la sección Nueva Palmira. En la primera frontera, se imponen las series de caudales erogados por la Represa y en la frontera del extremo inferior se imponen los niveles del Puerto de Nueva Palmira.

En los casos que se quiere analizar puntualmente la influencia del aporte de caudal del río Negro y Gualeguaychú en la hidrodinámica del río Uruguay, se incluye en la batimetría del modelo una extensión apreciable de ambos ríos y así imponer el ingreso de sus respectivos aportes. Los mismos son considerados de valor constante, estimados a partir de bibliografía para el caso del río Gualeguaychú y de información de registros para el caso del río Negro.

Respecto a los caudales de Salto Grande utilizados al momento de la interpretación de su vinculación con resultados del modelo, se maneja la media móvil del caudal con una ventana temporal de 24 horas, ya que el dato horario del caudal erogado por la Represa

pierde utilidad al contrastarlo con serie de niveles debido a la gran variabilidad diaria que posee el funcionamiento de la misma. Esto facilita la asociación de caudales erogados con ondas de niveles provocadas por los anteriores, especialmente hacia la detección de forzantes dominantes o tiempos de tránsito, entre otros.

Para analizar el ajuste del modelo se compara sus resultados con los datos reales de nivel en puntos de control previamente definidos, siendo éstos Fray Bentos y Boca Gualeguaychú. Este último es solamente utilizado en situaciones que sea dudosa la veracidad de los datos en Fray Bentos, ya que dispone de menor frecuencia de medida que estos últimos. También ocasionalmente se utilizan los registros históricos en el Puerto de Paysandú, que si bien se reconoce su lejanía respecto a Fray Bentos, las conclusiones obtenidas a partir de su comparación con los resultados del modelo pueden complementar al momento de identificar el origen de errores o diferencias detectadas en la zona de UPM. Esto será presentado con más detalle en las próximas secciones, explicando qué tipo de información fue utilizada en qué caso y con qué fin.

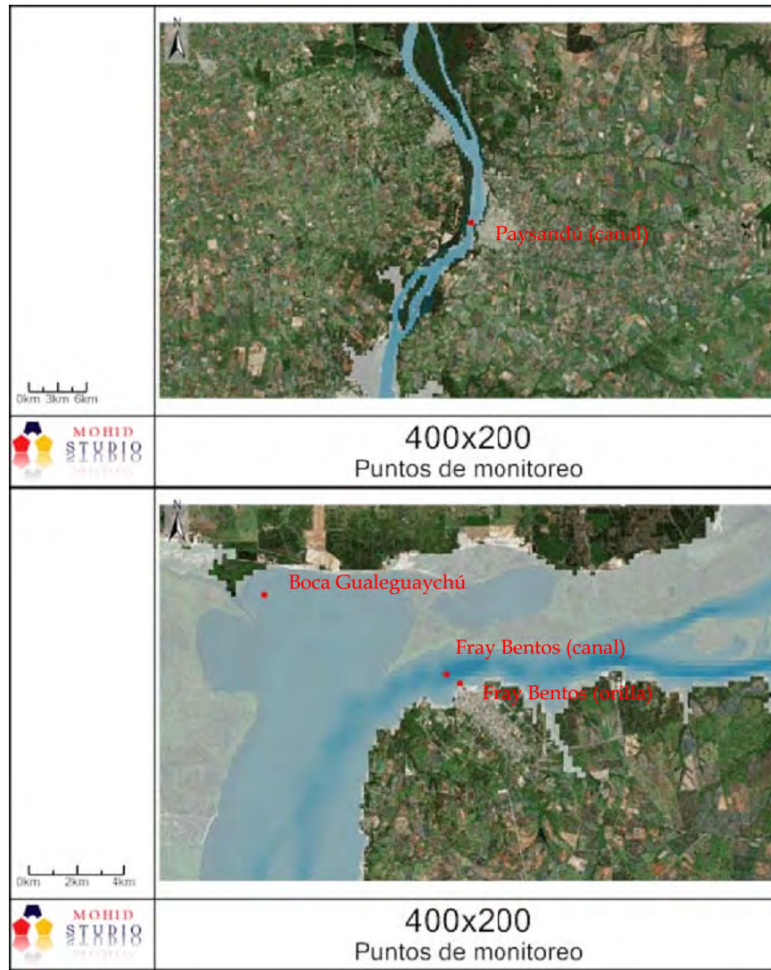
A efectos de la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones con los datos reales de nivel, se utiliza la información del modelo asociada al canal de la sección transversal correspondiente al punto geográfico al cual pertenecen los registros disponibles, como es el caso de los Puertos de Fray Bentos y Paysandú. Por tanto, se seleccionan celdas de control ubicadas en el canal de dichas secciones.

Para comparar velocidades instantáneas de diferentes configuraciones del modelo, se utilizan los resultados de velocidades (módulo y dirección) obtenidos por el modelo para las mismas celdas de control definidas para los resultados de niveles, según fue comentado recién. Esta consideración se adopta como representativa del valor medio de la sección. Sin embargo, se reconoce que es una aproximación ya que las velocidades en celdas del canal generalmente resultan mayores a las medias de la sección (Chow, 1959). La preferencia de seleccionar un punto en el canal frente a uno localizado en la orilla, se debe a que en las orillas es frecuente presentar mayor oscilación de velocidades tanto en magnitud como dirección. Esto se debe a que en estas zonas existe recirculación de flujo y posible estancamiento, por lo que las velocidades y sus direcciones no son representativas del flujo medio.

Por el contrario, para el punto de control Boca Gualeguaychú, debido a su ubicación geográfica, la celda de control coincide con las coordenadas físicas en donde fueron obtenidas las medidas.

En la Figura 5.1 se indica la ubicación de las celdas de control para Paysandú en el panel superior, y Fray Bentos (orilla y canal) y Boca Gualeguaychú en el panel inferior.

FIGURA 5.1: Ubicación de las celdas de control



Por otra parte, se recuerda que los niveles presentados en este documento se corresponden, a menos que se indique lo contrario, al nivel cero del modelo (ubicado 80cms por encima del cero Wharton). En cuanto a las velocidades, debido a que en escenarios de caudales medios y bajos es frecuente o usual la ocurrencia de inversión de flujo, se adopta como criterio para ello una desviación en un 10 % de la dirección en condiciones normales, en cada una de las secciones consideradas. En cuanto a la cuantificación de las desviaciones entre valores obtenidos por el modelo y valores reales, o entre valores del modelo obtenidos frente a diferentes configuraciones del mismo, el valor promedio se determina como desviación media (Ecuación 5.1).

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - y_i|}{N} \quad (5.1)$$

En la ecuación anterior, D es la desviación media, x_i un conjunto de datos, y_i otro conjunto de datos y N el valor mínimo entre la cantidad de datos de x_i e y_i . El valor

máximo y mínimo, son los valores máximos y mínimos respectivamente de los valores que componen a D . En casos en los que el valor mínimo sea muy cercano a cero será omitido. A lo largo de este informe, los valores de diferencias serán presentados en metros o m/s según corresponda, a menos que se mencione lo contrario.

En cuanto a la configuración del modelo, para la viscosidad turbulenta se implementa la opción de Smagorinsky (según Ecuación 2.6 del Capítulo 2), cuyo coeficiente k (parámetro del modelo HORCON) se establece en 0.4, al igual que en el Modelo Pre-Operacional del Río de la Plata-Río Uruguay elaborado por técnicos del IMFIA (2008). También se activa la opción de Coriolis.

Durante las primeras corridas del modelo Padre, sucedieron algunas inestabilidades de tipo variado, las que fueron sujetas a estudio y análisis de causas, y que se mencionan a continuación.

Uno de los principales parámetros para la estabilidad del modelo es el número de Courant. En esquemas explícitos debe ser menor a 1, pero al contar MOHID con un esquema semi-implícito, puede adoptar valores mayores para dicho parámetro sin causar inestabilidad al modelo, siendo aceptables incluso valores de 4 hasta 6 (Leitão, 2002). Si bien este parámetro inicialmente se correspondía con valores dentro de los recomendados, primeramente se obtuvieron inestabilidades puntuales, por lo que fue necesario modificar manualmente la batimetría en algunas celdas y así suavizar la pendiente local.

Como segunda medida, se le acopló un período de calentamiento previo al período a ser simulado a modo de estabilizar el modelo, para cada uno de las situaciones consideradas. Según bibliografía, este período varía en función de lo que se quiera estudiar, alcanzando valores de hasta 5 días (Bernardes, 2007) e inclusive 1 mes (Malhadas, 2008). Para este caso se adopta un tiempo de calentamiento de 7 días. En cuanto a los valores establecidos en las condiciones de borde caudal y nivel, debido a que se observó que la imposición de niveles en la frontera abierta puede llevar a inestabilidades, las simulaciones de arranque se configuraron manualmente de forma de abarcar el espectro de niveles y caudales del período a simular a posteriori (situaciones hipotéticas). También las condiciones adoptadas en el calentamiento pueden afectar los resultados siguientes de la serie temporal a modelar. Se observa que la afectación de las condiciones iniciales es variable, alcanzando en algunos casos un máximo de 2 días. Por ello, resultados asociados a los dos primeros días de cada uno de los períodos seleccionados para las simulaciones no son incluidos en los análisis.

También debido a inestabilidades, el tramo inicial superior del río se representa como un canal lineal en vez de sinuoso como lo es realmente. Esta simplificación se realiza en los primeros 28km superiores del curso. Esto se debe a que el estrecho confinamiento que

dispone dicho tramo sumado a la gruesa definición de la malla computacional, conllevan gradientes de velocidades elevados lo que inestabiliza el modelo.

Otra fuente de inestabilidad puede ser el método de solución numérica de las ecuaciones de transporte de masa. También ocurrió inestabilidad en los resultados de propiedades del agua, temperatura y salinidad, debido a que la metodología de cálculo por defecto es explícita. Con la keyword “ADVECTION_H_IMP_EXP” se lo configuró como método implícito, eliminando la inestabilidad ocasionada por elevados valores de velocidad.

Otras inestabilidades más difíciles de detectar en su origen, fueron por variaciones muy rápidas en celdas intermareales, particularmente en situaciones de caudales elevados. Variaciones muy abruptas de velocidad en celdas con pequeño volumen de agua ocasiona este tipo de problemas. Por tanto, un factor determinante fue la keyword MINIMUM_DEPTH, la cual se define en el módulo Geometry y define la altura de agua en la celda a partir de la cual la misma se computa. El valor establecido para este parámetro fue de 30cms, mientras que por defecto es de 10cms. Cabe advertirse que según las características morfológicas del dominio, la selección de un valor mayor de este parámetro podría ocasionar una menor resolución en la zona de costa y también una variación en los niveles. Específicamente en el caso que aquí preocupa, no se ha detectado afectaciones significativas particularmente en la zona aledaña a la planta UPM.

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos del modelo para diferentes configuraciones y escenarios de caudales bajos, medios y altos. Las simulaciones son efectuadas utilizando el modelo Padre.

5.3. Información utilizada

A lo largo de este capítulo se utiliza información batimétrica e hidrológica. En cuanto a la primera, se parte de la configuración de la malla computacional de resolución 400x200 obtenida en el Capítulo 4 y se realizan ajustes a la misma a modo de analizar de qué manera influyen ciertas variaciones en la batimetría y aportes de caudal adicionales en los resultados del modelo. En cuanto a la segunda, se cuenta con la información brindada por la DNH de registros horarios de nivel en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, y los datos de caudales horarios erogados por la Represa de Salto Grande facilitados por la CTM. También se cuenta con los datos de nivel en Boca Gualeguaychú accedidos por medio de la DNVN, los cuales presentan una medición diaria a las 6 a.m..

La información primaria establecida para efectuar las comparaciones de los resultados del modelo es la correspondiente a los registros de medición asociados al Puerto de Fray Bentos, debido a su proximidad al punto de descarga asociado a este caso de estudio

y a que dispone mayor densidad de información para los escenarios seleccionados. Para algunos parámetros específicos se suma un análisis en otras zonas o secciones según amerite, entre ellas Paysandú y Boca Gualeguaychú.

Los períodos temporales a utilizar son los ya seleccionados en el Capítulo 3 Análisis Hidrológico, correspondiendo a escenarios característicos de caudales bajos, medios y altos. En la fase previa de ajuste y en la etapa de calibración se utilizan los períodos establecidos para la etapa de calibración. Para la etapa de validación se utilizan los períodos definidos para dicha etapa.

En cuanto a las condiciones iniciales del modelo, se considera el reposo para el caso de las cinemáticas, y para el caso de las propiedades de agua se adoptan valores de referencia de densidad de 1000kg/m^3 (instaurada por defecto en el modelo ¹) y una temperatura de 15°C , siendo este valor del mismo orden que el rango entre 15.6 y 29.8°C en el que puede situarse la temperatura del río (Ecometrix, 2006). La salinidad se establece en un valor correspondiente a agua dulce constante de 0.01Psu .

5.3.1. Condiciones de borde

Las condiciones de borde impuestas al modelo configurado se dividen en horizontales y verticales. Las primeras corresponden a la imposición de caudales del río Uruguay, así como la imposición de niveles registrados en Nueva Palmira como condición de aguas abajo. Ocasionalmente se incluyen los aportes del río Negro y río Gualeguaychú para el estudio de su influencia.

Los mencionados aportes de flujo son ingresados en frontera cerrada, de modo de no permitir la salida del flujo del sistema modelado y son siempre positivos (en el caso en estudio no se consideran fuentes de salidas de masa). Se entiende que esto es una aproximación para los casos de los aportes del río Negro y Gualeguaychú en tanto sean bien conocidas las condiciones de reflujos por el remanso provocado por el río Uruguay.

Por el contrario, la imposición de los niveles debe ser una condición de borde abierta, es decir, permitir la entrada y salida de flujo del sistema en estudio. Este es el caso de la sección del río a la altura de Nueva Palmira.

Relacionado a las condiciones de borde verticales, se impone la condición de borde inferior (interacción agua-fondo) por medio de una rugosidad absoluta de 0.002 metros. En condiciones bidimensionales, este valor equivale a un número de Manning de casi 0.025 , de acuerdo a la Ecuación 5.2 (Leitão, 2002), considerando H la profundidad del

¹Extraído del código de MOHID (CODEPLEX)

río en metros, z_o la rugosidad absoluta en metros y κ la constante de von-Karman (valor típico 0.41). Un valor de Manning de 0.024 es considerado como típico por Cardini et al. (2004b). Sin embargo, una rugosidad de 2mm parece demasiado baja considerando la existencia de formas de fondo en algunos tramos y de material duro en otros (comunicación personal de E. Lorenzo, 14 de enero de 2015).

$$\eta \sqrt{gH^{1/3}} = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{\frac{H}{2} + z_o}{z_o}\right)} \quad (5.2)$$

Si bien a modo general no se considera condición de frontera superior en la interacción de la atmósfera, en este capítulo sí se la incluye al momento de determinar el efecto del viento en los resultados del modelo.

A continuación se expone una descripción de las condiciones de frontera más significativas, las cuales se corresponden con el plano horizontal. La condición de frontera para imponer la acción del viento se detallará más adelante.

5.3.1.1. Condición de frontera abierta

En la frontera abierta, ubicada en el extremo inferior del dominio a la altura de Nueva Palmira, muy cercana a la desembocadura al Río de la Plata, se ingresa una serie de tiempo de niveles registrados cada una hora. Estos valores fueron suministrados por la DNH, como fue mencionado en el Capítulo 3 Análisis Hidrológico.

En cuanto a las propiedades de agua, en la frontera inferior del dominio se estableció una condición de borde con temperatura menor (12°C) y una salinidad mayor (0.35Psu), debido a la influencia del Río de la Plata.

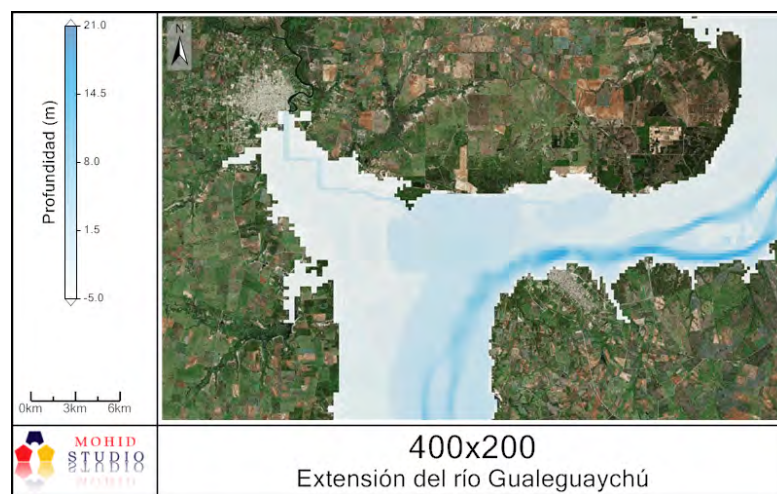
5.3.1.2. Condiciones de aportes de caudal

El caudal del río Uruguay es ingresado al modelo en el extremo superior, el cual representa la Represa Salto Grande. Los datos utilizados son los brindados por CTM como datos horarios de turbinado y vertido de caudal, detallados previamente en el Capítulo 3 Análisis Hidrológico.

En cuanto a la imposición de variables de estado de temperatura y salinidad en la descarga de Salto Grande, se considera una temperatura de 20°C y la misma salinidad inicial que el dominio.

Para considerar el aporte del río Guauguaychú, se modifica la malla determinada a modo de representar un tramo del río Guauguaychú de acuerdo a lo que esquematiza la Figura 5.2. Esta modificación se extiende en aproximadamente 13km, alcanzando la ciudad de Guauguaychú (Argentina). Para la configuración del curso fluvial se consulta imágenes satelitales, adoptándose un ancho ajustado a las dimensiones de las celdas de la malla, y estableciéndose una profundidad constante de 1.5 metros respecto al cero IGM², equivalente a decir 0.8075 metros respecto al cero del modelo. Esto se corresponde a una simplificación de la información presentada en Cardini y Zabalett (2006). Cabe advertirse que la sinuosidad de este río no es reflejada totalmente en el modelo, debido a la dificultad en articular las dimensiones del canal con el tamaño de las celdas del modelo. Sin embargo, se aclara que dicha simplificación no ocasiona falsedades importantes, pues, el caudal de este río es considerado constante y suele ser sensiblemente menor en magnitud al del río Uruguay. Los caudales medio y bajo del río Guauguaychú se sitúan en 210 y 20m³/s respectivamente (Ecometrix, 2006).

FIGURA 5.2: Extensión de la batimetría en el río Guauguaychú

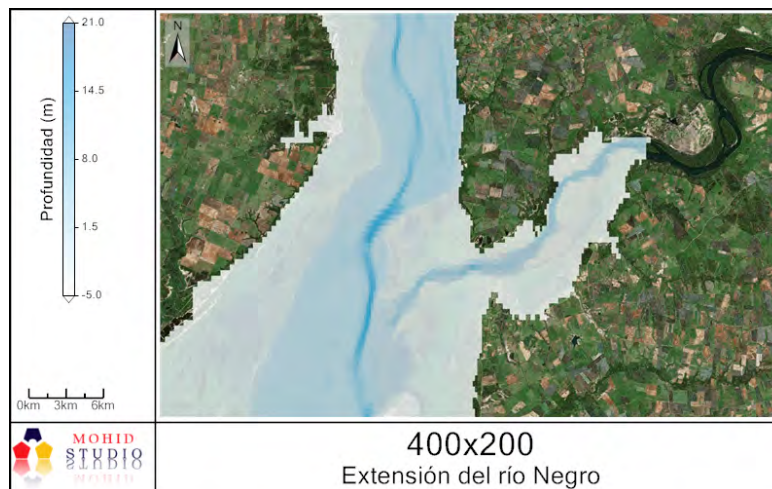


Por otro lado, de forma de ingresar el aporte del río Negro fue necesario configurar manualmente la batimetría del mismo, desde su desembocadura del río Uruguay hacia aguas arriba. Como insumo se consultó las Atlas del río Uruguay del SOHMA, alcanzando una extensión en unos 26km del río Negro, aproximadamente la mitad del tramo comprendido entre la desembocadura y la ciudad de Mercedes (Soriano, Uruguay). Se esquematiza dicha extensión en la Figura 5.3.

Ambas extensiones, tanto del río Guauguaychú como del río Negro, se contemplaron únicamente para analizar la influencia de los respectivos caudales. En el resto de las configuraciones no son incluidos, ya que, como se verá más adelante, la influencia de ellos no producen una contribución sustantiva en la hidrodinámica del río Uruguay.

²El cero IGM se refiere al nivel de aguas medias en Mar del Plata, ubicándose 0.6925 metros por encima del cero Wharton según la página web oficial de la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables.

FIGURA 5.3: Extensión de la batimetría en el río Negro



5.3.2. Períodos de simulación

Los períodos de simulación utilizados para las fases de calibración y validación se presentan en las Tablas 5.1 y 5.2 respectivamente, descriptos anteriormente en el Capítulo 3 Análisis Hidrológico. Se recuerda que existen vacíos de información. De dichas tablas es posible extraer el porcentaje de valores que dispone cada una de las series de registros horarios.

TABLA 5.1: Períodos de simulación para la calibración

Escenario	Período	Porcentaje de datos de caudal	Porcentaje de datos nivel FB	Porcentaje de datos nivel NP
Caudales bajos	7/2/2008-13/4/2008	100 %	67 %	63 %
Caudales medios	16/6/2007-13/8/2007	100 %	100 %	45 %
Caudales altos	12/10/1997-30/11/1997	100 %	100 %	96 %

TABLA 5.2: Períodos de simulación para la validación

Escenario	Período	Porcentaje de datos de caudal	Porcentaje de datos nivel FB	Porcentaje de datos nivel NP
Caudales bajos	22/9/2010-21/11/2010	100 %	100 %	100 %
Caudales medios	1/6/2008-31/7/2008	100 %	81 %	56 %
Caudales altos	1/09/2002-31/10/2002	100 %	47 %	100 %

Lo anterior resulta importante a tener en cuenta durante el proceso de análisis comparativo entre el comportamiento del modelo y los datos reales para los puntos considerados. Siendo que el programa interpola entre dos datos continuos de la serie, de forma de obtener valores para cada paso temporal de las simulaciones configuradas, un vacío en la

serie de Nueva Palmira se traduce en valores ficticios en el punto de control Fray Bentos y que al momento de ser comparados podrían actuar en detrimento del análisis.

5.4. Esquematización original

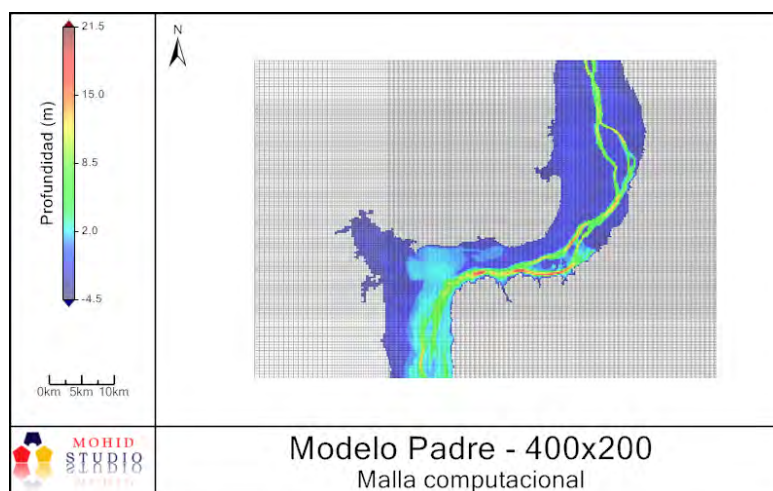
Para obtener los primeros resultados, se utilizó una esquematización de partida a ser utilizada como modelo Padre. Con este modelo se busca determinar una primera aproximación al comportamiento del río Uruguay en su tramo desde la Represa Salto Grande hasta la ciudad de Nueva Palmira. Se busca determinar como son los resultados del modelo respecto a la información real disponible.

Debido a sus dimensiones en el plano horizontal, se selecciona una discretización del modelo compatible con las características del río y con un paso de tiempo adecuado, de forma de que las simulaciones efectuadas se efectúen en períodos de tiempo no muy prolongados. Dicho paso temporal debe ser lo suficientemente grande para reducir los tiempos de simulación y lo suficientemente pequeño para no ocasionar inestabilidad u oscilaciones numéricas. Por lo tanto, se utiliza la batimetría obtenida en el Capítulo 4 Batimetría con un paso temporal de 15 segundos. El modelo se configura como bidimensional integrado en la vertical considerando la información disponible para la implementación y análisis del mismo.

El modelo Padre utilizado en la esquematización original es de tipo rectangular con resolución variable y cuenta con un total de 31.968 de celdas computables en el plano horizontal. Al ser un modelo bidimensional, dicho número también coincide con el total de celdas computables del modelo. Debido a las características morfológicas del río Uruguay, las celdas de la malla disponen dimensiones variables con largos y anchos de entre 200 y 400 metros, focalizando el menor tamaño de 200 metros de lado en la zona de influencia de la descarga de la planta UPM. Esta zona es donde existen varias complejidades en cuanto a la existencia de curvas, islas, y ensanchamientos y angostamientos abruptos, provocando rápidas variaciones en el flujo en breves distancias. En la Figura 5.4 se esquematiza de forma parcial la configuración del dominio con malla de resolución 400x200, efectuando un acercamiento a la zona en estudio. Se recuerda que la configuración batimétrica, como fue comentado previamente en el Capítulo 4, cuenta con algunas simplificaciones.

Con el objetivo de analizar tanto la influencia desde el Río de la Plata como la de los caudales de escurrimiento erogados por la Represa, se posicionan puntos de control en el modelo en los que se desea obtener series temporales de variables predefinidas. Primordialmente ellos se condicen con los puntos de registros de Fray Bentos, Paysandú y

FIGURA 5.4: Malla computacional del río Uruguay de resolución 400x200 metros



Boca Gualeguaychú, de acuerdo a lo comentado anteriormente en la sección *Estrategia de implementación*.

La comparación entre los resultados obtenidos por el modelo y la información de registros disponibles, en conjunto con una estimación de tiempos de tránsito y análisis de la influencia de la marea en el río Uruguay se presentan a continuación.

5.4.1. Tiempo de tránsito

Como primer paso se busca establecer un tiempo de tránsito “tipo” de las ondas de crecida generadas por la Represa, ya que la identificación de este parámetro, si bien puede considerarse una primera aproximación, puede facilitar la interpretación de los datos de niveles y velocidades para un caudal asociado, así como también interrelacionar diferentes puntos de control en el tiempo. El tiempo de tránsito de los caudales depende estrictamente del caudal, de su interacción con la batimetría del cauce y del efecto de marea. La magnitud del caudal transportado y la imposición de niveles en Nueva Palmira repercuten en valores de niveles, que pueden computar diferentes tiempos de tránsito dependiendo si el flujo inunda las planicies o se mantiene confinado al cauce.

En este sentido, se busca determinar tiempos de tránsito para los escenarios de caudales bajos y medios seleccionados para la etapa de calibración. En cuanto a la determinación del tiempo de tránsito de onda erogada desde la Represa para el escenario de caudales bajos, no es posible determinarlo visualmente a partir de su representación gráfica, ya que la influencia de aguas abajo predomina frente al forzante de caudal de aporte de la Represa y no se observa una clara correlación directa entre los niveles en Fray Bentos y los caudales erogados. Sin embargo, para ello se definen áreas del dominio como boxes (o cajas de control en español), con las que se determina para cada paso de tiempo el

flujo de entrada y salida para cada área definida. Seleccionando convenientemente los boxes, es posible determinar los tiempos de tránsito al comparar los flujos de las mismas con una media móvil de caudales erogados por la Represa, con una ventana temporal de 24 horas. Por lo tanto, el tiempo de tránsito desde la Represa hasta Fray Bentos resulta en un entorno de 25 horas para un caudal de unos $3500\text{m}^3/\text{s}$. En cuanto al tiempo de tránsito hasta la sección de Nueva Palmira, el efecto de la condición de borde en ese lugar en las variables hidrodinámicas no permite determinarlo.

Para el escenario de caudales medios, como la influencia del caudal erogado por la Represa domina al de marea, estimaciones de tiempos de tránsito característicos para caudales entre 7500 y $7600\text{m}^3/\text{s}$ (en términos de promedios para ventanas temporales de 24 horas) resultan entre 30 y 34 horas hasta la sección Fray Bentos, superiores al escenario de caudales bajos.

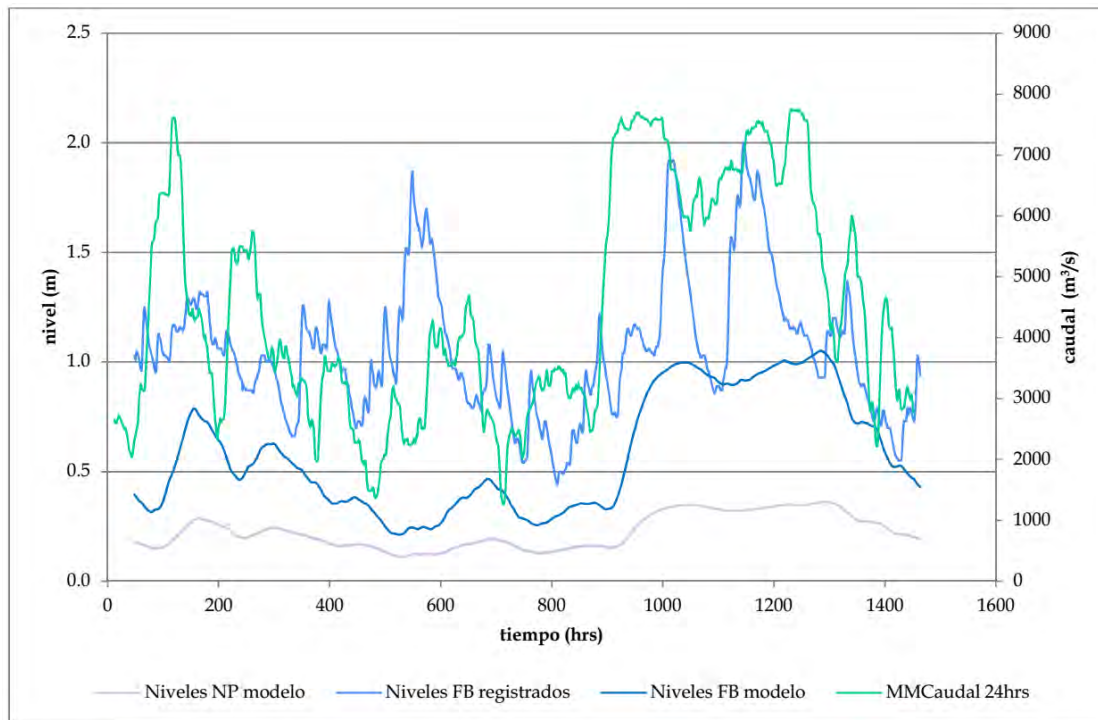
5.4.2. Influencia de marea

Con intención de analizar la repercusión de la influencia de marea en la hidrodinámica del río, se configura el modelo sin la imposición de niveles en Nueva Palmira y se compara los resultados de niveles, velocidades y tiempos de tránsito respecto a lo desarrollado en la sección anterior y a los datos registrados en Nueva Palmira y en Fray Bentos.

Se configura entonces el modelo sin imposición de niveles en la frontera inferior, dejando a libre salida el caudal que es ingresado al sistema. Se selecciona el escenario de caudales medios establecido para la etapa de calibración para la determinación de un tiempo de tránsito. A partir de las series temporales de media móvil de caudales erogados, con una ventana de 24 horas, y las series temporales de niveles obtenidas por el modelo, se determina visualmente el desfase temporal de los extremos relativos de ambas curvas. En este sentido, se analizan los picos de caudal que son claramente reflejados en los niveles obtenidos por el modelo. En la Figura 5.5 se presentan los datos de caudal registrados y los niveles en Fray Bentos y Nueva Palmira obtenidos por el modelo.

Para el escenario considerado, los tiempos de tránsito varían entre 30 y 43 hasta Fray Bentos y entre 37 y 62 horas hasta Nueva Palmira, en un rango aproximado de caudales entre 3700 y $7700\text{m}^3/\text{s}$. En el primer caso se tiene un nivel de 0.28 metros en Fray Bentos y 0.14 metros en Nueva Palmira, ambos respecto al cero del modelo. Al comparar estos tiempos con los indicados en la sección anterior (para la configuración del modelo imponiendo niveles registrados en Nueva Palmira), se detecta un “aceleramiento” en el flujo debido a las condiciones de niveles impuestas en Nueva Palmira.

FIGURA 5.5: Influencia de marea en Fray Bentos para condiciones de caudales medios



Una conclusión fácilmente extraíble de los resultados obtenidos para la configuración sin imposición de niveles en la frontera inferior, es la gran magnitud de la influencia de marea que proviene del Río de la Plata, al comparar los resultados del modelo con los registros reales tanto en la sección de Fray Bentos como de Nueva Palmira. Esta influencia no solamente se observa en la diferencia en la magnitud de los niveles, sino también en su variabilidad y su dependencia o no con la curva de caudales. Se observa claramente lo antedicho en las Figuras 5.5 (ya presentada), 5.6 y 5.7, que presentan el comportamiento de los niveles obtenidos por el modelo respecto a los caudales erogados por la Represa (en media móvil de 24hrs) y a los registros reales de información asociados a Fray Bentos y Nueva Palmira. Las primeras dos figuras esquematizan los resultados obtenidos para el escenario de caudales medios, para las secciones de Fray Bentos y Nueva Palmira respectivamente. La última figura muestra los resultados de nivel para el escenario de caudales bajos en la sección de Nueva Palmira.

En cuanto a las velocidades, las curvas temporales obtenidas para ambos escenarios sin imposición de nivel en frontera inferior replican el comportamiento observado para las de niveles ya esquematizadas. En el escenario de caudales bajos, la sección de Fray Bentos muestra valores de velocidad entre 0.02 y 0.06m/s, exceptuando durante la onda de crecida en donde se alcanza un valor máximo de 0.24m/s. Un mayor rango de velocidades en la sección Fray Bentos es observado para el escenario de caudales medios, en donde 0.17 y 0.54m/s son el mínimo y máximo respectivamente. En cambio, cuando se

FIGURA 5.6: Influencia de marea en Nueva Palmira para condiciones de caudales medios

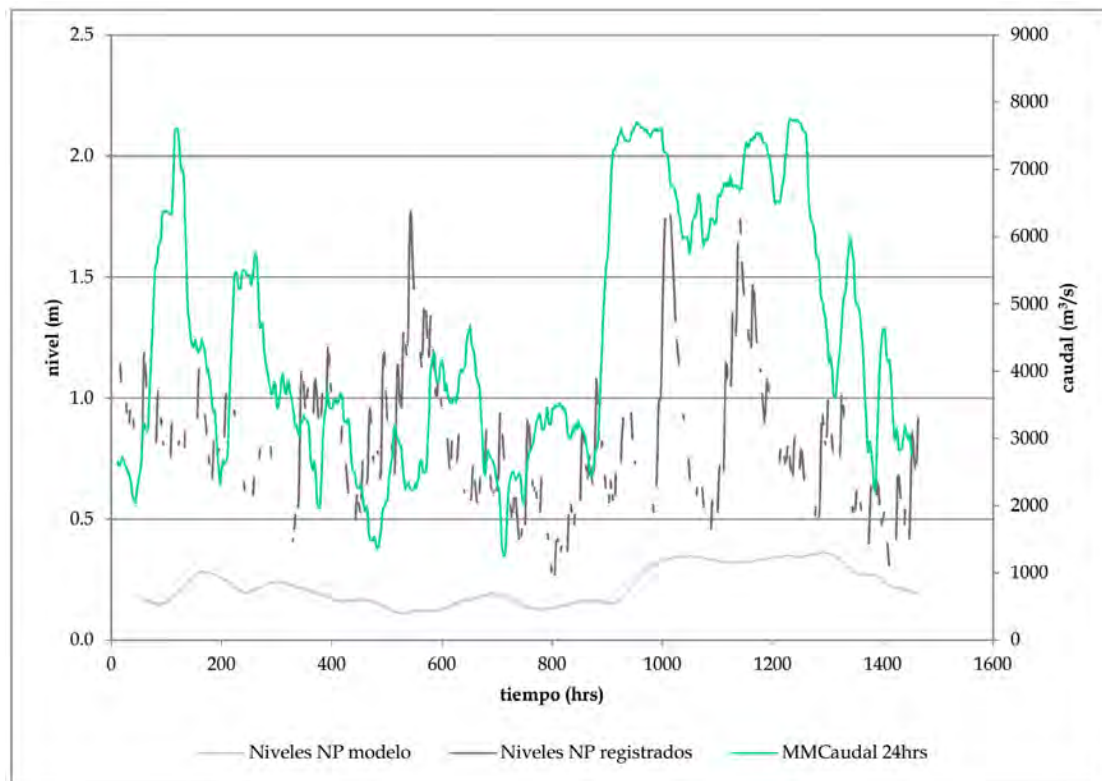
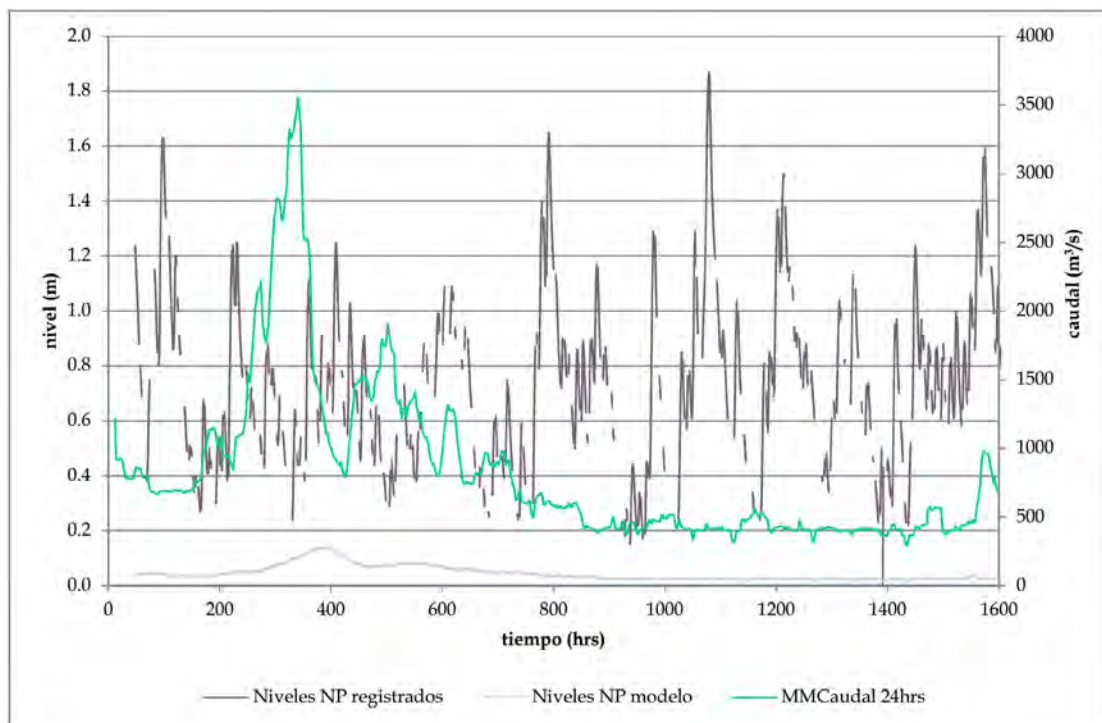


FIGURA 5.7: Influencia de marea en Nueva Palmira para condiciones de caudales bajos



consideran los niveles registrados en Nueva Palmira, el efecto de la marea ocasiona un incremento en las velocidades e inclusive ocasionalmente da lugar a eventos de inversión y, por lo tanto, velocidades negativas. Para el escenario de caudales bajos las velocidades en la sección Fray Bentos varían entre -0.27 y 0.24m/s y para el de medios entre -0.04 y 0.6m/s .

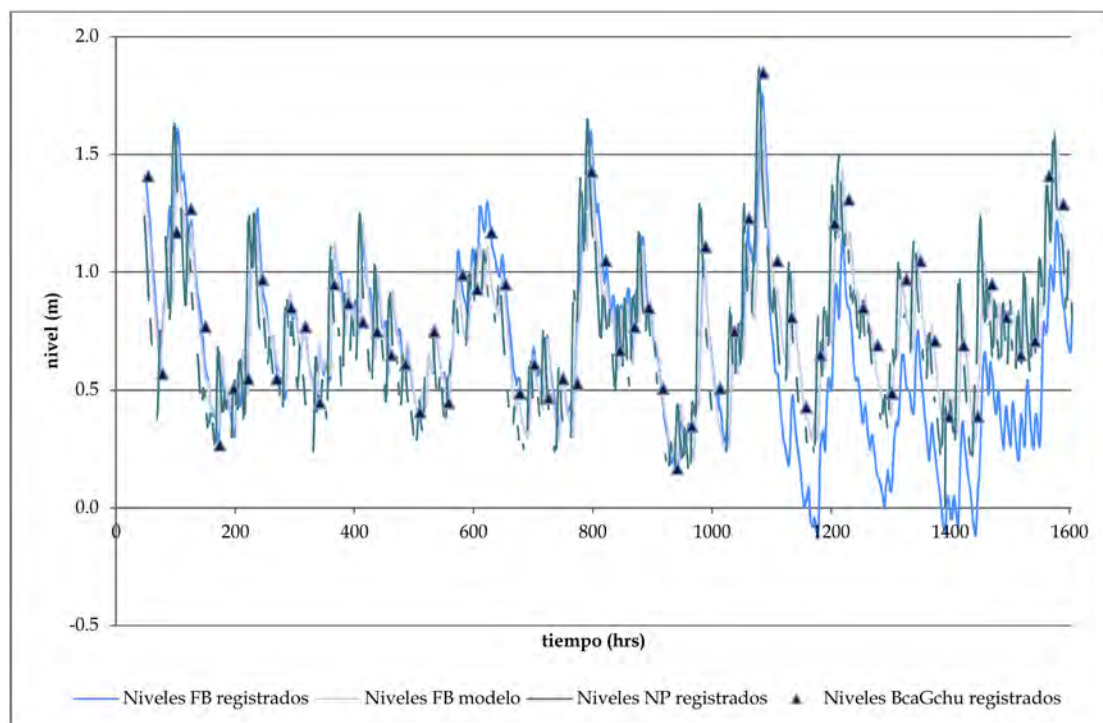
Como conclusión, la imposición de los niveles registrados en Nueva Palmira como condición de borde trae consigo un efecto de marea que se traduce en líneas generales en un gran aumento de niveles, el cual varía según la magnitud de dicha condición. Asimismo, el efecto de marea también ocasiona eventos de inversión de flujo ante situaciones de caudales bajos y medios. Una profundización de los resultados obtenidos para los diferentes escenarios se presenta en las siguientes secciones.

5.4.3. Resultados para períodos seleccionados

5.4.3.1. Situación caudales bajos

Como fue anticipado en capítulos anteriores, las situaciones con bajo caudal son las más comprometidas desde el punto de vista de la magnitud de la influencia de marea por parte de los niveles del Río de la Plata.

FIGURA 5.8: Niveles en Fray Bentos comparados con registros, condición de caudales bajos



En este sentido, se observa que el comportamiento de las elevaciones refleja el comportamiento de la marea impuesto a través de la condición de frontera en Nueva Palmira. En la Figura 5.8 se presenta una comparación entre los resultados del modelo en Fray Bentos y los datos registrados en Nueva Palmira, Fray Bentos y Boca Gualaguaychú. Si bien se incluyen las series completas de todos los registros, se recuerda que a partir de la hora 1077 los datos de Fray Bentos no se consideran confiables.

Para el caso de la sección de Fray Bentos, la curva de niveles básicamente es una traslación de la curva de niveles en Nueva Palmira, con un desfase temporal, logrando una gran similitud con la curva de niveles registrados en Fray Bentos. Visualmente es posible determinar un tiempo de tránsito de la onda proveniente de Nueva Palmira a Fray Bentos, encontrándose valores entre 4 y 6 horas.

A modo de cuantificar la similitud o cercanía de la curva de niveles obtenidos por el modelo y la conformada por las mediciones reales en la sección Fray Bentos, se calcula la correlación entre ambas, excluyendo el tramo final en el que las mediciones presentan la anomalía antes mencionada. Con la misma salvedad, se halla las promediales y máximas diferencias (en términos absolutos) entre ambas series parciales. Tanto estas diferencias como el coeficiente de correlación se indican en la Tabla 5.3.

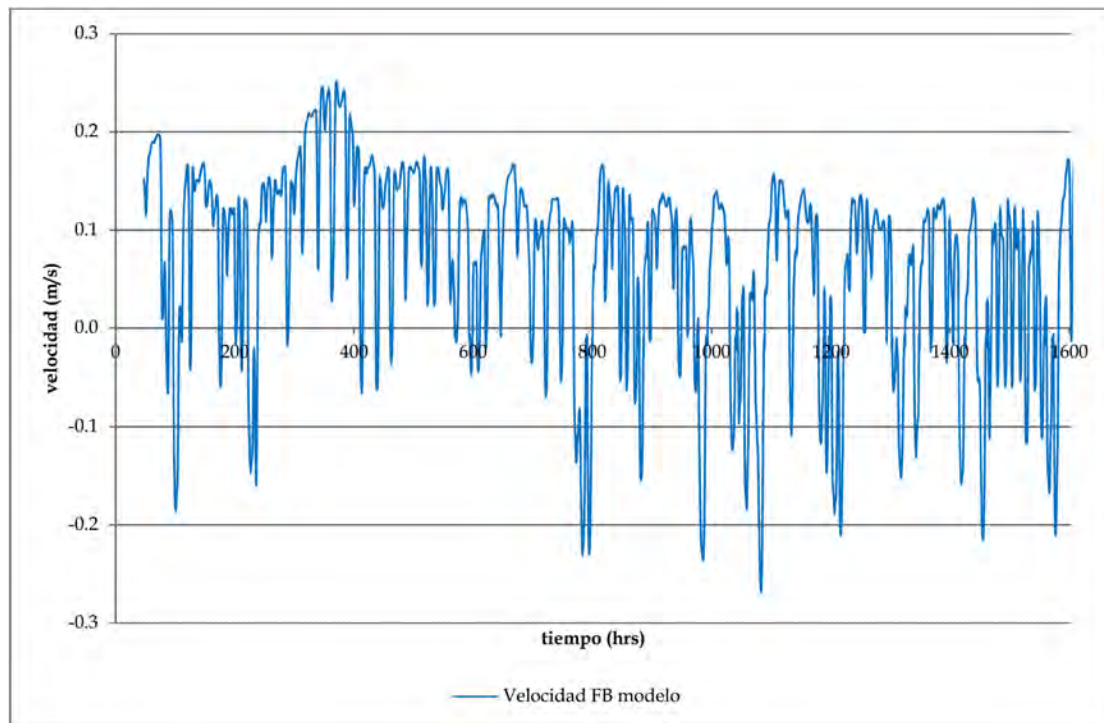
TABLA 5.3: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para escenario de caudales bajos

Coeficiente de Correlación	0.980
Diferencia Promedio (m)	0.060
Diferencia Máxima (m)	0.239

En la Figura 5.9 se presenta la serie de velocidades obtenida en la sección de Fray Bentos por el modelo para este escenario. Los máximos y mínimos de la serie se corresponden con mínimos y máximos respectivamente de la serie de niveles presentada anteriormente, por lo que también se traduce el efecto de marea involucrado en Nueva Palmira. A partir de esta figura también es posible percibir el gran efecto en las velocidades que ocasiona la marea. Las velocidades pueden ser de hasta 0.20m/s para velocidades positivas y 0.27m/s para velocidades negativas. Sin embargo, durante la onda de crecida ocasionada por caudales aportados de 3500m³/s, las velocidades alcanzan valores de 0.24m/s mostrando alternancia con velocidades negativas.

La recurrencia de velocidades negativas indicadas en la Figura 5.9 se vinculan a eventos de inversión de flujo, los cuales en numerosas ocasiones se desarrollan con gran extensión hacia aguas arriba. Tanto la frecuencia de ocurrencia como la extensión de las inversiones de flujo dependen fuertemente de las magnitudes del caudal erogado por la Represa y de los niveles en Nueva Palmira.

FIGURA 5.9: Velocidades en Fray Bentos para escenario de caudales bajos



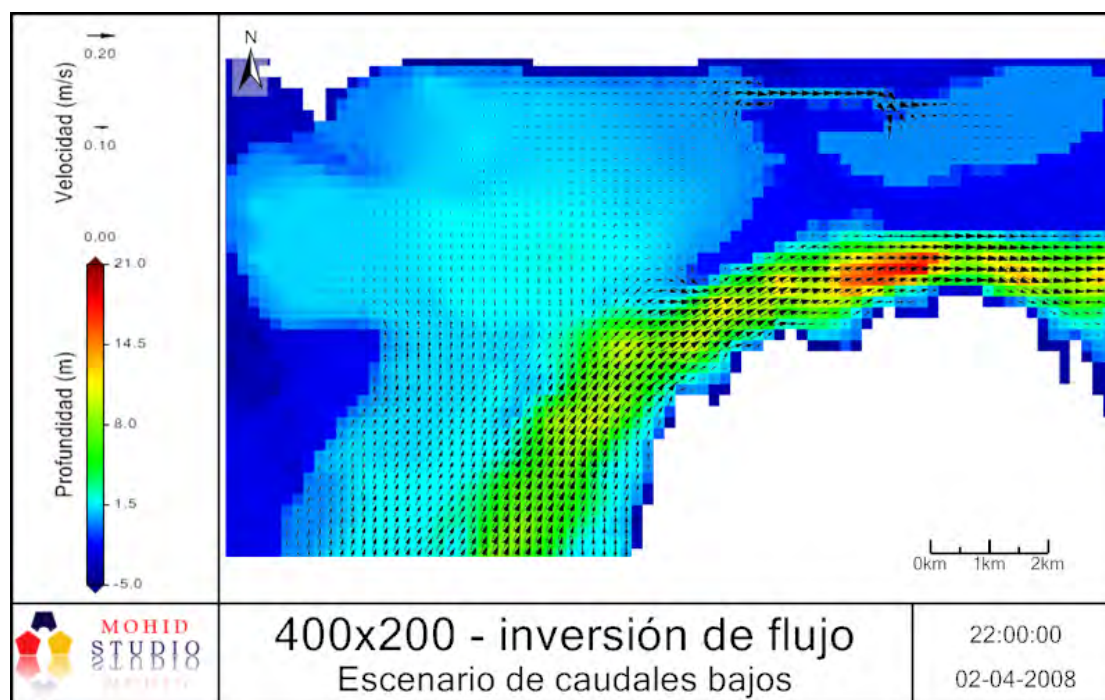
En la segunda mitad de la serie representada se puede visualizar que al mantenerse constante el caudal en un valor medio de unos $400\text{m}^3/\text{s}$, la frecuencia de ocurrencia de inversión se incrementa, e inclusive se visualiza concentraciones de eventos de inversión sucesivos en pocos días o inversiones de mayor duración, mostrando un período aproximado entre 4 y 5 días entre la ocurrencia de esas concentraciones. Niveles de poca magnitud en Nueva Palmira pueden ocasionar inversiones en Fray Bentos, inclusive valores de 0.44m respecto al cero del modelo.

Puede suceder que estas ondas de inversión se extiendan hasta Paysandú dependiendo de la velocidad de flujo. Velocidades negativas en Fray Bentos de 0.1m/s , durante el transcurso de caudales de poca magnitud en la serie, son suficientes para que la inversión en Paysandú ocurra.

La duración de la inversión de flujo varía entre unas 5 y 18 horas en Fray Bentos, y reducido entre un 50 y 70 % en Paysandú. El tiempo en que tarda la onda en alcanzar Paysandú desde la ciudad de Fray Bentos es de unas 5 horas aproximadamente, pudiendo ser un tanto menor o mayor según sea la magnitud de la onda de marea.

En la Figura 5.10 se presenta un ejemplo de situación de inversión de flujo, usual en este escenario de caudales bajos, en la cual las flechas de velocidad indican dirección negativa en ese instante.

FIGURA 5.10: Inversión de flujo en escenario de caudales bajos



5.4.3.2. Situación caudales medios

Al igual que el caso anterior, la influencia del Río de la Plata es percibida también en condiciones de caudales medios en el río Uruguay. Sin embargo, si bien los niveles reproducen la evolución de los impuestos en la condición de borde inferior (en Nueva Palmira), en general el forzante del caudal erogado por la Represa Salto Grande predomina sobre el de marea, evitando la ocurrencia o reduciendo la duración de inversión de flujo respecto al caso anterior.

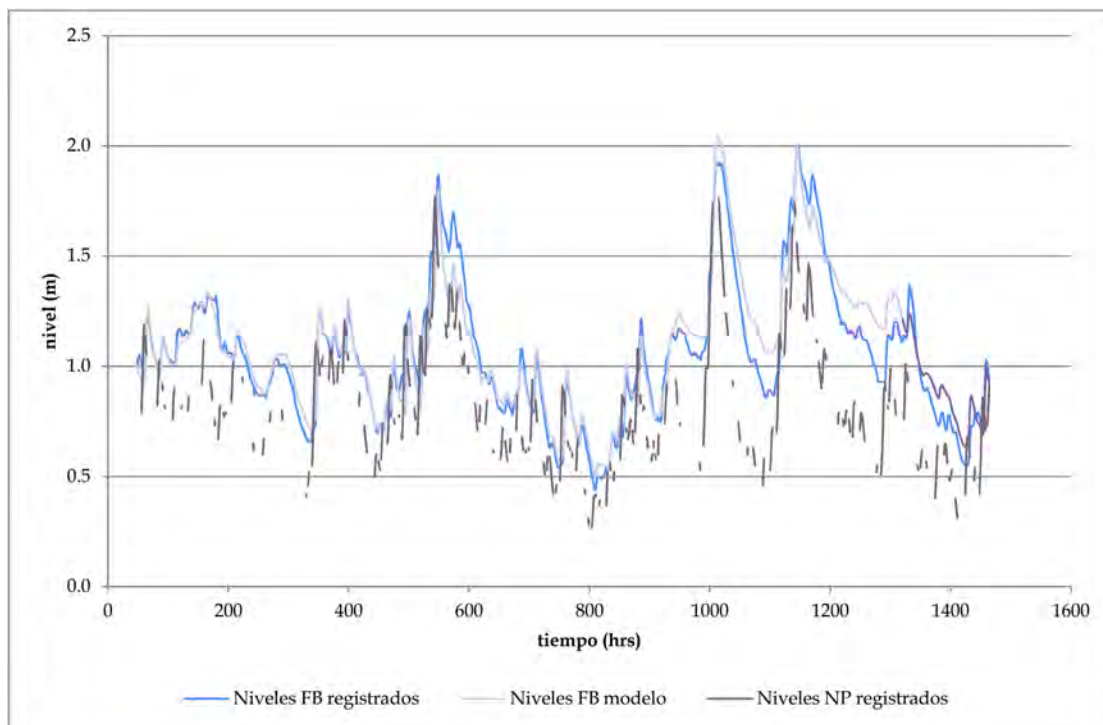
Para este escenario, se observa que el tiempo de transporte entre la sección en Nueva Palmira y Fray Bentos de un pico de crecida de nivel ocasionado por la influencia del Río de la Plata se sitúa entre 5 y 8 horas (superiores a los tiempos detectados para el escenario de caudales bajos), dependiendo de la magnitud del pico.

En las Figuras 5.11 y 5.12 se presentan, respectivamente, la información de niveles y velocidades en la sección de Fray Bentos, obtenidas a partir de las simulaciones efectuadas para el período considerado como característico de caudales medios del río Uruguay. En la primera de ellas se infiere la influencia del Río de la Plata en la sección de Fray Bentos, observándose un claro acompañamiento entre los niveles registrados y los obtenidos por el modelo en dicha sección. Sin embargo, a partir del día 25/07/2013 (hora 950 en la figura) comienza un aumento en la brecha entre los datos recibidos del modelo y los datos registrados, y continúa con gran diferencia hasta el final del período. Los valores

del modelo son superiores a los registrados. Esta divergencia se debe a la ocurrencia de la descarga de grandes caudales desde la Represa, en un rango de 5900 y 7700m³/s en términos de valores promedio en 24 horas.

Esto último podría interpretarse como que la configuración utilizada por el modelo no logra reproducir adecuadamente el escurrimiento del caudal erogado por la Represa, en situaciones en las que adquiere valores dentro del rango mencionado. Lo mismo se puede extraer de la comparación de los valores reales y resultado del modelo de niveles en Boca Gualaguaychú, visualizándose un comportamiento análogo al de Fray Bentos.

FIGURA 5.11: Niveles en Fray Bentos para escenario de caudales medios



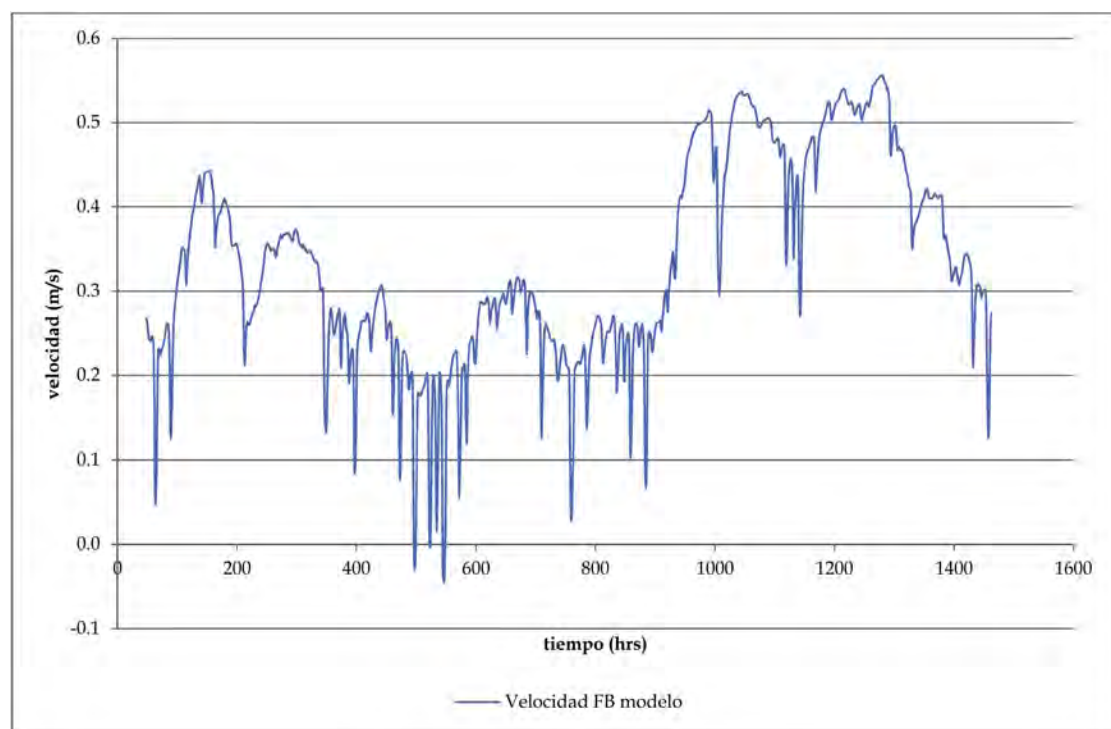
A modo de identificar la similitud de la evolución de niveles entre los resultados obtenidos por el modelo y los registros disponibles en la sección de Fray Bentos, se determinan los parámetros de coeficiente de correlación junto con diferencias entre los datos del modelo y los registros (en metros), en su valor medio y máximo. Esto se presenta en la Tabla 5.4.

TABLA 5.4: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para escenario de caudales medios

Coefficiente de Correlación	0.957
Diferencia Promedio (m)	0.071
Diferencia Máxima (m)	0.328

A partir de analizar las velocidades en Fray Bentos resulta fácil la identificación de ocurrencias de inversión de flujo, aunque las mismas suceden en menor cantidad que en el escenario anterior descrito de caudales bajos. Se observa en la Figura 5.12 algunos períodos en los que la dirección de flujo se invierte, siendo éstos de una duración aproximada entre 1 y 4 horas en Fray Bentos, sensiblemente inferior a la permanencia que puede disponer la inversión en situaciones de caudales más bajos como lo presenta el escenario antes estudiado.

FIGURA 5.12: Velocidades en Fray Bentos para escenario de caudales medios

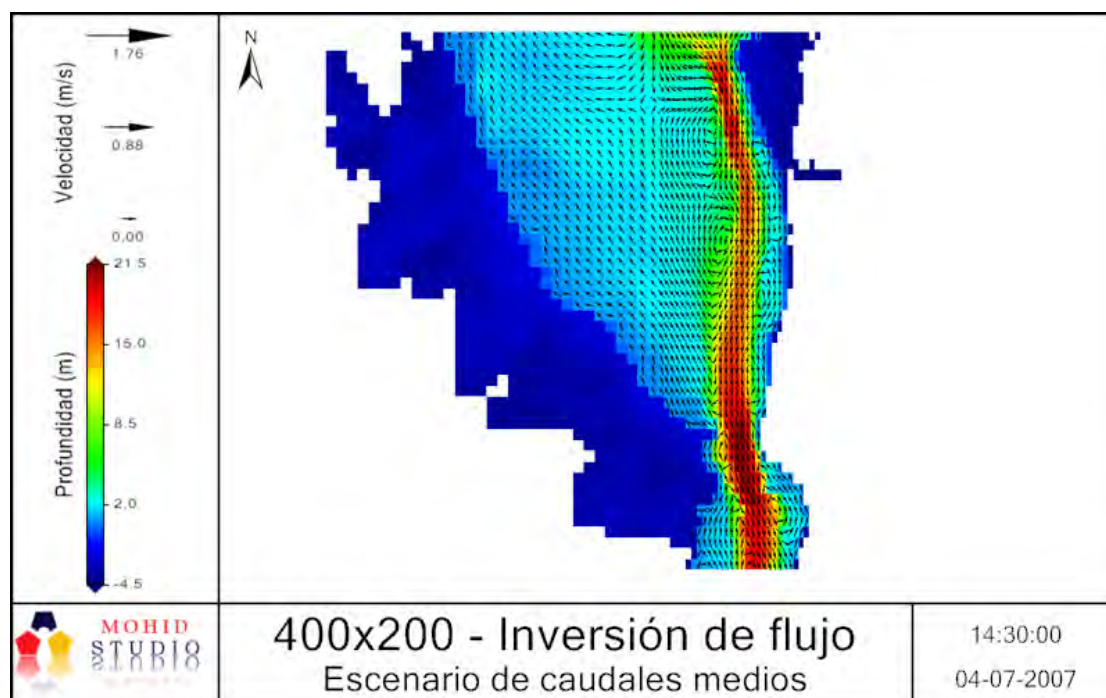


Sin embargo, es importante destacar que la inversión de flujo puede suceder también de forma parcial (Figura 5.13). Esto es sin afectar el canal principal del río, pues el fenómeno de inversión de flujo puede suceder primeramente en las márgenes, en donde la profundidad, así como las velocidades de flujo, es menor actuando el canal como una pared impermeable. Luego, dadas las condiciones adecuadas (según se mencionó en la sección anterior o aún más favorables), se transmite la inversión del flujo inclusive en el canal.

5.4.3.3. Situación caudales altos

En el escenario de caudales altos se obtienen mayores magnitudes tanto de niveles como de velocidades respecto a los dos anteriores. Como consecuencia de valores de caudales aportados al sistema extremadamente elevados (entre 26000 y 21000m³/s en términos de

FIGURA 5.13: Inversión parcial de flujo en escenario de caudales medios



media móvil con ventana temporal de 24 horas), se obtienen niveles entre 4 y 3 metros (Figura 5.14), con velocidades superiores a 1m/s (Figura 5.15), en la sección de Fray Bentos. Ambos parámetros duplican los valores homólogos obtenidos para el escenario de caudales medios.

En la Tabla 5.5 se presentan los indicadores cuantitativos (coeficiente de correlación, y diferencias en términos absolutos en promedio y máximo) obtenidos a partir de la información generada por el modelo y los datos reales. Si bien el coeficiente de correlación no anticipa grandes inconvenientes, indicando similar grado de aproximación al de los escenarios anteriores, al comparar y analizar con mayor profundidad la información obtenida para este escenario se extraen conclusiones no del todo satisfactorias.

TABLA 5.5: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para escenario de caudales altos

Coeficiente de Correlación	0.957
Diferencia Promedio (m)	0.400
Diferencia Máxima (m)	0.910

Dichas conclusiones se refieren a tres diferentes factores que claramente se reproducen en la Figura 5.14, la cual esquematiza los resultados para el caso de Fray Bentos, pero análogamente suceden también en Boca Gualeguaychú y Paysandú.

FIGURA 5.14: Niveles en Fray Bentos para escenario de caudales altos

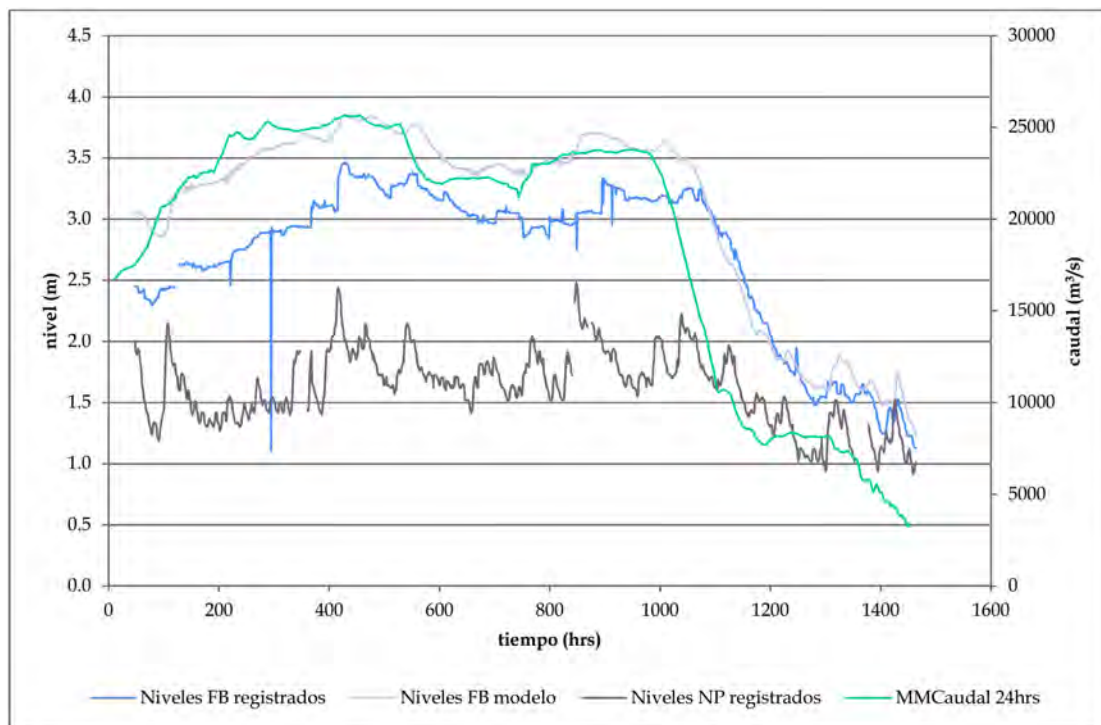
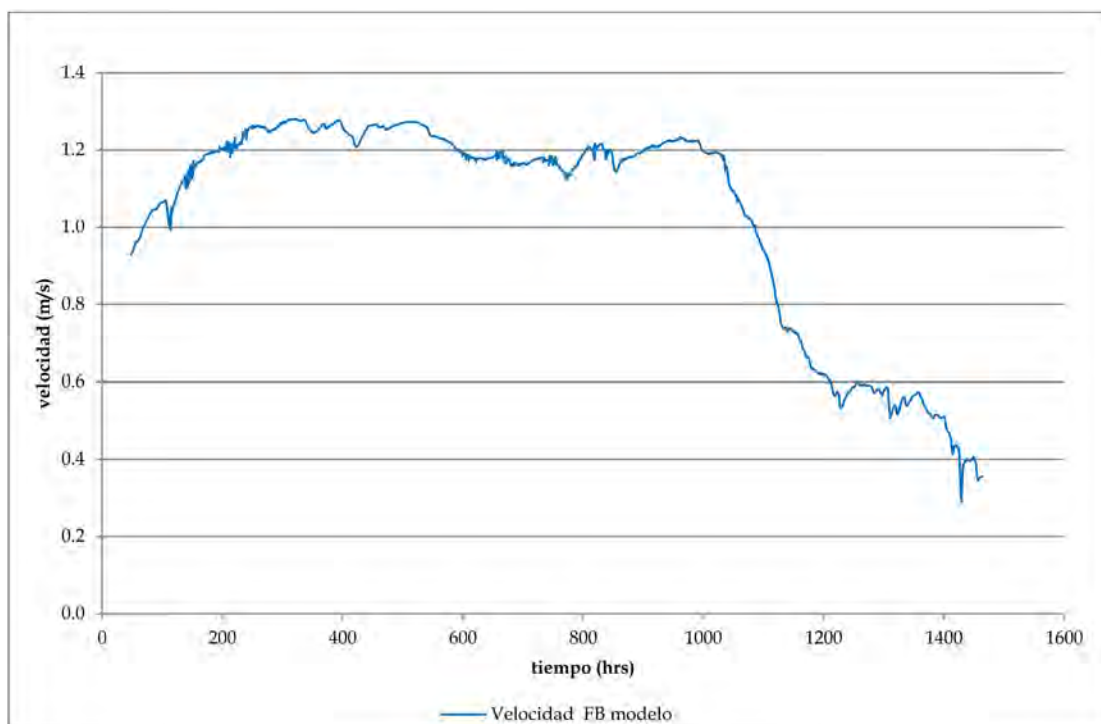


FIGURA 5.15: Velocidades en Fray Bentos para escenario de caudales altos



El primero corresponde al apartamiento que se observa entre los valores de niveles resultados del modelo y los datos de registros, siendo los primeros superiores a los segundos. En el caso de Paysandú las diferencias se cuantifican entre valores de 0.51 y 2.31 metros (en promedio 1.31m); los niveles del modelo alcanzan valores entre 8 y más de 9m cuando los datos reales rondan entre los 7 y un poco más de 8m. En Fray Bentos las diferencias se ubican entre 0 y 0.91 metros, y en Boca Gualeguaychú entre 0.01 y 0.71 metros.

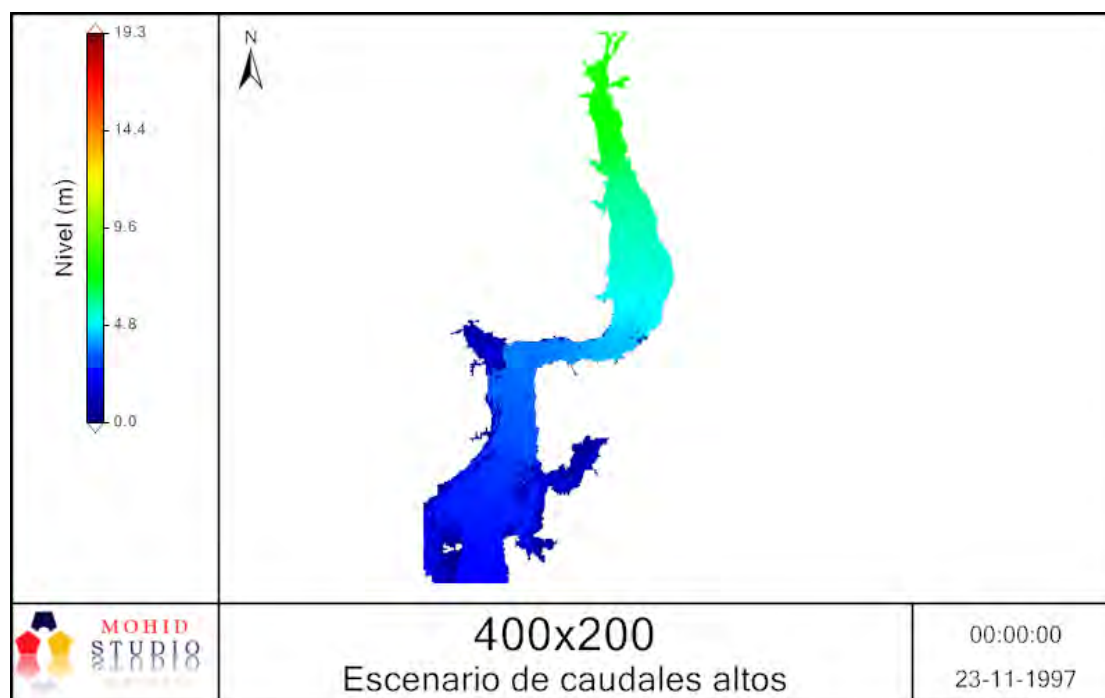
Dicha brecha se asocia con la magnitud del caudal del sistema. En el caso de Fray Bentos, la diferencia entre niveles del modelo y reales para caudales elevados varía entre 0.30 y 0.91 metros, situación que predomina en la serie debido a valores extremadamente elevados de caudal. En cambio, en el extremo final de la serie temporal simulada las diferencias entre ambas curvas se sitúan entre unos pocos y 30 centímetros.

El segundo factor se relaciona con el cambio de comportamiento de los niveles marcado a partir del desarrollo de un descenso abrupto de niveles situado en el tramo final de la curva. Hasta el día 22/11/97 (entorno de la hora 1000) la serie temporal de caudales erogados por la represa Salto Grande presenta valores elevados, pero a partir de dicho momento comienza a desarrollarse una fuerte caída en los mismos (como se ve en la Figura 5.14) que se corresponde con una fuerte caída de niveles retrasada en el tiempo debido al tiempo de tránsito hasta Fray Bentos. La variación de los caudales de la Represa sucede entre valores de 23000 a 25000m³/s disminuyendo hasta un entorno de 8000m³/s en unas 210 horas (casi 9 días).

Se observa un cambio sustantivo en el comportamiento y diferencia de las series entre la franja temporal anterior y posterior a la caída de niveles. En el primer tramo, el comportamiento de ambas curvas se vincula a la independencia de los niveles del río obtenidos en Fray Bentos, al igual que en Paysandú, en cuanto al comportamiento de los niveles registrados en Nueva Palmira. En dicha franja temporal (previo a la caída de niveles), los caudales erogados (en términos de media móvil de 24 horas) se sitúan en un orden entre 22000 y 2600m³/s que conllevan niveles con valores entre 3 y 4 metros, obteniéndose un gran área de inundación, siendo completa en el tramo comprendido entre Fray Bentos hasta casi la ciudad de Paysandú (aguas arriba no se cuenta con planicie de inundación). En cambio, aguas abajo del *Martillo*, debido a que el cauce cuenta con una mayor área superficial, el incremento de niveles no es tan significativo, y no se desarrollan extensiones de dominio inundadas de forma tan importante como el caso anterior. La Figura 5.16 presenta el alcance horizontal en una zona de dominio, en la que es posible observarse las diferencias.

Por el contrario, luego de la caída, el comportamiento de la serie de niveles difiere del anterior. Esto es, a partir de alrededor de la hora 1200 de la serie (caudales del entorno de 8000m³/s), los niveles de Fray Bentos se vuelven más permeables a la variabilidad de los

FIGURA 5.16: Inundación del dominio en escenario de caudales altos



niveles de Nueva Palmira debido a la disminución de la magnitud del forzante erogado por Salto Grande. Si bien tanto la serie modelada como la registrada muestran este comportamiento, al igual que el tramo previo, los niveles del modelo son superiores a los reales, aunque alcanzando diferencias menores como ya fue mencionado anteriormente.

Y por último, el tercer factor detectado concierne a la asociación entre las curvas de niveles reales y obtenidas por el modelo en sus extremos relativos, es decir, la relación entre la forma de ambas curvas. En el tramo comprendido hasta el pie de la caída de niveles descrita, en el que predominan caudales altos extremos, se puede interpretar que, si bien la evolución de ambas curvas son similares, el comportamiento observado divide el período en dos partes aproximadamente iguales según su correspondencia temporal. Mientras que en la primera parte (hasta hora 650 del período considerado) los valores entre ambas curvas de extremos relativos coinciden o difieren levemente, en la segunda las ondulaciones de la serie obtenida por el modelo se anteceden a las presentadas por la curva real, siendo dicha diferencia temporal entre 20 y 40 horas. Estos valores se consideran sumamente elevados si se tiene en cuenta que el tiempo de tránsito de caudales erogados hasta el extremo final del dominio es del mismo orden.

Asimismo, se agrega que dicho descenso abrupto de niveles del modelo antecede al proveniente de los niveles reales. Sin embargo, este comportamiento se invierte una vez ya desarrollada la caída. Con niveles entre 1 y 2 metros se observa una diferencia temporal,

pero esta vez un “atraso” de la curva de niveles del modelo respecto a la real, difiriendo del tramo antecesor.

A partir de la anteriormente descripta falta de correlación temporal entre las series de niveles obtenidas por el modelo y la determinada a partir de los registros accedidos, se infiere que el modelo no es capaz de representar adecuadamente el tiempo de tránsito de los caudales erogados por la Represa para caudales altos, tal vez debido a la inadecuada conformación batimétrica, y por lo tanto, capacidad de almacenamiento del sistema. Como prueba preliminar, a modo de incrementar la extensión longitudinal del modelo (en sentido del flujo), y retrasar el tránsito del flujo, se considera una prolongación en el extremo superior de 20km lineales, y así prolongando la descarga del caudal erogado por la Represa Salto Grande. Los resultados de la simulación con esta modificación de la configuración del modelo no reproducen diferencias en los niveles obtenidos en Fray Bentos.

A modo de conclusión, los resultados aquí presentados en conjunto con lo mencionado en el escenario anterior (particularmente lo referido a su tramo final en el que el forzante dominante es el caudal de aporte), podría estar sugiriendo la calidad insuficiente de la información batimétrica. Por lo tanto, en la sección *Ajustes a incorporar* del presente capítulo se plantean variaciones batimétricas, a partir de las cuales se determina su repercusión en los niveles y velocidades.

5.4.4. Conclusiones

Los resultados presentados anteriormente se obtienen a partir de un análisis de la hidrodinámica del río, complementado con revisar focalmente el comportamiento de las variables hidrodinámicas en ciertos puntos de interés predefinidos, detectando su acercamiento o lejanía a registros de medición disponible en los mismos. El más relevante indudablemente es la sección de Fray Bentos, debido a su proximidad a la planta UPM, sumado a que la morfología del río entre ambos puntos es relativamente constante. También se consideran la sección de Paysandú y el punto de medición en Boca Gualeguaychú, aunque estos en menor relevancia.

Como primer resultado, los tiempos de tránsito del modelo para caudales medios a bajos y medios a altos resultaron en menor magnitud que los determinados sin la imposición de niveles en Nueva Palmira. Esto indicaría el accionar de un “aceleramiento” en el flujo debido a las condiciones de niveles impuestas en Nueva Palmira. Para un caudal de unos $3500\text{m}^3/\text{s}$ el tiempo de tránsito desde la Represa hasta Fray Bentos resulta en un entorno de 25 horas con condición de niveles en Nueva Palmira. Para caudales en el

entorno de $7500\text{-}7600\text{m}^3/\text{s}$ el tiempo de tránsito hasta Fray Bentos es de un rango entre 30 y 34 horas.

A partir de los resultados expuestos para los tres escenarios considerados, se obtiene distintos grados de calidad de resultados del modelo: bueno en situación de caudales bajos, moderado en situación de caudales medios e insatisfactorio en situación de caudales altos.

Asociado particularmente con los escenarios de caudales bajos y medios, se destaca la notable influencia de la marea como primera conclusión, siendo más perceptible cuanto de menor caudal sean las condiciones de flujo, por lo que es el protagonista principalmente en situación de caudales bajos. Esta influencia provoca un aceleramiento en la salida del caudal del sistema, debido a la gran frecuencia de fluctuaciones a las cuales se ve sometido el río cuando el forzante provocado por el caudal no es suficiente para sobreponerse al efecto de marea.

Cuando el forzante del caudal del sistema es suficientemente pequeño, la marea predomina en la hidrodinámica del dominio ocasionando inversión de flujo. Este fenómeno ocurre por un orden de 5 a 18 horas en Fray Bentos, dependiendo de las condiciones dadas en cuanto a niveles de Nueva Palmira y caudales erogados por la Represa. Inclusive, bajo condiciones determinadas, la inversión de flujo puede alcanzar la ciudad de Paysandú y puede permanecer por 2 a 9 horas y también reflejando la evolución de niveles y velocidades de la sección Fray Bentos, aunque desfasadas en el tiempo por un lapso aproximado de 5 horas y mostrando cierta atenuación en la magnitud de ambas variables. Dichas condiciones se basan en un caudal sostenido de aproximadamente $400\text{m}^3/\text{s}$ y niveles en Nueva Palmira superiores a 0.44m.

Siguiendo con lo anterior, puede suceder también una inversión de flujo de forma parcial, como se ha identificado en el escenario de caudales medios. Esto es que la inversión suceda en las zonas someras del río, en donde la profundidad y las velocidades en sentido normal del río son menores. En situaciones en las que la velocidad del canal no es lo suficientemente pequeña como para que el forzante proveniente de Nueva Palmira se sobreponga a él, el canal actúa como una pared impermeable a través de la cual no sucede flujo transversal de orilla a orilla del río. Esto sucede, sin embargo, aguas abajo de Fray Bentos en mayor medida, incluyendo la zona del *Martillo*. Desde Fray Bentos hacia aguas arriba la morfología del río, siendo más estrecha, dificulta la diferenciación sectorial sustantiva en las velocidades a lo largo de las secciones trasversales, lo que ocasiona que a modo general el flujo se comporte de igual forma en toda la sección.

Diferente a lo anterior es lo detectado para el escenario de caudales altos, en el que se identifican dos grandes inquietudes al comparar la serie de niveles obtenida por el modelo

y la conformada a partir de datos reales: una asociada a la diferencia en los valores de nivel, siendo superiores los del modelo hasta en 1 metro en la sección de Fray Bentos, y la segunda que concierne a un desfase temporal entre ambas series identificado en la segunda onda de crecida. Lo particular de este desfase, es que los resultados del modelo anteceden a los datos registrados, en un orden de 20 y 40 horas, siendo comparable con el tiempo de tránsito del dominio. También dicho desfase es percibido en la sección de Paysandú.

Por lo tanto, cuando suceden caudales altos, y también altos niveles en Fray Bentos, la batimetría del área de inundación no sería correcta ya que el nivel se eleva más que lo que debería según lo reflejado en la serie de registros reales. Esto podría significar dos cosas:

- Que la inundación no ocurre en forma completa y que el área de inundación es menor a la real
- Que las profundidades de las planicies de inundación, en la realidad, disponen de mayor profundidad, por lo que son inundadas más rápidamente cuando la onda de inundación sucede y la almacenan por más tiempo

Lo anterior implica analizar diferentes configuraciones de batimetría, por lo que esta variable se la incluye dentro de la siguiente sección junto a otros parámetros a los cuales el modelo puede mostrar afectación. Este tipo de análisis se realiza con el objetivo de identificar y analizar fuentes de incertidumbre que puedan estar afectando de forma sustantiva los resultados.

5.5. Ajustes a incorporar

Si bien la información disponible en cuanto a series históricas de niveles dispone de frecuencia horaria, junto con el resto de la información que se cuenta, no son suficientes para efectuar una calibración y validación profunda del modelo hidrodinámico bidimensional, si se lograra obtener una adecuada correspondencia entre los resultados de éste y los registros reales se podría obtener una adecuada representación de la variabilidad instantánea del flujo.

Lo anterior impulsa a complementar el estudio hidrodinámico del modelo aquí presentado con un *análisis de sensibilidad* ante la implementación en el modelo de variables importantes que pueden modificar el comportamiento hidrodinámico del río en estudio, con intención de analizar la influencia de las incertidumbres más significativas.

En este sentido, se analiza individualmente cuánto puede afectar los resultados una variación en la magnitud de ciertos parámetros considerados en el modelo, tanto externos como también físicos. Como variables externas se consideran el aporte de caudal proveniente del río Negro y del río Guauguaychú (los dos aportes más importantes que posee el río Uruguay) y también la influencia del viento; como las físicas se incluye la batimetría.

Primeramente se analiza la influencia que podría estar asociada al aporte del río Negro y el río Guauguaychú. Para considerar el efecto del viento se impone en el modelo una condición de viento de velocidad constante en el tiempo y en el dominio, de valor medio 7m/s y extremo 20m/s con dirección sudeste. Si bien se entiende que las condiciones asumidas son hipotéticas, se visualiza la afectación que produce el viento en la hidrodinámica del río, principalmente ante condiciones extremas de viento.

Por otra parte, se analizan variaciones de batimetría. Se consideran cinco variantes: profundización del cauce, profundización de la totalidad del dominio, profundización de las planicies de inundación, extensión de las planicies y el incremento de la resolución de la malla de cálculo (disminución del tamaño de la celda computable). La profundización se ejecuta de forma de incrementar la profundidad de las celdas a afectar en 50 (configuración denominada “+50cms”) y 100cms (configuración denominada “+100cms”). En el caso de la primera variante, se subdivide en una profundización total y una parcial del cauce, esta última hacia aguas arriba de la isla Santa María Grande (progresiva aproximada 117km). La segunda variante es una extensión de la primera a todo el dominio. La tercera variante se refiere a la modificación solamente de las planicies en todo el dominio, disminuyendo la pendiente de las mismas al reducir la profundidad de las celdas a la mitad. La cuarta variante concierne a la inclusión de planicie de inundación en el tramo superior del río aproximadamente hasta la ciudad de Paysandú. Por último, la última variante comprende en cuatriplicar la resolución de la malla computacional.

A lo largo de este capítulo, se adopta como criterio dominante determinar la correlación entre la serie de datos de niveles en Fray Bentos y la serie obtenida por el modelo, considerando varias configuraciones posibles dependiendo de los valores adoptados para cada una de las variables estudiadas. Los escenarios utilizados, según aplique para cada uno de los parámetros analizados, son los definidos anteriormente como escenario de caudales altos, de caudales medios y caudales bajos. También se efectúan comparaciones con la información real disponible en la sección de Paysandú, aunque éstas tienen como objetivo extraer cuánto se asemeja a la forma de la curva de registros de nivel y no diferencias cuantitativas debido a la lejanía de esta sección respecto a la ubicación de la planta UPM.

Dichas comparaciones se enmarcan en una mirada del comportamiento hidrodinámico en la totalidad del dominio para cada una de las simulaciones efectuadas.

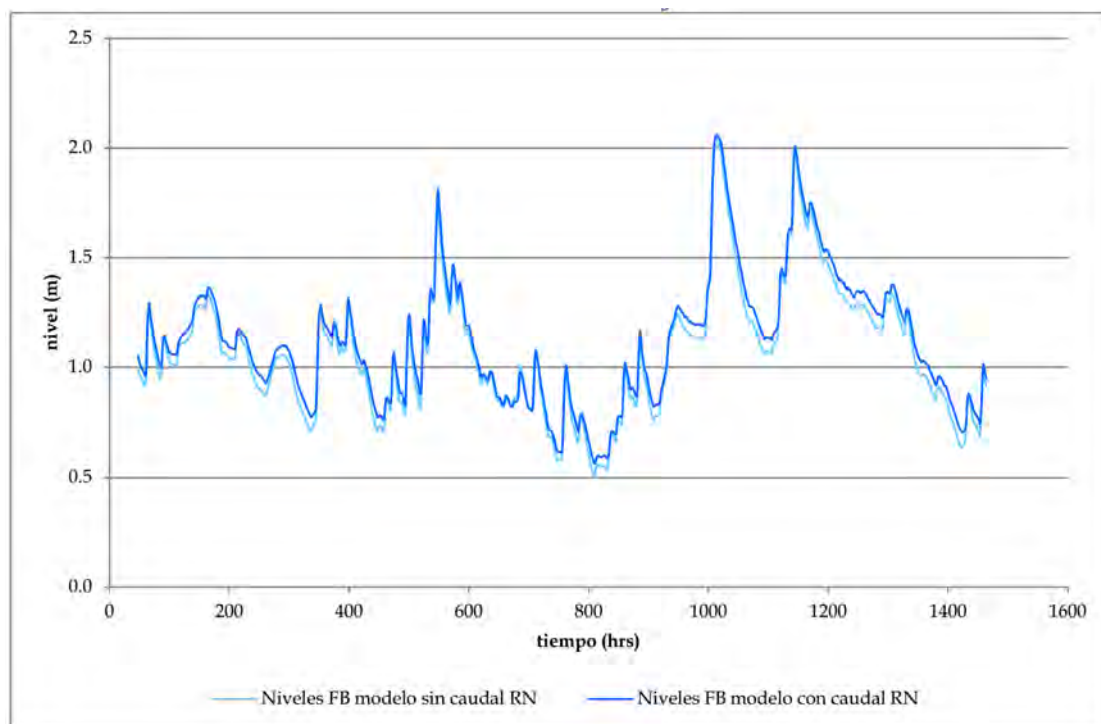
5.5.1. Aporte del río Negro

Para efectuar un análisis de la influencia del aporte de caudal por parte del río Negro al sistema, se efectuaron simulaciones con una descarga adicional correspondiente a este aporte. También se incluyó la información batimétrica del río Negro en la configuración batimétrica, de acuerdo a lo que fue mencionado anteriormente.

El caudal de aporte se consideró un valor constante de $1200\text{m}^3/\text{s}$, del mismo orden que el obtenido como un caudal medio diario a partir de la información brindada por parte de UTE. Dicho valor se extrae de uno, dos o hasta tres valores de caudal instantáneos diarios correspondiente a los años 1997, 1999, 2000, 2002, 2007, 2008 y 2010.

Debido a la magnitud del caudal medio del río Negro frente al del río Uruguay, se analizan los escenarios de caudales medios y bajos, ya que el efecto del primero ante caudales altos sería despreciable.

FIGURA 5.17: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios con efecto de río Negro



En el caso del escenario de caudales medios, se detecta en líneas generales un leve aumento de niveles en Fray Bentos con el aporte del río Negro respecto a la configuración

original. Sin embargo, en la faja en la que domina el forzante de marea, en el entorno de las 500 y 700 horas de la serie, la diferencia entre los niveles obtenidos entre ambas configuraciones se reduce a unos pocos centímetros. Esto se visualiza en la Figura 5.17, en donde se esquematizan las curvas de niveles de las configuraciones sin y con el aporte del río Negro.

Las diferencias más notables en Fray Bentos entre ambas configuraciones del modelo (sin considerar y considerando el aporte del río Negro) se detectan en los puntos altos, del orden de un par de centímetros, y en los puntos bajos, en el entorno de los 5cms. Pero la diferencia de niveles disminuye aguas abajo de dicha ciudad, en donde el río adquiere un ancho mucho mayor. Particularmente, en la cercanía de la desembocadura del río Negro, el aporte de éste se traduce en un aumento de niveles de cómo máximo un par de centímetros.

En cuanto al campo de velocidades, no se observan grandes alteraciones (siendo imperceptibles en la zona del *Martillo*), detectándose en líneas generales una leve disminución en la mayoría de la ventana temporal, y un ligero aumento en momentos que suceden puntos bajos (sucediendo ondas de marea). Esto se esquematiza en la Figura 5.18, donde se presenta los valores obtenidos para la sección de Fray Bentos. En dicha sección se extraen parámetros indicativos de la similitud entre la curva obtenida para el modelo original y la obtenida para el variante del mismo considerando el ingreso del caudal del río Negro, los cuales son expuestos en la Tabla 5.6.

En general, el aporte del río Negro afecta la dinámica del río Uruguay de forma diferenciada según sea en el tramo hacia aguas arriba o en el tramo hacia aguas abajo de su desembocadura en el río Uruguay: en el primer caso actúa como un leve freno reduciendo las velocidades. Si el caudal del río Uruguay no es lo suficientemente elevado para atenuar el efecto de marea proveniente de Nueva Palmira, al tener que escurrir un mayor volumen de agua con este mismo nivel limitando, se visualiza un frenado que efectúa el ingreso del aporte del río Negro desde su desembocadura hacia aguas arriba del río Uruguay. En cambio, en los instantes en los que suceden mínimos relativos de velocidades asociados a incrementos de nivel de marea, el aporte de caudal por parte del río Negro atenúa la disminución de velocidades ocasionada por la influencia de altos niveles originados por marea (como no es posible incrementar los tirantes, se eleva la velocidad).

En el tramo inferior el aporte del río Negro se traduce en un incremento de velocidades en el canal respecto a la situación original (cuando no hay inversión). En situaciones de inversión, el aporte reduce las velocidades y por ende la extensión hacia aguas arriba de la misma, e inclusive en algunos casos puede evitar su prolongación hasta Fray Bentos. Particularmente, en el escenario de caudales medios se destaca la eliminación de una de

las tres ocurrencias de inversiones de flujo instantáneas, debido a que el aporte de caudal del río Negro junto con el del río Uruguay logran dominar sobre el forzante de marea desde aguas abajo en ese instante. Esto permite una mayor salida de masa respecto a la situación original, lo que desencadena posteriormente obtener menores velocidades en Fray Bentos ya que el flujo es menor. Esto es lo que sucede entre las horas 580 a 750 de la serie, período que precede a una situación fuerte de inversión de flujo y donde el nivel impuesto en Nueva Palmira es sumamente pequeño (aproximadamente 50cms).

FIGURA 5.18: Velocidades en Fray Bentos con aporte del río Negro, escenario de caudales medios

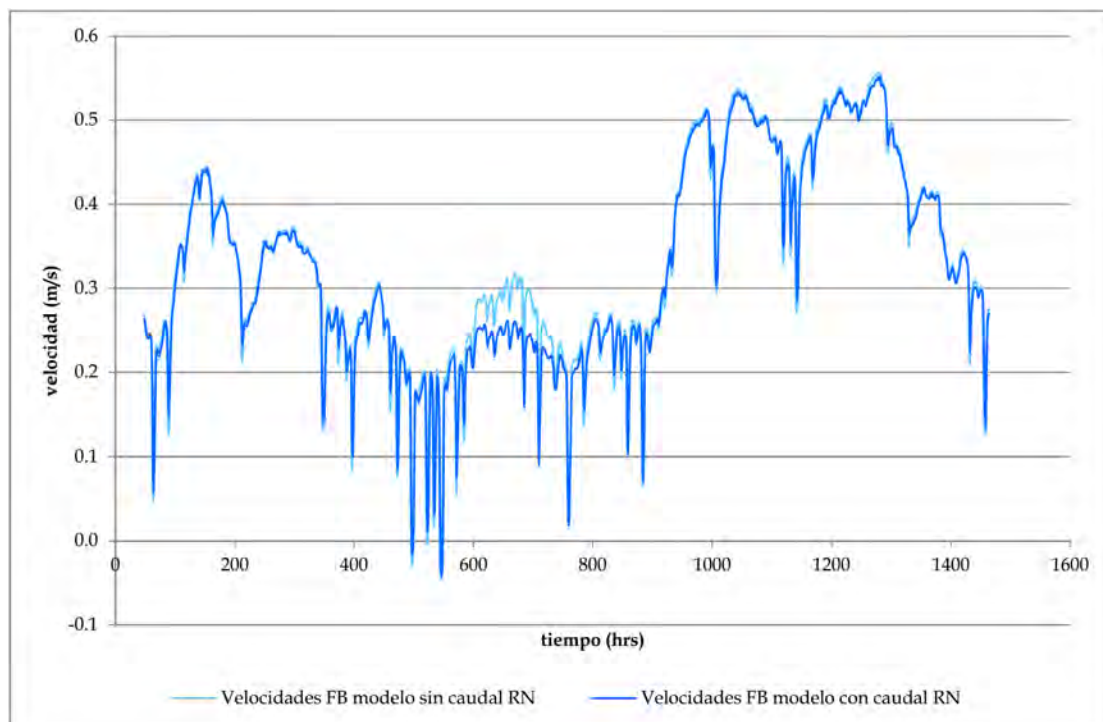


TABLA 5.6: Diferencias entre configuración original y variante con río Negro, escenario de caudales medios

	Nivel (m)	Velocidad (m/s)
Diferencia Promedio	0.042	0.009
Diferencia Máxima	0.085	0.067

Las diferencias identificadas, tanto en los valores de nivel como de velocidad, se atenúan en condiciones de caudales bajos. En promedio, se disminuye un orden en ambas variables, según se infiere de la Tabla 5.7. Esto se debe a que el aporte de caudal por parte de la Represa es muy pequeño y aun así, junto con el aporte del río Negro, el forzante resultante en su conjunto no domina sobre la influencia de marea.

TABLA 5.7: Diferencias entre configuración original y variante con río Negro, escenario de caudales bajos

	Nivel (m)	Velocidad (m/s)
Diferencia Promedio	0.042	0.007
Diferencia Máxima	0.136	0.057

5.5.2. Aporte del río Guauguaychú

Con el objetivo de analizar el efecto de la descarga del río Guauguaychú principalmente en la zona afectada por la descarga de UPM, es decir, en la zona particularmente que contiene Fray Bentos y UPM, se ingresa al modelo una descarga adicional asociado a dicho curso. Para ello, se adoptó una descarga constante de un caudal de $200\text{m}^3/\text{s}$ como el aporte de este río. También para este caso se modifica la batimetría para incluir en el modelo la descarga del aporte del curso. La modificación se efectúa como ha sido detallado anteriormente.

En el escenario de caudales bajos no se detectaron variaciones sustantivas, en tanto en la velocidad y niveles asociados al canal en la sección del río Uruguay a la altura de Fray Bentos, respecto a la configuración original del modelo. Por ello, se entiende que en dicha sección y aguas arriba de ésta no se percibe una influencia del río Guauguaychú merecida de considerar en el modelo general.

En cuanto a la hidrodinámica de la zona aledaña a la descarga del río Guauguaychú, ésta no sufre alteraciones significativas, notándose, sin embargo, que el aporte de dicho río ocasiona un retroceso del frente de ingreso del caudal proveniente desde el cauce principal del río Uruguay en la zona poco profunda del *Martillo*.

5.5.3. Influencia del viento

Así como lo describe Ecometrix (2006), el viento también es un factor que puede actuar en la hidrodinámica del río en estudio.

El río Uruguay se localiza dentro de una región ciclogénica del hemisferio sur la cual se ubica entre latitudes $25\text{--}65^\circ$, y asimismo se posiciona en uno de los máximos de actividad denominada región Litoral que posee las frecuencias más elevadas de ciclones extra-tropicales en invierno (Possia et al., 2003). Por su parte, Simmonds y Keay (2000) encuentran, utilizando los reanálisis del NCEP para el período 1958-97, que la zona del Río de la Plata es favorable para el desarrollo de ciclogénesis durante el invierno.

Relacionado con el desarrollo de ciclones en la región Litoral, concretamente entre las latitudes $30\text{--}35^\circ\text{S}$ y longitudes $52\text{--}58^\circ\text{W}$ y la zona centrada alrededor de 45°S , 65°W ,

se encuentra el particular fenómeno de la Sudestada. Éste cobra gran importancia ya que se traduce en fuertes vientos desde el sudeste y aumento de niveles ocasionando inundaciones en zonas bajas contiguas al Río de la Plata (Possia et al., 2003).

Por su parte, Ciappesoni y Salio (1997) clasifican este evento como severo si vientos desde el sudeste persisten por al menos 30 horas con una intensidad media mayor a 10m/s y ráfagas por encima de 15m/s.

En este contexto, el viento es una variable más que podría afectar los niveles y las velocidades del río Uruguay. Por ello, se plantean situaciones hipotéticas con velocidades de viento constantes en el tiempo y espacio, en los escenarios que podrían ser más afectados, especialmente el de caudales medios y más aún el de caudales bajos.

Como valor de velocidad de viento y dirección de referencia, se consultó el Anexo C de Ecometrix (2006), así como información disponible en la página web del Programa de Energía Eólica del Uruguay (PEEU de la DNETN, MIEM), en donde fueron publicados rosas de viento con frecuencia de ocurrencia y velocidades en la estación Egaña (ubicada en el Departamento de Soriano, aproximadamente 5km al oeste del pueblo Egaña). Los valores presentados corresponden a promedios de mediciones en un año, período comprendido entre 01/04/2011 y 31/03/2012 (PEEU, s.f.). Las mediciones se efectúan en cortos lapsos de tiempo y a 10 metros de altura (DNETN, s.f.).

Se adopta el módulo de velocidad de viento en 7m/s como valor medio y se establece para su análisis la dirección de velocidad SE (135 grados desde el Norte), ya que dicha dirección tiene aproximadamente un 10 % de frecuencia. Superior a éste, como valor extremo se consideró un valor de 20m/s, según la descripción y clasificación descripta en bibliografía.

Si bien la duración de estos fenómenos suele ser de pocas horas, se asume un valor constante de velocidad en cuanto a espacio y tiempo, por lo que los escenarios seleccionados serán sometidos a esta configuración ficticia, en toda su extensión temporal. Esto se efectúa a modo de determinar valores indicativos (no precisos) de variaciones de las magnitudes velocidad y nivel por acción del viento, entendiéndose que dichas variaciones podrían ocurrir en cortos lapsos de tiempo.

En cuanto al coeficiente de rugosidad (C_d) a ser imputado en el modelo, al igual que en el estudio elaborado por el IMFIA (2008) para el Río de la Plata, se adopta la formulación de Large y Pond (1981), según las Ecuaciones 5.3 y 5.4.

$$C_d = 1,43e^{-3} \text{ si } |\vec{W}| < 10m/s \quad (5.3)$$

$$C_d = 4,4e^{-4} + 6,3e-5|\vec{W}| \text{ si } 10 < |\vec{W}| < 26m/s \quad (5.4)$$

, siendo $|\vec{W}|$ es el valor absoluto de la velocidad del viento. Por lo tanto C_d adopta un valor de 0.0014 y 0.0017 para velocidades medias y altas respectivamente.

El modelo determina la tensión rasante del viento sobre la superficie del agua utilizando la ley de tensión cuadrática, según la Ecuación 5.5.

$$\vec{\tau}_W = C_d \rho_a \vec{W} |\vec{W}| \quad (5.5)$$

, donde C_d es el coeficiente de drag definido antes, ρ_a es la densidad del aire y W es la velocidad del viento a 10 metros por encima de la superficie del agua.

La velocidad de forma de ingresarla en el modelo se divide en sus dos componentes asociadas a los ejes del mismo x e y . Representar una dirección de viento implica descomponerla en una componente en el eje x , y otra en la dirección y . Para el caso particular que aquí se plantea, se considera una componente negativa y positiva en los ejes x e y respectivamente, con un ángulo de proyección de 45 grados.

Los resultados obtenidos para ambas variantes de configuraciones en cuanto a la velocidad del viento muestran variaciones apreciables respecto a la situación original sin el efecto del mismo, siendo más significativas cuando se imponen condiciones extremas de viento en todo el dominio. En dicho caso, en condiciones de caudales bajos es cuando se observa mayor afectación, en la que el viento crea una distorsión en el campo de velocidades del sistema, particularmente en el tramo inferior del río, desde Fray Bentos hasta Nueva Palmira. Se incrementa una diferenciación del comportamiento de las zonas profundas del tramo (canales) y las zonas someras. En las primeras incrementa la magnitud del flujo en dirección positiva (sin inversión) mientras que en las segundas, la acción superficial del viento incrementa las velocidades de inversión (principalmente del lado argentino debido a mayores extensiones). Esto último lleva a que en estas zonas el fenómeno de inversión ocurra aún para aquellas situaciones sin viento en las que ello no sucedía, y también, refuerza los desempeños de las inversiones al incrementar la velocidad del flujo. Dichos incrementos de velocidades sectoriales dan lugar a un notorio incremento de remolinos principalmente en este tramo del río.

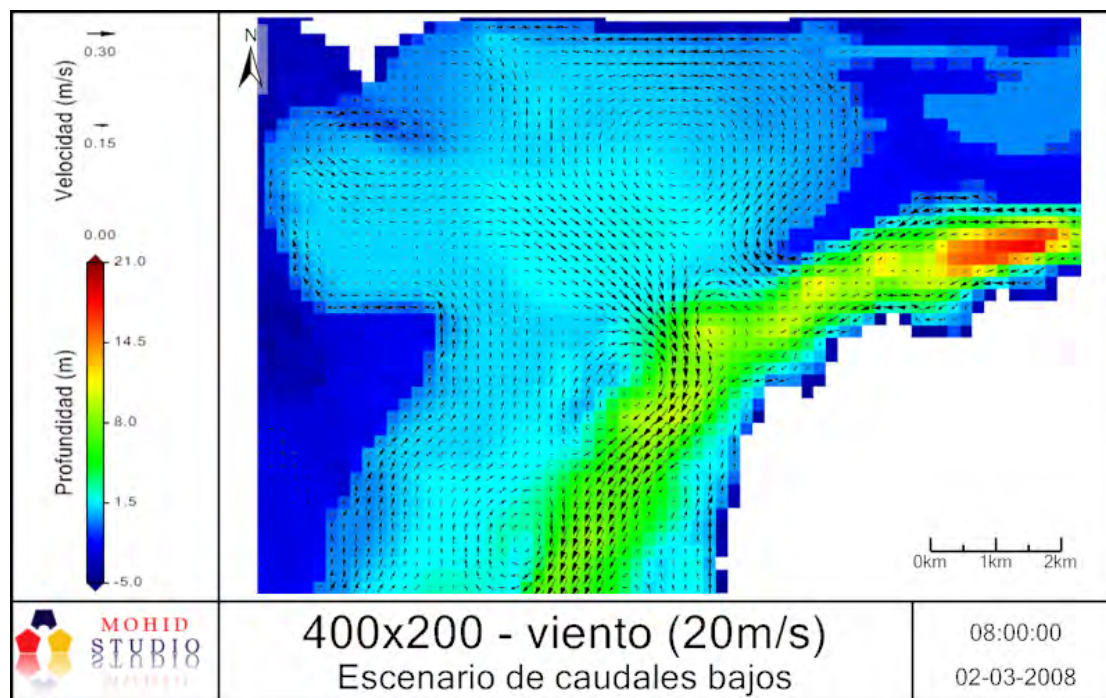
Este patrón de flujo con inversión sobre las márgenes llega hasta la zona del Martillo, en donde el flujo de las zonas someras con dirección Sur-Norte se encamina hacia el canal del río para transitar hacia el sur. Este “cierre” o bucle que se genera, modifica el comportamiento del río hacia aguas arriba actuando como una pared ocasionando una

situación opuesta a la anterior. Es decir, esto ocasiona que en la zona del canal se altere la dirección del flujo, con velocidades de inversión de magnitud significativamente menor que las existentes en las zonas someras a ambos márgenes del río, en donde la velocidad del flujo es positiva. Esto se debe a que parte del caudal que proviene de aguas arriba, una vez que llega al *Martillo*, ingresa a la bahía y luego gran parte continúa hacia aguas abajo por el canal del río hacia Nueva Palmira, en tanto una pequeña fracción retorna hacia aguas arriba por el canal. Esta inversión se extiende hasta unos 12 kilómetros hacia aguas arriba desde la planta UPM (Isla Zapatero, isla aguas arriba de las islas Abrigo, Caballos y Caballeros). En la Figura 5.19 es posible visualizar este comportamiento descripto.

En cambio, para situaciones de caudales bajos y con la imposición de condición de borde superficial de vientos de magnitud 7m/s, si bien se efectúa una alteración en la magnitud de las velocidades locales, la misma no es tal que ocasione alteraciones en el comportamiento de la hidrodinámica del río (Figura 5.20).

Una visualización comparativa de ambas configuraciones de condición de borde de vientos se presenta en la Figura 5.21, en donde se encuentran solapadas las Figuras 5.19 y 5.20.

FIGURA 5.19: Efecto de condiciones extremas de viento en el campo de velocidades (zona Martillo)



A modo de materializar lo predicho, las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24 presentan una descripción cuantitativa del efecto del viento y las diferencias de velocidad y nivel entre las

FIGURA 5.20: Efecto de condiciones medias de viento en el campo de velocidades (zona Martillo)

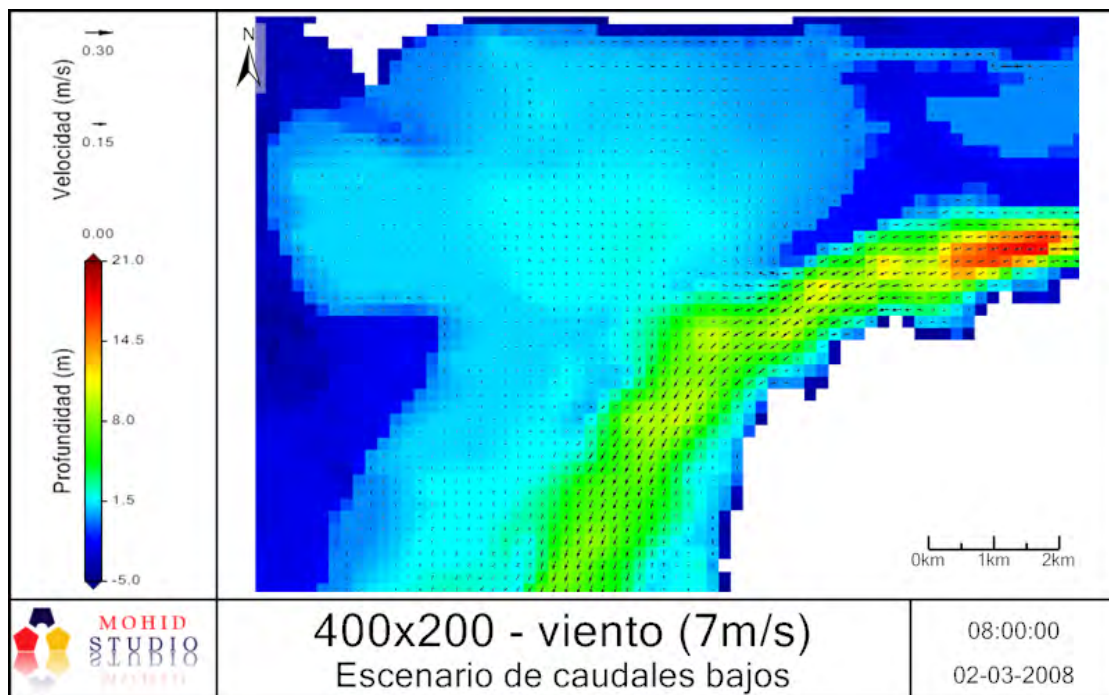
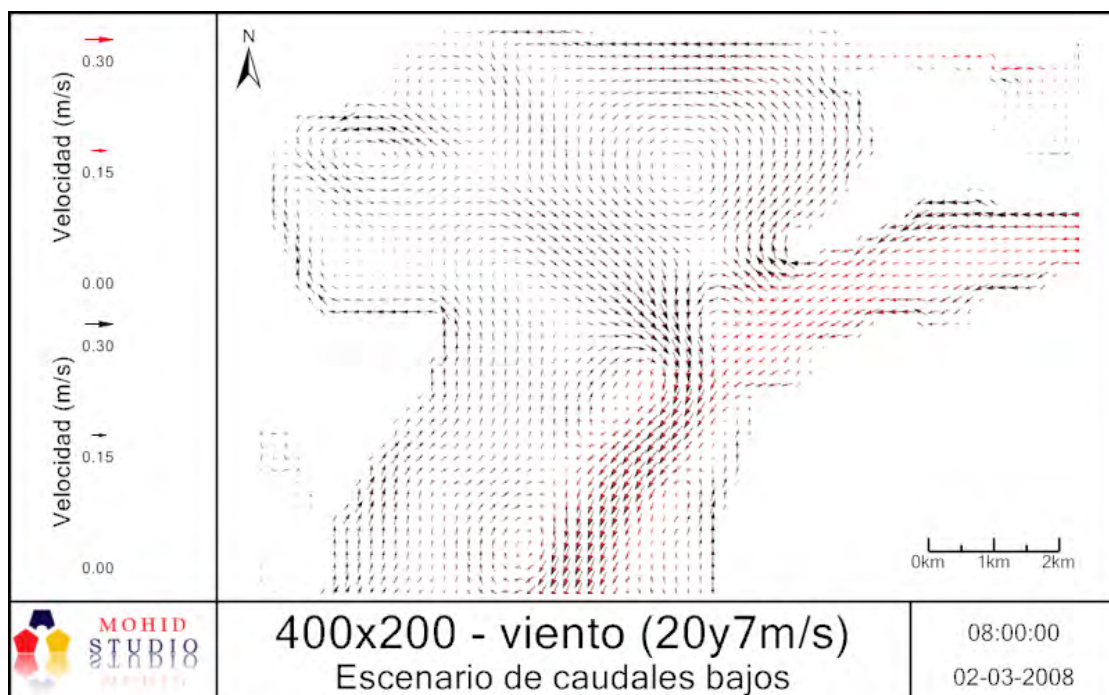


FIGURA 5.21: Comparación del campo de velocidades como resultado de acción del viento de diferente magnitud (zona Martillo)

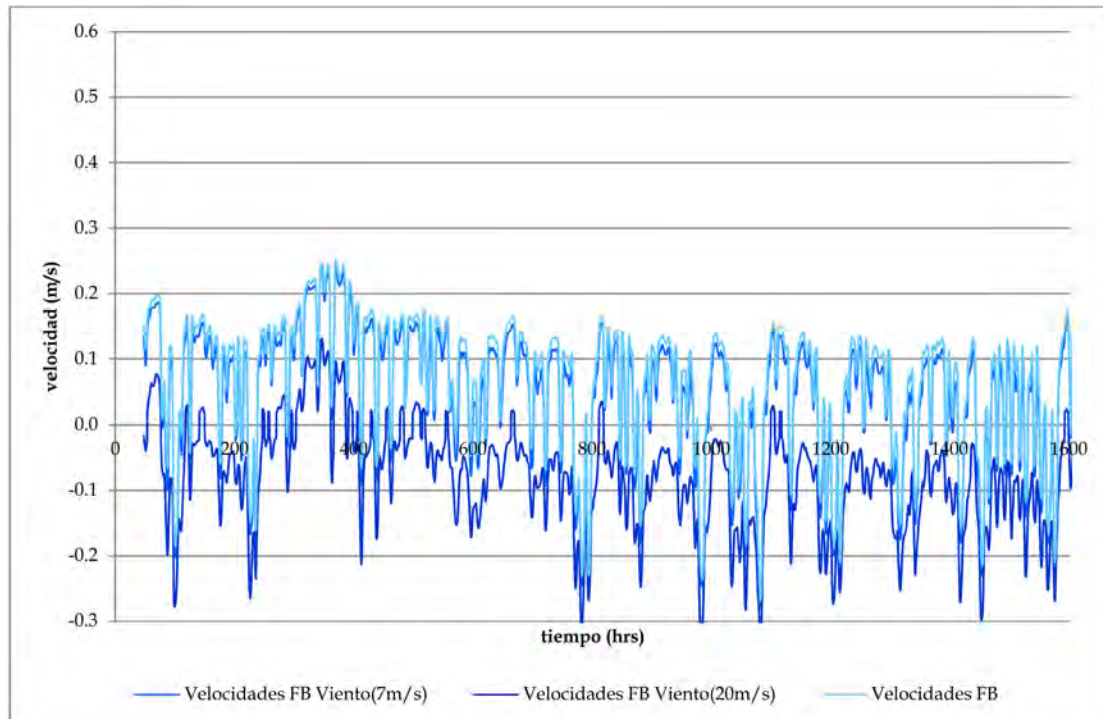


configuraciones consideradas con y sin viento para el caso de la sección de Fray Bentos. Se exhibe la modificación del comportamiento ocasionado por acción del viento, tanto en el canal como en la orilla.

En líneas generales el viento en condiciones medias para situaciones de caudales bajos afecta las velocidades del flujo en mayor medida en las márgenes (diferencia promedio de 0.05m/s) que en el canal (diferencia promedio de casi 0.02m/s), tanto durante tránsito normal como durante inversiones del mismo (Figuras 5.22 y 5.23). Contrario a las velocidades los niveles aumentan de igual forma en la sección, en un promedio de 9cms (Figura 5.24).

El cambio inducido por un viento extremo de 20m/s implica variaciones significativas tanto en el campo de velocidades como en los niveles del río. En Fray Bentos, las alteraciones en las velocidades se sitúan en promedio en 0.15m/s para el canal (disminución en sentido normal del flujo y aumento durante inversión) (Figura 5.22) y 0.23m/s para las márgenes (aumento en magnitud de las velocidades positivas y eliminación de eventos de inversión) (Figura 5.23). Los niveles aumentan en promedio 1 metro respecto a la situación original sin viento según se visualiza en la Figura 5.24.

FIGURA 5.22: Acción del viento en las velocidades del canal en Fray Bentos, escenario de caudales bajos



Análogamente al escenario de caudales bajos recién expuesto, el efecto del viento ante caudales medios también permite desencadenar similares magnitudes de afectación,

FIGURA 5.23: Acción del viento en las velocidades en orillas en Fray Bentos, escenario de caudales bajos

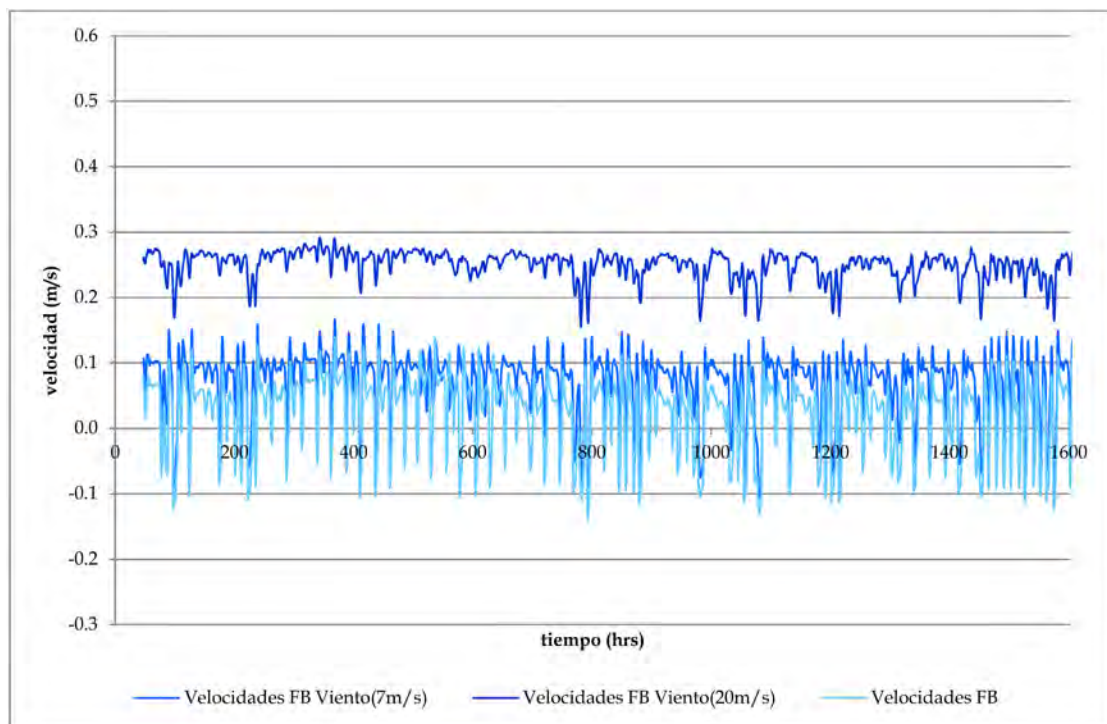
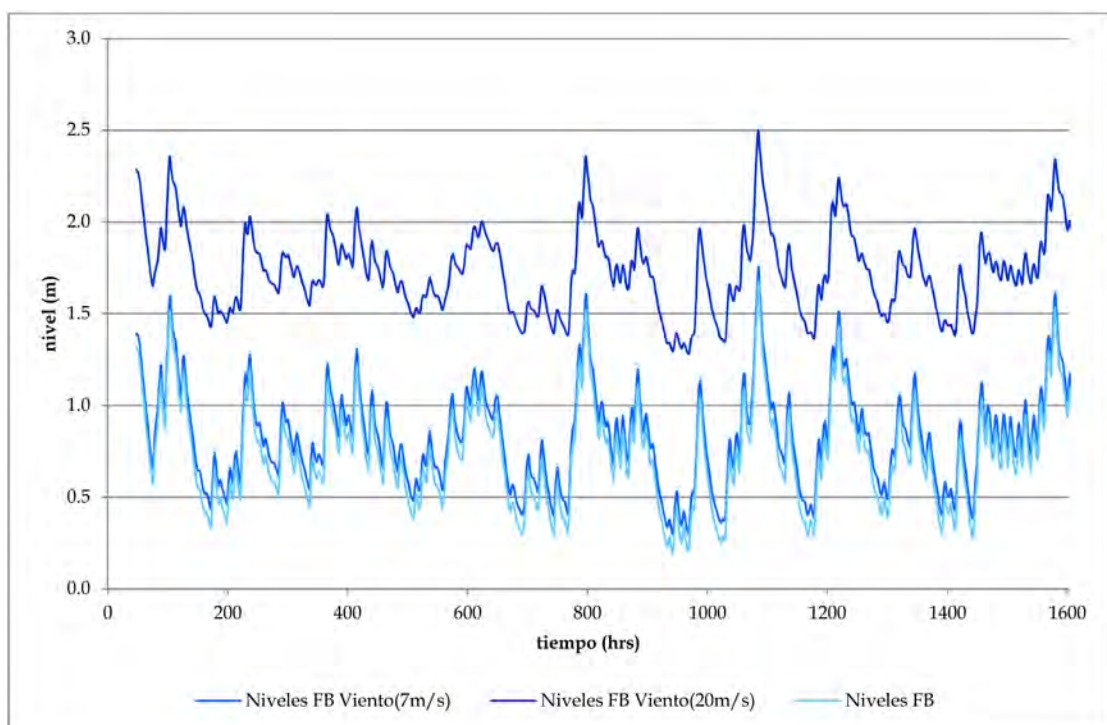


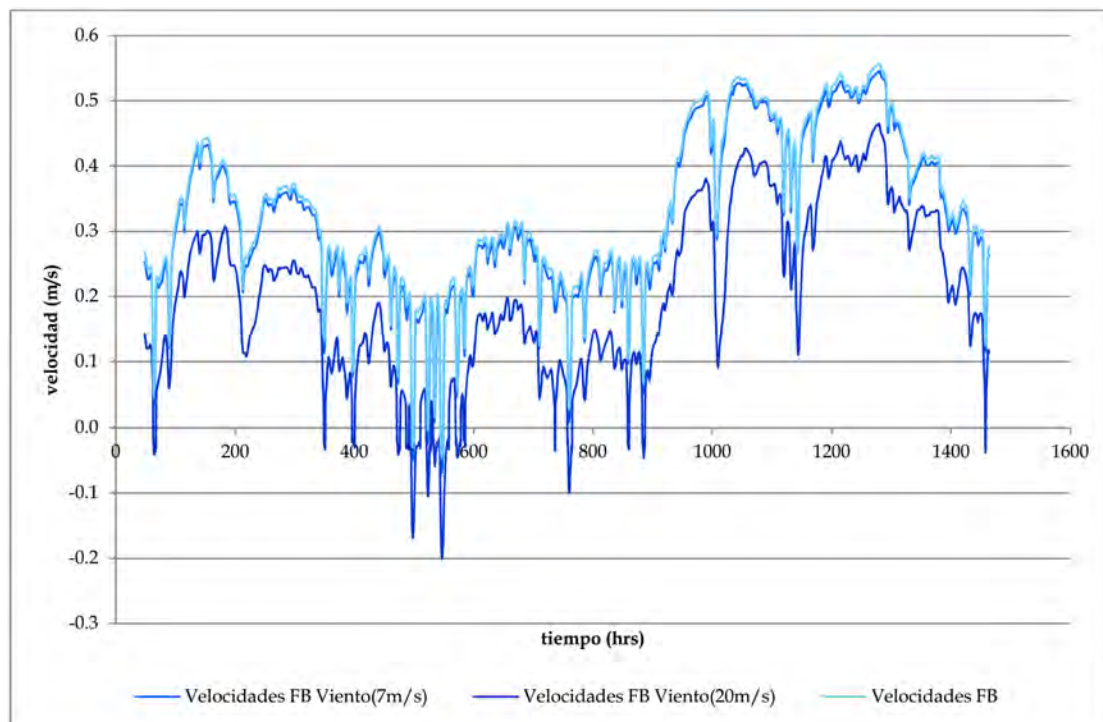
FIGURA 5.24: Acción del viento en los niveles en sección Fray Bentos, escenario de caudales bajos



aunque ligeramente de menor valor. Al imponer condiciones de borde de viento en condiciones medias se elevan las velocidades del flujo en mayor medida en las márgenes (diferencia promedio de 0.02m/s) que en el canal (diferencia promedio de casi 0.01m/s), tanto durante tránsito normal como durante inversiones del mismo. Esto se presenta en las Figuras 5.25 y 5.26. Los niveles aumentan en un promedio de 8cms (Figura 5.27).

El cambio inducido por un viento extremo de 20m/s implica variaciones significativas tanto en el campo de velocidades como en los niveles del río. En Fray Bentos, las alteraciones en las velocidades se sitúan en promedio en 0.13m/s para el canal (disminución en sentido normal del flujo y aumento durante inversión) y 0.16m/s para las márgenes (aumento en magnitud), exhibidas en las Figuras 5.25 y 5.26. Los niveles aumentan en promedio 0.96 metros respecto a la situación original sin viento (Figura 5.27).

FIGURA 5.25: Acción del viento en las velocidades del canal de Fray Bentos, escenario de caudales medios



Como conclusión, en situaciones donde las condiciones hidrodinámicas son moderadas a bajas (bajos y medios caudales con influencia del nivel por la condición de frontera inferior) el viento ocasiona una distorsión en el campo de velocidades del sistema, siendo notable cuando se considera un campo de viento extremo de 20m/s, uniforme en el dominio y constante en el tiempo. En esta situación la hidrodinámica del río en su conjunto sufre alteraciones, especialmente desde isla Zapatero (aprox. progresiva 114km) hasta el extremo inferior.

FIGURA 5.26: Acción del viento en las velocidades en orillas de Fray Bentos, escenario de caudales medios

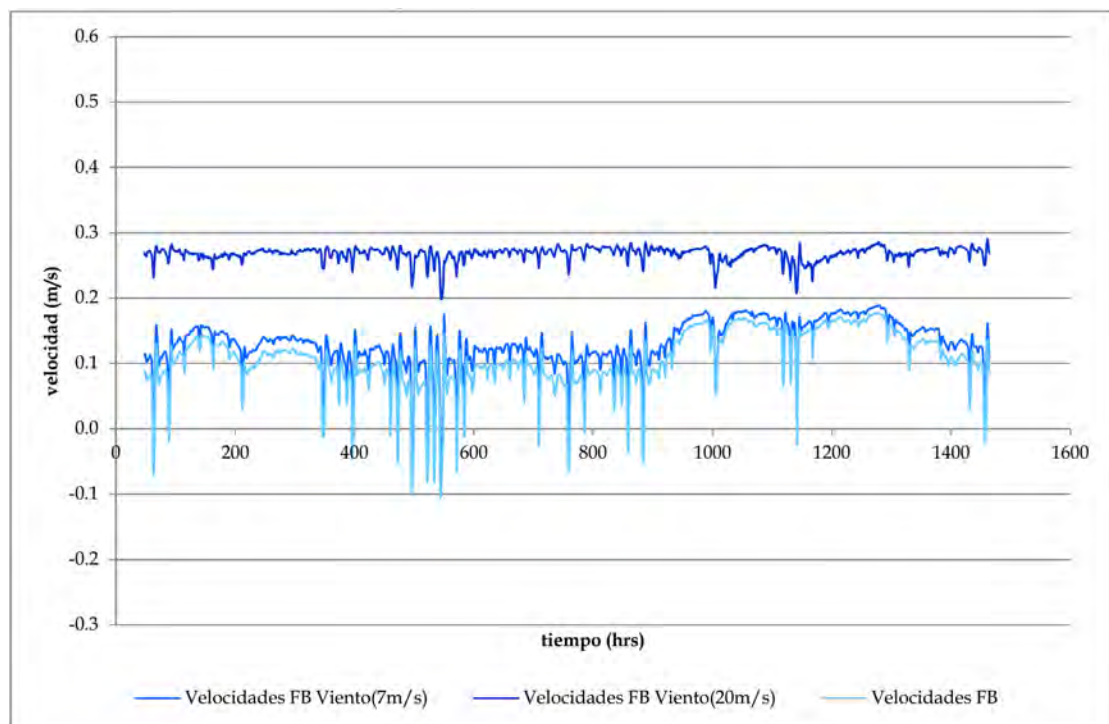
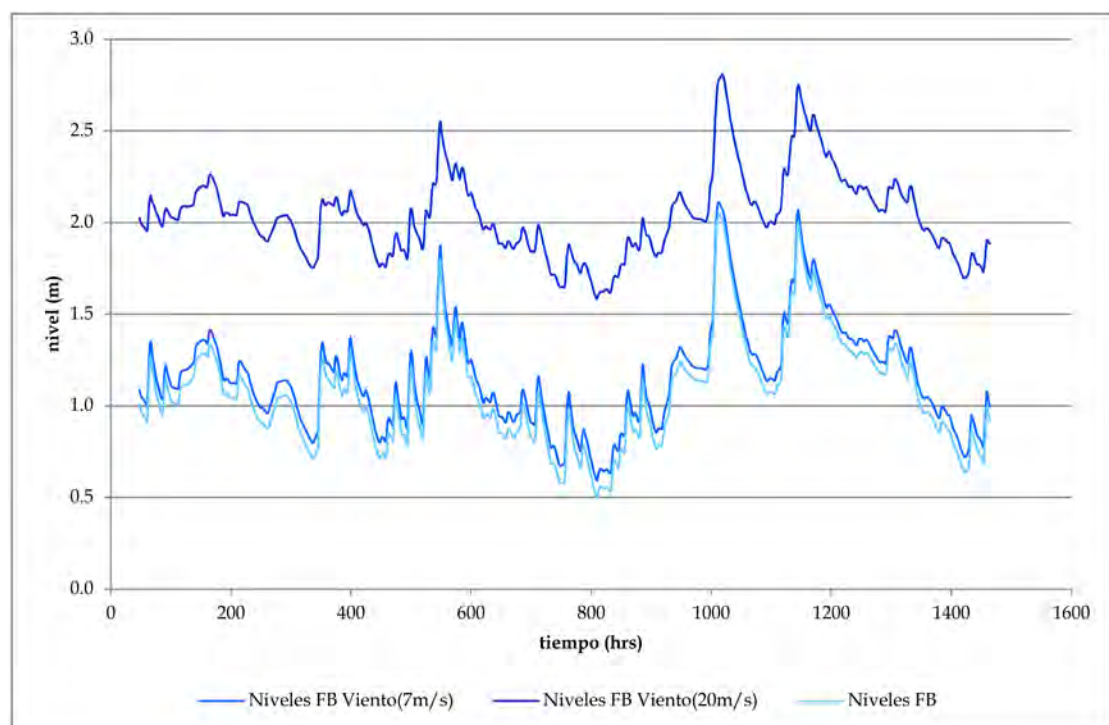


FIGURA 5.27: Acción del viento en los niveles en sección Fray Bentos, escenario de caudales medios



A pesar que las condiciones de borde de viento consideradas en esta sección advierten la afectación eventual que podría tener el viento en la hidrodinámica del río Uruguay ante condiciones desfavorables de caudales bajos y medios, dichas condiciones son hipotéticas. Por lo tanto, no se considera el efecto del viento en las simulaciones finales realizadas en este trabajo. No obstante, sí se justificaría la inclusión del viento en estudios futuros similares.

5.5.4. Batimetría

También se analizó la influencia de la incertidumbre de la batimetría del cauce. Como fue comentado en capítulos anteriores, la batimetría fue conformada a partir de varias fuentes de información de diferentes características y también se adoptaron algunas suposiciones, lo que posiciona a la batimetría como una posible fuente de error en los resultados del modelo. Asimismo, las variantes consideradas tienen un objetivo paralelo al anterior que consiste en identificar la vinculación de la batimetría con el corrimiento temporal del modelo respecto a los registros reales detectado en el escenario de caudales altos (descripto en la sección “Situación de caudales altos”).

Recordando la diversidad de fuentes de información para el cauce, y los inconvenientes detectados al utilizar la información de SRTM en las planicies del río (Capítulo 4 Batimetría), se complejiza el análisis ante variaciones en la configuración de la batimetría. Debido a dicha complejidad, se ordena el análisis en tres líneas principales: la primera asociada a incrementar la profundidad de la batimetría, la segunda asociada a la afectación solamente de las planicies y la tercera vinculada a incremento de la resolución de la malla. Dentro de la primera línea se consideran tres variantes: profundización del cauce solamente en un tramo, profundización del cauce en toda su extensión y profundización de la totalidad del dominio. La profundización se ejecuta de forma de incrementar la profundidad de las celdas a afectar en 50 (configuración denominada “+50cms”) y 100cms (configuración denominada “+100cms”). En el caso de la primera variante, la profundización parcial del cauce, se afecta el tramo ubicado hacia aguas arriba de la isla Santa María Grande (progresiva aproximada 117km). Dentro de la segunda línea, vinculada a las planicies, se incluye la profundización de las planicies de inundación en todo el dominio y la extensión de las planicies solamente en un tramo del mismo (tramo superior del río desde la Represa hasta aproximadamente la ciudad de Paysandú). Para el primer caso se disminuye la pendiente de las planicies al reducir la profundidad de algunas celdas a la mitad. Por último, la tercera línea de análisis se corresponde con el incremento de la resolución de la malla de cálculo (disminución del tamaño de la celda computable).

5.5.4.1. Profundización del cauce

Respecto a la primera línea de análisis, además de la configuración original descripta anteriormente se consideraron dos configuraciones adicionales con profundización del cauce del río: la primera, denominada “+50cms” en la que se profundiza 50cms respecto a la original, y la segunda denominada “+100cms” que cuenta con un aumento de profundidad para el cauce de 1 metro.

Esta profundización se efectúa en dos modalidades en cuanto a la extensión longitudinal: una de forma parcial y otra total. La primera de ellas se refiere a la profundización de solamente el tramo del río comprendido entre la isla Santa María Grande (aproximadamente progresiva del río 117km) y el extremo superior del dominio, debido a que para este tramo no se cuenta con información batimétrica precisa sino estimada. La segunda de ellas contempla la profundización en todas las celdas de la batimetría del cauce.

A continuación se presenta en más detalle los resultados para la segunda modalidad analizada, ya que la primera modalidad (modificación parcial del cauce) no refleja diferencias de nivel apreciables en relación a la configuración original para la zona aledaña a la planta UPM. Esto sucede tanto para la opción “+50cms” como para la “+100cms”.

Una disminución de las diferencias de nivel en Fray Bentos respecto a los datos registrados, es lo que sucede para el escenario de **caudales altos**. Las curvas obtenidas para las variantes consideradas claramente muestran un traslado hacia menores elevaciones, manteniendo la correlación con los datos registrados. Visualmente la distancia entre las curvas se corresponde con valores del orden de 25cms para la configuración +50cms, y del orden del doble para el caso de +100cms, ambas respecto a la configuración original. Ambos valores de diferencias decrecen a partir del momento en que existe un decrecimiento abrupto de los niveles ocasionados por una disminución del caudal de aporte (desde la hora 1000 hasta el final), ya mencionado en el subcapítulo “Situación de caudales altos”. Esto se puede apreciar en la Figura 5.28.

Por lo anterior puede afirmarse que en situaciones de caudales elevados, ante un aumento de profundidad en 50cms a lo largo de todo el cauce, se produce una disminución en promedio de aproximadamente la mitad de este valor en los niveles registrados en Fray Bentos.

Algunos parámetros indicativos de las diferencias de las tres configuraciones se presentan en la Tabla 5.8, destacándose la configuración +100cms como la que mejor se aproxima a la curva real de niveles en Fray Bentos. Las diferencias de nivel de la configuración original, +50cms y +100cms se presentan en metros.

FIGURA 5.28: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales altos para variantes batimétricas del cauce

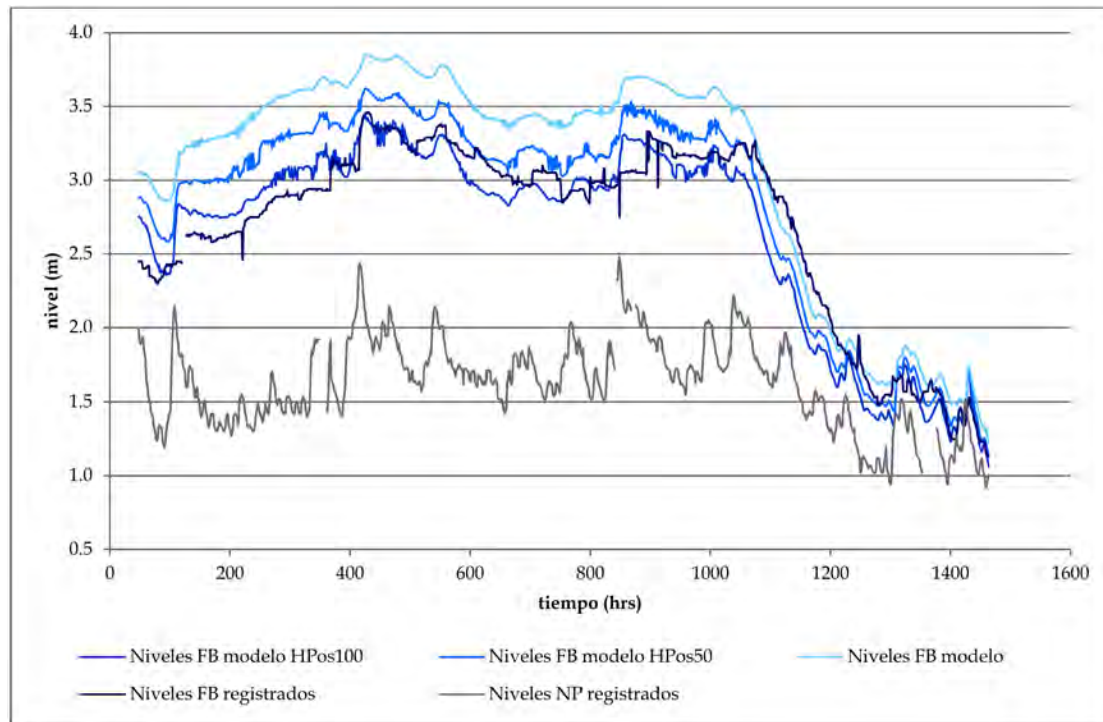


TABLA 5.8: Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes configuraciones batimétricas y la configuración original en Fray Bentos, caudales altos

	Configuración Original	Configuración +50cms	Configuración +100cms
Coefficiente de correlación	0.957	0.957	0.957
Diferencia Promedio (m)	0.400	0.220	0.148
Diferencia Máxima (m)	0.910	0.611	0.595

Otro punto a recalcar es que las tres curvas se encuentran sincronizadas temporalmente, existiendo entre ellas únicamente desplazamiento respecto a los valores de nivel pero no en su variación temporal, y por lo tanto, manteniendo constante la correlación respecto a los datos reales. Esto conlleva a que el desfasaje temporal identificado previamente en la configuración original para algunos momentos de crecida y disminución de nivel por lo tanto no experimente mejorías. Esto significa que la profundización del cauce, si bien aumenta la capacidad de almacenamiento del mismo, no provoca un retardo visible en el flujo que ajuste la curva de forma análoga a la de los registros de niveles en Fray Bentos.

En cuanto a las diferencias en las series de velocidades obtenidas en Fray Bentos, no se aprecian diferencias significativas, particularmente durante caudales altos (Tabla 5.9 y

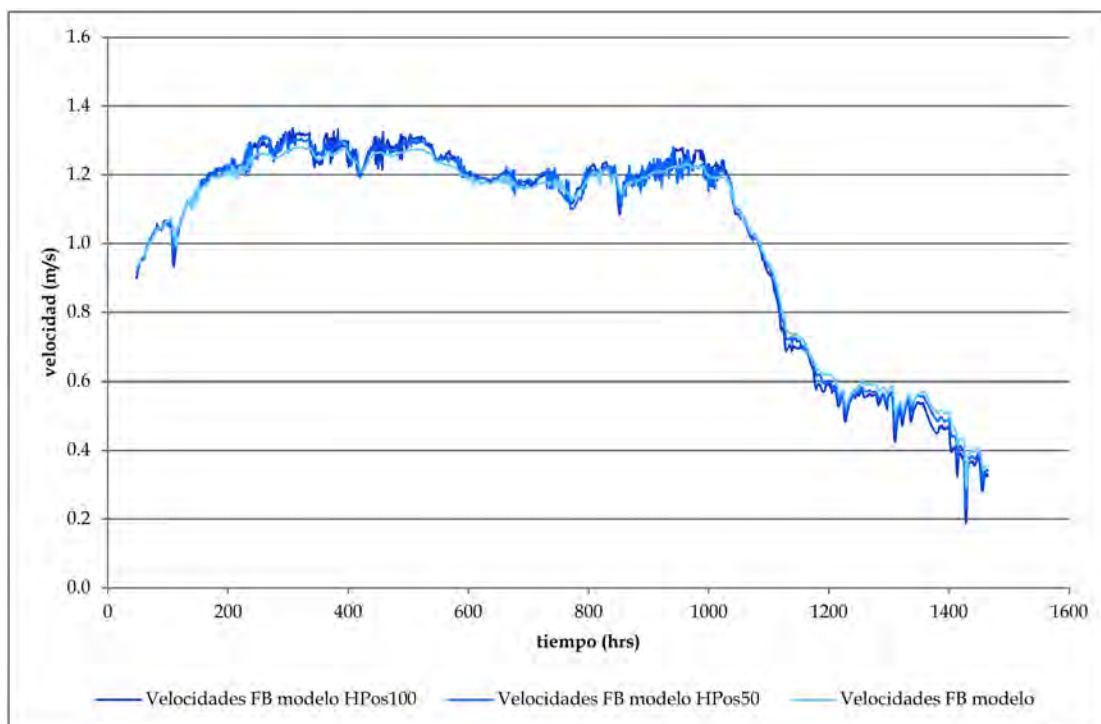
Figura 5.29). Sin embargo, existe una diferenciación en el comportamiento de la interacción de las curvas una con otras. En el tramo de la serie previo a la gran disminución de caudales, y por tanto de velocidades, las curvas muestran un leve incremento de velocidad a medida que se profundiza el canal. Esto se debe a que el canal dispone de mayor volumen de escurrimiento, por lo que para un mismo caudal la expansión en las planicies es menor y por ende las fuerzas de fricción de fondo son menores.

Opuestamente al tramo recién descrito de la serie, es lo que sucede en el tramo final de la serie. Se reducen las velocidades cuanto mayor volumen posee el cauce. Considerando igual caudal y condiciones de borde, al profundizar el cauce del río se incrementa la influencia de este último, actuando como un leve freno del flujo en el río.

TABLA 5.9: Diferencia entre resultados de modelo de velocidades para diferentes configuraciones batimétricas y la configuración original en Fray Bentos, escenario de caudales altos

	Configuración +50cms (m/s)	Configuración +100cms (m/s)	Relación
Diferencia Promedio	0.017	0.024	1.4
Diferencia Máxima	0.073	0.143	2.0

FIGURA 5.29: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales altos para variantes batimétricas del cauce



Seguidamente se presenta los resultados obtenidos para los dos escenarios restantes de caudales medios y bajos, con la profundización del cauce del río en toda su longitud.

Para el escenario de **caudales medios**, en el que la influencia del Río de lo Plata es sensiblemente mayor que el asociado a caudales altos, a medida que se profundiza la batimetría no hay un crecimiento lineal de correlación entre la serie real de niveles en la sección transversal de Fray Bentos y los niveles obtenidos con el modelo para las variantes consideradas en la presente sección (Tabla 5.10). En cambio, se observa que la configuración de +50cms refleja la mejor correlación con los datos reales, si bien hay una variación pequeña en esta variable.

TABLA 5.10: Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes variantes batimétricas del cauce y registros reales en Fray Bentos, caudales medios

	Configuración Original	Configuración +50cms	Configuración +100cms
Coeficiente de correlación	0.957	0.974	0.969
Diferencia Promedio (m)	0.071	0.048	0.104
Diferencia Máxima (m)	0.328	0.360	0.372

Dicha configuración mejora ligeramente la correlación con la curva real de registros de niveles en Fray Bentos, destacándose una mejor aproximación a la misma particularmente en la faja final de la serie temporal modelada (a partir de la hora 900), en la que la configuración original presenta su mayor desviación con respecto a la curva real de niveles. Asimismo, en la faja final esta configuración reproduce la disminución de los niveles (pendientes negativas) prácticamente de forma paralela a la curva real, a diferencia de la configuración original.

Por el contrario, suponiendo una profundización del cauce de 100cms, en algunos tramos de la serie de niveles obtenida por el modelo se incrementa la brecha respecto a la curva real.

En la Figura 5.30 se esquematiza las series de niveles obtenidas para las diferentes configuraciones en cuestión.

En cuanto al campo de velocidades, al profundizar 50cms la batimetría principal del cauce las velocidades disminuyen (aumenta la superficie de fricción y el área transversal de flujo). La Figura 5.31 muestra los resultados obtenidos en la sección Fray Bentos. Para las velocidades de los mínimos relativos, la reducción de la velocidad es más pronunciada que para la configuración original de la batimetría (los mínimos relativos son menores en la nueva situación considerada respecto a la situación original). Esto se debe a que cuando llegan los picos de marea a la sección de interés la profundización brinda mayor volumen y mayor área hidráulica (aunque este último en menor medida), por lo que la velocidad disminuye.

La diferencia entre las velocidades de los mínimos relativos suele ser mayor que para el caso de los máximos relativos. Para el primer caso las diferencias pueden alcanzar valores del orden de 9cm/s, y para el segundo, por el contrario, suele estar en el entorno de 1cm/s cuando el caudal de aporte no es despreciable frente al forzante de aguas abajo (cuanto menor es el aporte de la Represa, menor la diferencia entre ambas velocidades).

Analizando la diferencia de velocidades para ambas configuraciones modificadas frente a la configuración original, se detecta que al profundizar 100cms la batimetría del cauce la diferencia de velocidades, en términos promediales y máximos, prácticamente se incrementa entre un 60 y 90 % frente a la diferencia de velocidades entre la configuración “+50 ms” y la original. Esto se presenta en la siguiente Tabla 5.11.

TABLA 5.11: Indicadores de similitud entre resultados de modelo de velocidades para diferentes variantes batimétricas del cauce en Fray Bentos, caudales medios

	Configuración +50cms (m/s)	Configuración +100cms (m/s)	Relación
Diferencia Promedio	0.014	0.023	1.6
Diferencia Máxima	0.087	0.163	1.9

Lo antes descripto refleja que una profundización de batimetría del cauce se traduce en una mayor influencia de la condición en la frontera abierta inferior, fortaleciendo la frecuencia de ocurrencia de inversión de flujo y sus velocidades asociadas. También, en situaciones donde el escurrimiento del río es normal la profundización se traduce en una disminución en la magnitud de la velocidad.

En menor medida que para caudales medios, resulta la profundización del cauce en el escenario de **caudales bajos**, en el que domina la influencia de aguas abajo en todas las configuraciones consideradas. Los coeficientes de correlación entre los niveles obtenidos por el modelo muestran una menor mejora respecto al caso anterior (Tabla 5.12). Cabe aclararse que este coeficiente fue obtenido a partir de limitar la serie excluyendo los datos a partir del día 23/3/2008, en que la curva real pierde validez (según comentado en el Capítulo 3).

TABLA 5.12: Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes variantes batimétricas del cauce y registros reales en Fray Bentos, caudales bajos

	Configuración Original	Configuración +50cms	Configuración +100cms
Coefficiente de correlación	0.957	0.973	0.960
Diferencia Promedio (m)	0.071	0.069	0.084
Diferencia Máxima (m)	0.328	0.281	0.322

FIGURA 5.30: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios para variantes batimétricas del cauce

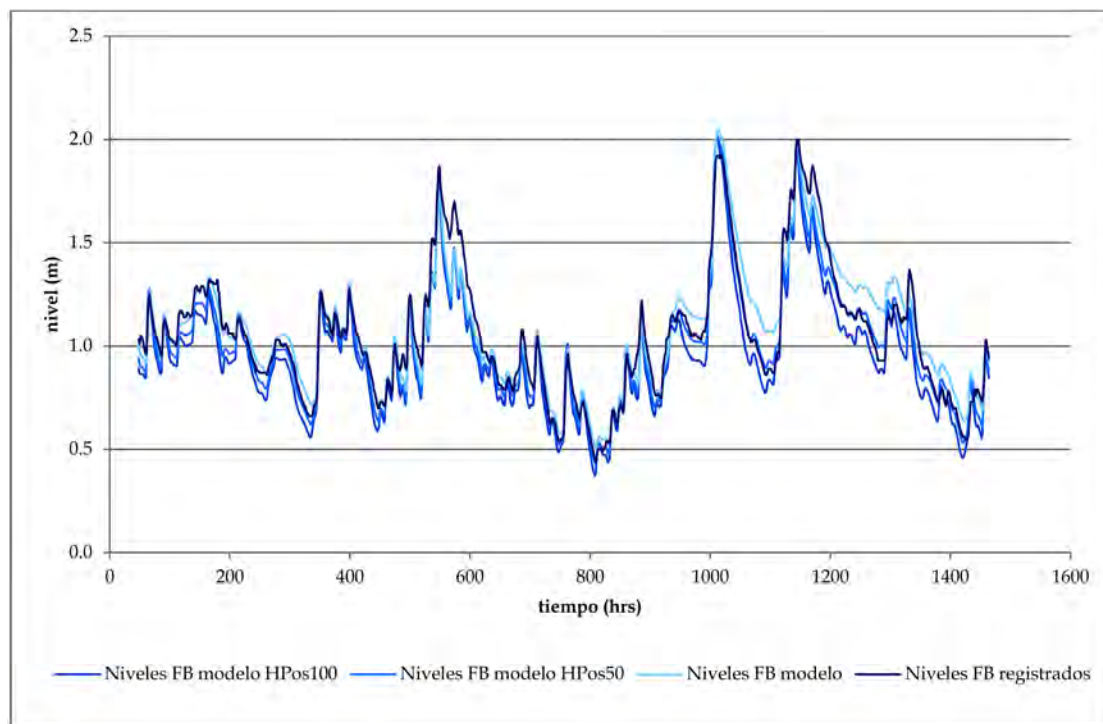
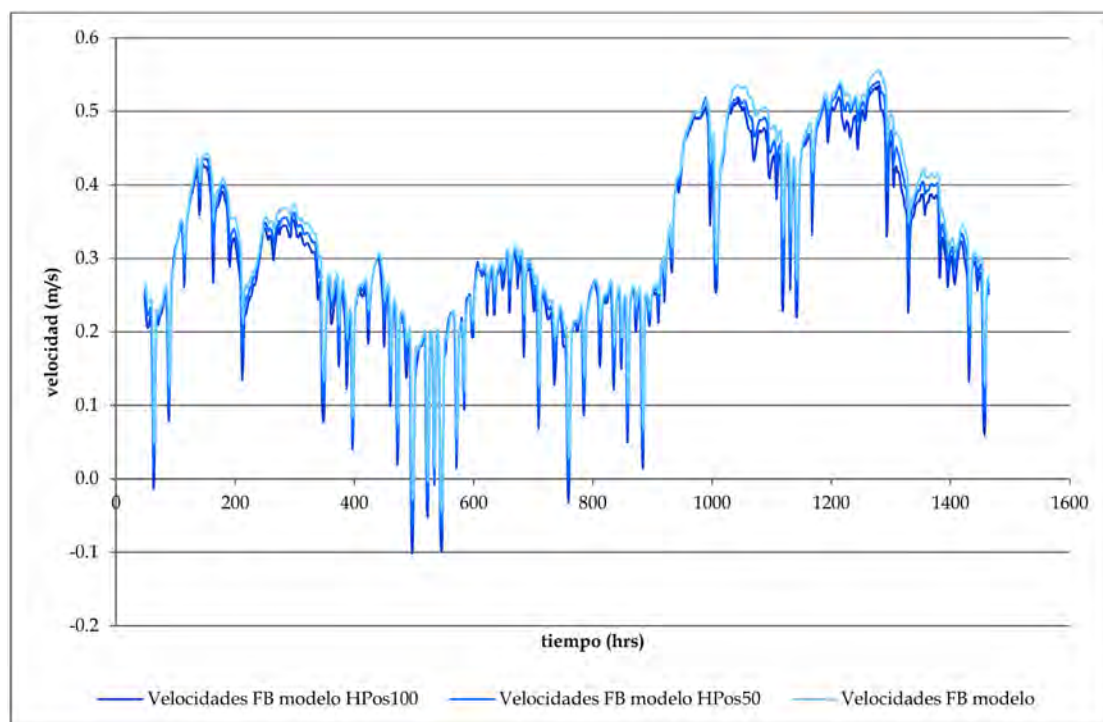


FIGURA 5.31: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales medios para variantes batimétricas del cauce



En cuanto a los niveles para las tres configuraciones para el escenario de caudales bajos, las diferencias entre las curvas de nivel son relativamente más pequeñas que los otros escenarios. En el panel superior de la Figura 5.32 se observa que las tres curvas de nivel para la sección Fray Bentos se encuentran muy próximas. No obstante, la influencia de la condición de aguas abajo es más pronunciada cuando se profundiza la batimetría 50cms respecto a la original (y más aún cuando se aumenta en 100cms la batimetría del cauce). Pues los máximos, y aún más los mínimos, son menos atenuados en el transcurso de la onda y alcanzan la sección de Fray Bentos más rápidamente, entre media (en máximos) y una hora (en mínimos) antes que en la configuración original. Es decir, la amplitud para una misma onda es mayor que en la situación original. En el panel inferior de la Figura 5.32 se presentan las curvas de niveles para las diferentes configuraciones en la sección de Fray Bentos para un tramo de la serie temporal.

Asimismo, al profundizar 50cms la batimetría principal del cauce las velocidades positivas varían en un entorno de 1 a 3cm/s respecto a la configuración original en la sección de Fray Bentos. La mayor diferencia coincide con situaciones que se dan los mínimos relativos (positivos), en los que la configuración original muestra mayores velocidades que la configuración +50cms. En casos de inversión de flujo, la profundización del cauce del río incrementa las velocidades en un entorno de 3cm/s. En la Figura 5.33 se representan las velocidades instantáneas en Fray Bentos para las diferentes configuraciones.

Para la situación +100cms las diferencias en las velocidades se incrementan, aproximadamente en casi el doble que el caso anterior.

TABLA 5.13: Indicadores de similitud entre resultados de modelo de velocidades para diferentes configuraciones batimétricas y la configuración original en Fray Bentos, caudales bajos

	Configuración +50cms (m/s)	Configuración +100cms (m/s)	Relación
Diferencia Promedio	0.012	0.022	1.8
Diferencia Máxima	0.080	0.140	1.8

Lo anterior se traduce en una mayor influencia de la condición en la frontera abierta inferior, alcanzando menores velocidades asociados a la ocurrencia de máximos en la sección de Fray Bentos por dicha influencia.

Como segunda conclusión, se destaca que a bajos caudales las diferencias de niveles y velocidad entre las tres configuraciones consideradas son leves. En este escenario, las variaciones de las condiciones hidrodinámicas son pequeñas y con valores de magnitud de niveles y velocidades bajos. Por lo tanto, frente a una situación con un nivel determinado, el aumento de superficie mojada asociada a la profundización de la batimetría no es tan significativa a bajos niveles, lo que genera variaciones frente a la situación original

FIGURA 5.32: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos para variantes batimétricas del cauce

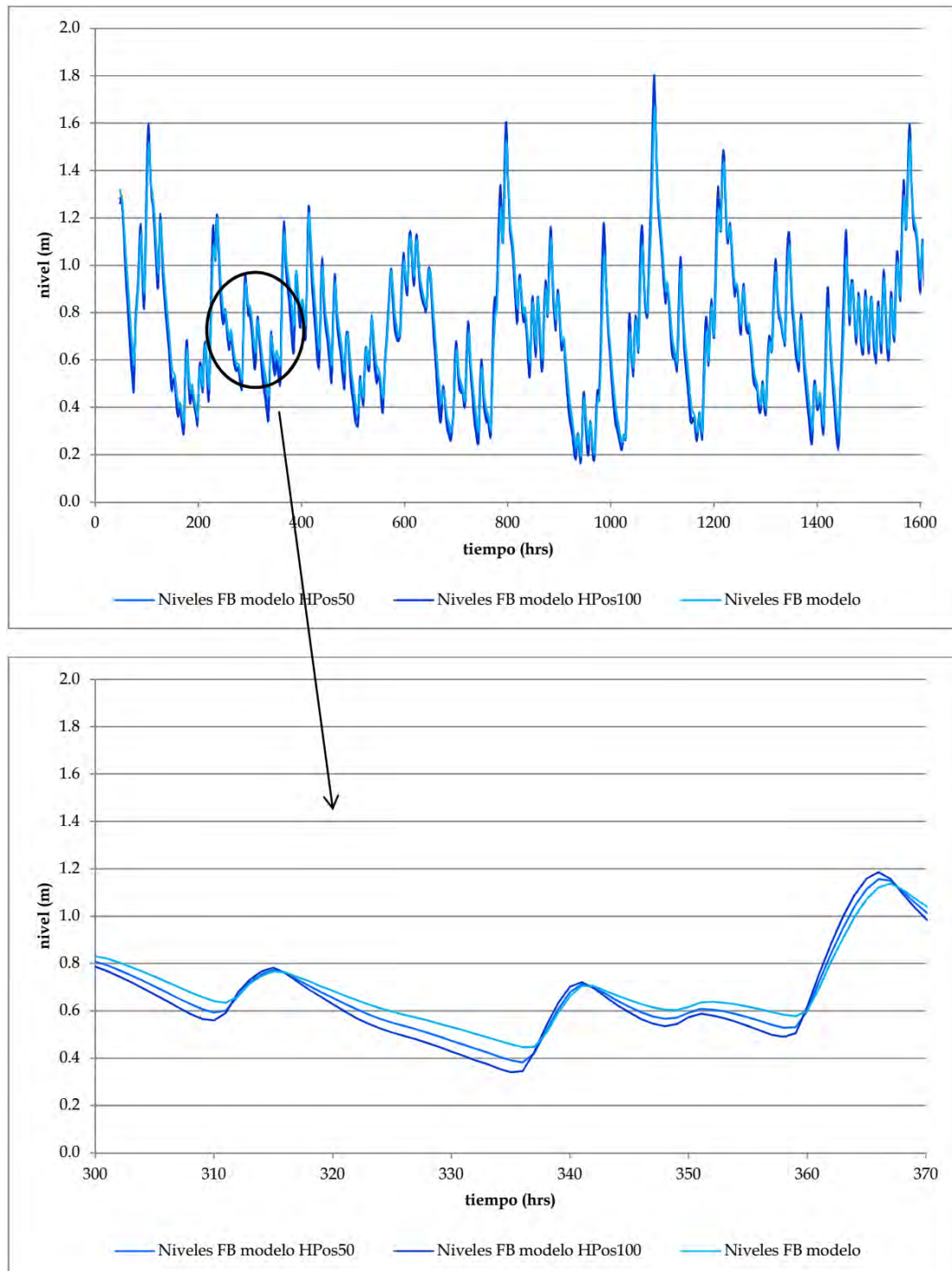
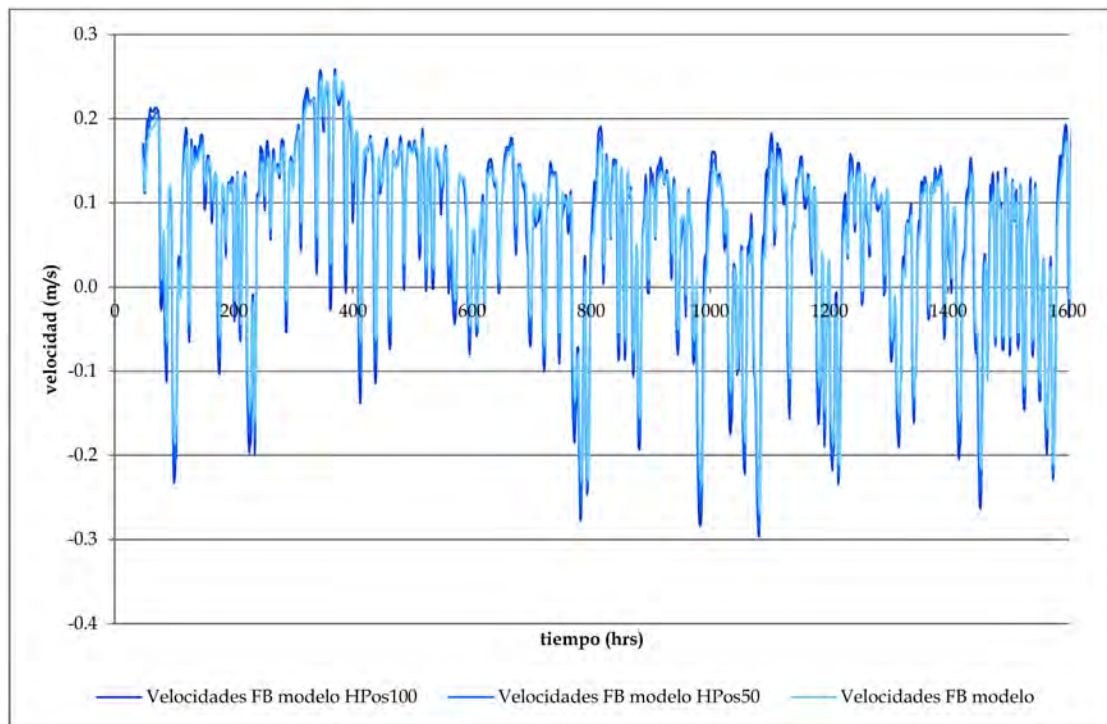


FIGURA 5.33: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos para variantes batimétricas del cauce



de levemente menor escala que el escenario de caudales medios, en el que la sección transversal es de mayor relevancia y variaciones de nivel implican una mayor variación del radio hidráulico.

5.5.4.2. Profundización de todo el dominio

Como segunda línea de análisis, se considera la profundización uniforme de la totalidad de las celdas que comprenden el dominio, a diferencia del caso anterior que comprendía solamente el cauce principal del río. Esto comprende la modificación total de la batimetría con su profundización en 50cms y 100cms (denominadas de igual forma que en la sección anterior). Comparando los resultados de las configuraciones homólogas, las diferencias en los resultados se concentran en la extensión de la inundación del delta aluvial y de la zona aledaña a la descarga del río Negro.

A modo cuantitativo, para caudales altos los niveles disminuyen en 4cms aproximadamente en la sección de Fray Bentos (un 16 % más que únicamente la profundización del cauce), incrementándose la diferencia en Paysandú a unos 10cms. Esta diferencia se debe a que en la situación en que se profundiza la totalidad de las celdas se ocupa una mayor extensión en el delta. En cuanto a las velocidades, las diferencias pueden alcanzar hasta un orden de disminución del 4 % en el escenario de caudales altos.

En cambio, los escenarios de caudales medios y bajos no indican diferencias de niveles en las inmediaciones de la planta UPM, respecto a solamente profundizar el cauce del río.

Por lo tanto, la magnitud de las diferencias entre la profundización parcial y total de la batimetría es pequeña para caudales altos, y despreciables para los restantes.

5.5.4.3. Profundización de la planicie

Esta tercera línea de análisis es diferente a la metodología utilizada en los dos puntos anteriores. Este caso consiste en una profundización de las planicies de inundación (y aumento de volumen de almacenaje) de forma proporcional a la cota de la celda para aquellas celdas cuya cota de fondo se sitúe por encima de 1 metro sobre el cero del modelo, umbral que se adopta debido a que es del mismo orden que el nivel medio en Fray Bentos. Se entiende que en caudales medio-altos se supera este valor invadiendo las planicies, tanto en esta zona como en el delta del río. La lógica de la modificación de las cotas es según las Ecuaciones 5.6 y 5.7.

$$\text{si } z > z_o : z' = z_o + (z - z_o)\alpha \quad (5.6)$$

$$\text{si } z \leq z_o : z' = z \quad (5.7)$$

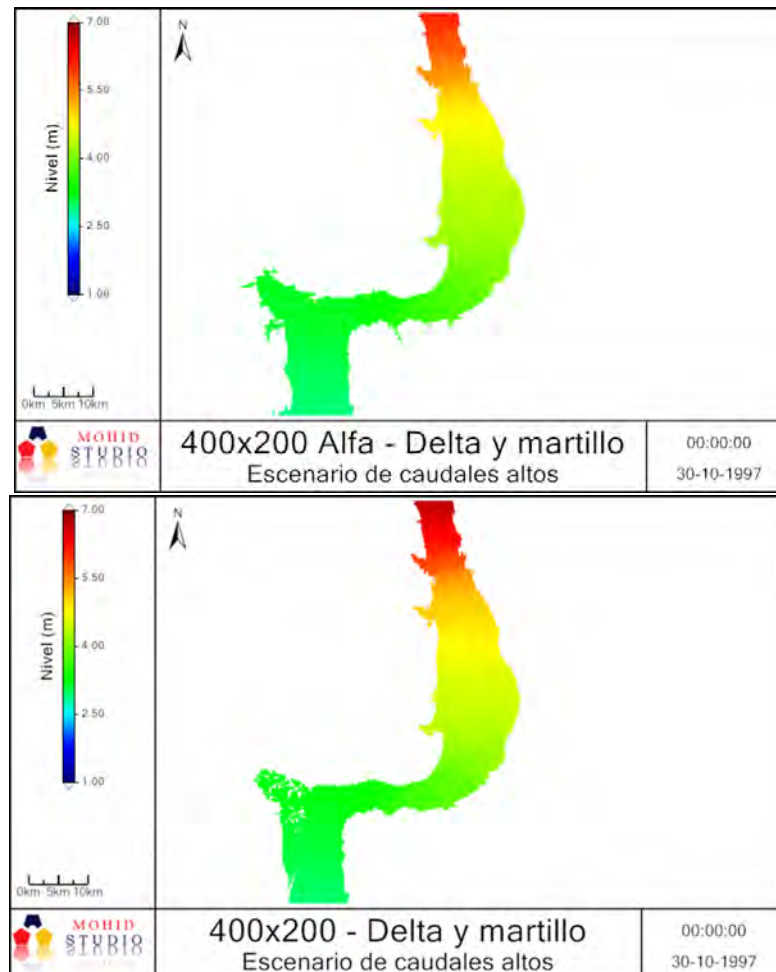
, siendo z_o la cota mínima a efectuar la reducción (+1 metros) y α un coeficiente de reducción de cota. A modo de su implementación, α se establece en un valor de 0.5.

Considerando las características batimétricas, se observa que esta metodología no implica variaciones sustantivas en la zona comprendida entre el río y la laguna contigua al *Martillo*, ya que en general sus cotas se encuentran entre 1 y 2 metros.

Los resultados obtenidos demuestran que si bien las diferencias de niveles (respecto a la situación original) son apreciables en el delta e inclusive en Paysandú, alcanzando en la sección de esta ciudad un valor de hasta 50cms, las mismas se reducen significativamente al alcanzar la sección de Fray Bentos, mostrando diferencias de como máximo 10cms. En la Figura 5.34 se esquematizan los resultados de niveles tanto para la configuración original del modelo (mosaico inferior) como para la configuración que considera la profundización parcial de la planicie por medio de α (mosaico superior). Los niveles varían entre 1 a 7m respecto al cero del modelo, variando el color de los mismos según su valor. Se observa que la parte superior de ambos mosaicos difieren en el color, tenido niveles

superiores en el mosaico inferior. En cambio, en las proximidades de Fray Bentos, el nivel presenta el mismo color en ambas figuras.

FIGURA 5.34: Comparación de niveles para configuración alfa y original, caudales altos



Así como los casos anteriormente presentados, la modificación asociada a esta configuración no reproduce retardos temporales en los niveles en la sección de Fray Bentos ni tampoco en la de Paysandú.

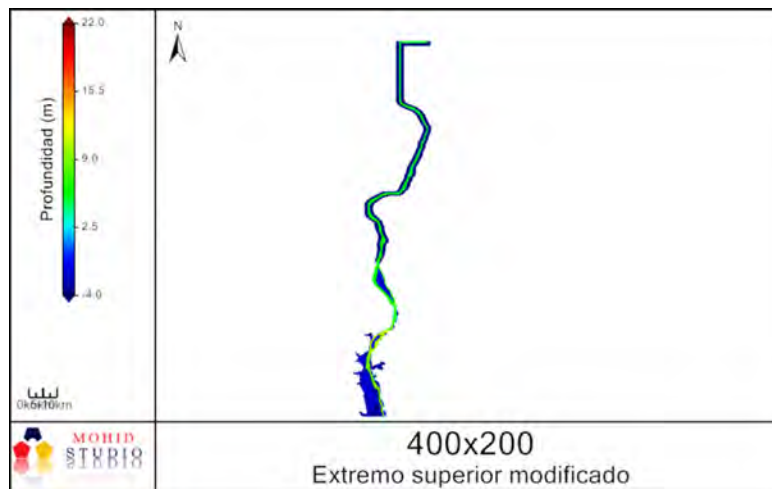
5.5.4.4. Extensión de planicies

Continuando con el objetivo de detectar alguna variable batimétrica que pueda implicar diferencias temporales en el transcurso del flujo de masa, se amplía la sección del río en el tramo superior de aproximadamente 145km: desde el extremo superior hasta el comienzo de la bifurcación precedente a la ciudad de Concepción del Uruguay, como lo exhibe la Figura 5.35. La metodología utilizada consiste en adicionar márgenes en el extremo superior del río, a ambos lado de éste, cada una de extensión del mismo orden que el ancho del río a esa altura (aproximadamente 1200 metros). Dichas márgenes se

implementan con cota igual a la máxima del dominio, resultando una profundidad en el canal de 9 a 10 metros. También se agregan las islas ubicadas aguas arriba y abajo de la ciudad de Paysandú con una cota de 2 metros por encima del cero del modelo.

Tanto las cotas consideradas para las márgenes como para las islas, se ubican por debajo de los niveles para caudales altos en este tramo del río, a modo de ser inundados. Se recuerda que los niveles obtenidos en Paysandú por el modelo en su configuración inicial, para los caudales más elevados de la serie de caudales altos, se encuentran entre 8 y 9.3m.

FIGURA 5.35: Extensión de planicies del tramo superior del dominio



Con estas modificaciones, el tramo superior del río cuenta con secciones transversales más extensas, implicando un mayor perímetro mojado, con aumento de fricción y con ello disminución de velocidades y tránsito más lento del caudal.

Dicha modificación batimétrica, según los resultados del modelo, no se traduce en el corrimiento temporal significativo necesario para sincronizarse con la serie temporal de registros reales en la ciudad de Paysandú, y menos aún en la sección en la ciudad de Fray Bentos.

A pesar de lo anterior, sí se visualiza diferencias en los niveles respecto a la configuración original de la batimetría, del orden de los 20cms en la sección correspondiente a Paysandú, siendo prácticamente nulas en la de Fray Bentos.

5.5.4.5. Modificación de la resolución batimétrica

Como última variante de la información batimétrica ingresada al modelo, se reduce el tamaño de las celdas de 400 y 200 metros a 200 y 100 metros, a modo que cada celda de la malla original es dividida en cuatro, manteniendo las características de orientación y tipo de malla rectangular variable.

La metodología para la obtención de la malla de mejor resolución es la descripta en la siguiente Sección Control de oscilaciones numéricas. En dicha sección se cuenta con información detallada de los resultados obtenidos con esta nueva configuración de malla.

La reducción del tamaño de las celdas no se traduce en mejoras significativas en los resultados de niveles ni en lograr un corrimiento temporal en la curva de niveles. No obstante, sí muestra una vinculación con el paso temporal del modelo en cuanto a las distorsiones numéricas (desarrollado en el punto 5.6).

5.5.5. Conclusiones

A lo largo de este capítulo se analiza individualmente cuánto puede afectar los resultados una variación en la magnitud de ciertos parámetros del modelo: el aporte de caudal proveniente del río Negro y del río Gualedaychú (los dos aportes más importantes que posee el río Uruguay), la influencia del viento y variaciones en la batimetría. Para el caso de los dos primeros, muestran menores órdenes de diferencias con la situación original frente a los que producen las variables del viento y la batimetría.

Para considerar el efecto del viento se impone en el modelo una condición de viento de velocidad constante en el tiempo y en el dominio, de valor medio 7m/s y extremo 20m/s con dirección sudeste. Se observa que el viento en condiciones extremas, ante un escenario de bajos caudales, es capaz de ocasionar una distorsión en el campo de velocidades, principalmente desde Nueva Palmira hasta isla Zapatero. Se provoca una afectación en el comportamiento del río, diferenciando severamente lo que ocurre en el canal (centro) de lo que sucede en las zonas someras (márgenes), en cuanto a velocidades y sentidos de flujo. Asimismo, se identifica dos diferentes afectaciones según se considere el tramo al sur del *Martillo* o el tramo entre éste y isla Zapatero. En el primer caso, el flujo es invertido en zonas que en la configuración sin viento no ocurría e intensifica las inversiones en casos que sí ocurría, ocasionando un notorio incremento de zonas de recirculación principalmente en este tramo del río. En cambio, en el segundo tramo considerado, se altera la dirección del flujo en la zona del canal potenciando las inversiones y se incrementa las velocidades en las márgenes del río eliminando las velocidades negativas.

Ante condiciones de caudales medios, el viento en magnitud extrema de 20m/s reproduce comportamientos análogos. Sin embargo, el viento en condiciones medias no es suficiente para alterar parcial o totalmente la hidrodinámica del río de forma sustantiva, sino que en Fray Bentos solamente afecta las velocidades de flujo en mayor medida en las márgenes del río que en los canales.

Por otra parte, se analizan variaciones de batimetría. Se consideran cinco variantes en total. En el caso de la primera variante, se subdivide en una profundización total y una parcial del cauce del río, esta última hacia aguas arriba de la isla Santa María Grande. Esta última no refleja modificaciones apreciables de los niveles obtenidos en la zona de Fray Bentos. Contrariamente, la actuación en la totalidad del cauce refleja disminuciones en los niveles, según sea el grado de la profundización. Dicha disminución, en Fray Bentos, se materializa como aproximadamente la mitad de la profundización en el escenario de caudales altos. De menor magnitud es la repercusión de la profundización para caudales medios, siendo notoria en ocurrencia de caudales de flujo dominantes frente a la condición de borde inferior, y prácticamente nula en situación de caudales bajos en los que domina el nivel de marea impuesto en Nueva Palmira.

Un acercamiento a los registros reales en el escenario de caudales altos lo reproduce la configuración “+100cms”. Sin embargo, el escenario “+50cms” presenta mejores resultados globalmente para los escenarios de caudales medios y bajos, mientras que en el de caudales altos la profundización “+50cms” se traduce en un menor acercamiento a la curva de registros reales que la profundización de mayor magnitud “+100cms”. Ante caudales bajos, y por tanto, mayor influencia de la condición en la frontera abierta inferior, el efecto de profundizar el cauce es relativamente despreciable.

La segunda variante concierne la profundización en forma total del dominio disminuye levemente aún más los niveles respecto a la profundización sólo del cauce. Para caudales altos los niveles disminuyen en 4cms aproximadamente en la sección de Fray Bentos (un 16 % más que únicamente la profundización del cauce), y en Paysandú en unos 10cms. A pesar de la disminución de niveles obtenida al profundizar el cauce del río, se continúa obteniendo un desfase temporal detectado previamente para el escenario de caudales altos.

Otras variantes afectan solamente las planicies del dominio. Si se disminuye su pendiente se logra una disminución de niveles en la zona del delta, pero en la zona aledaña a la planta UPM las diferencias de niveles no son significativas. Más importante aún, es que no se detecta un retraso en el tránsito del flujo. Tampoco se observa un efecto favorable si se extiende la planicie en el tramo superior del río, aguas arriba de Paysandú.

Por último, el incremento en la resolución de la malla tampoco produce una mejora en los resultados de los diferentes escenarios considerados.

Como principal conclusión de esta sección, se selecciona la profundización de todo el dominio en 50cms como modificación a considerarse en la configuración final.

5.6. Control de oscilaciones numéricas

La detección de oscilaciones numéricas es un inconveniente usual en modelaciones numéricas. Este fue identificado en los resultados obtenidos para el escenario de caudales altos al considerar un paso temporal (DT) de 30 segundos, siendo despreciable para caudales medios y bajos. Esto se debe a que las velocidades del flujo son mucho mayores, debido al significativo tránsito de caudal en el sistema.

Al establecer dicho paso temporal, en el escenario de caudales altos se detectan amplitudes de oscilación numérica de hasta 15cms, lo que inquieta a identificar las causas del mismo. En este sentido, se analiza la repercusión en los resultados de tres variables: la profundidad mínima de agua para que la celda sea computable, el paso del tiempo de la simulación y la resolución de la malla. Se analiza entonces para dos tamaños de mallas el efecto del paso temporal y la profundidad mínima, tanto de forma individual como conjunta.

Como primera acción se afecta únicamente el paso temporal de la malla original de 400x200, reduciéndolo de 30 a 15 segundos, lo que resulta en un número Courant de la mitad del valor original (2.33). La amplitud de las oscilaciones resultantes se reduce a pocos milímetros.

Si en simultáneo a utilizar 15 segundos se reduce la altura mínima de cálculo a 10cms, no es posible extraer conclusiones comparativas debido a que con esta configuración las propiedades de estado sufren inestabilidad.

Seguidamente, se configura una malla de mejor resolución (200x100), de modo que mantenga en la medida de lo posible las características de la malla original de 400x200. Con esto resulta una malla de tipo rectangular con tamaños variables de celda cumpliendo que cada una de las celdas de la malla original es dividida en cuatro celdas, lo que cuatriplica la cantidad de celdas computables del dominio. La malla 200x100, a modo de incluir todas las modificaciones efectuadas en la malla de 400x200, se obtiene a partir de esta última. Para ello, la información batimétrica de la malla mayor se extrae en forma de puntos (la cota de la celda se asigna al punto en el centro de la misma), que es utilizada junto con la grilla de 200x100 para obtener así la malla por medio de triangulación.

Sin perjuicio de lo que se presenta a posteriori, se detectan diferencias en la cantidad de celdas inundadas principalmente en las planicies de ambas mallas debido a la modificación batimétrica que implica la triangulación efectuada³, implicando una pequeña

³Se utiliza el método de triangulación desarrollado por Robert Renka, Departamento de Ciencias de Computación, Universidad de Texas del Norte MOHID Wiki.

diferencia en los resultados de niveles de Fray Bentos (del orden de 2.5cms inferior respecto a la malla 400x200). Sin embargo, se entiende que esto no invalida los resultados presentados a continuación ya que ambas mallas desarrollan comportamientos comparables.

Al ser menor el tamaño de discretización de la malla menor, le corresponde un menor paso temporal de cálculo que se estableció inicialmente en 15 segundos. Si bien el número Courant se mantiene constante (4.65) respecto a la configuración original de la malla mayor, se detecta un aumento en las oscilaciones numéricas, pasando de amplitudes máximas entre 0 y 8-15cms a valores entre 10 y 30cms.

Esto se debe a las características de la malla menor, principalmente en el canal principal, en donde para un DT de 15 segundos (Courant=4.65) se forma un efecto “ajedrez” en el campo de niveles. A pesar que esta diferencia no llega a inestabilizar el modelo, se puede visualizar este fenómeno en las Figuras 5.36 y 5.37, donde se representa el campo de niveles en la zona de Fray Bentos, comparando las configuraciones de 400x200 y 200x100 para caudales altos.

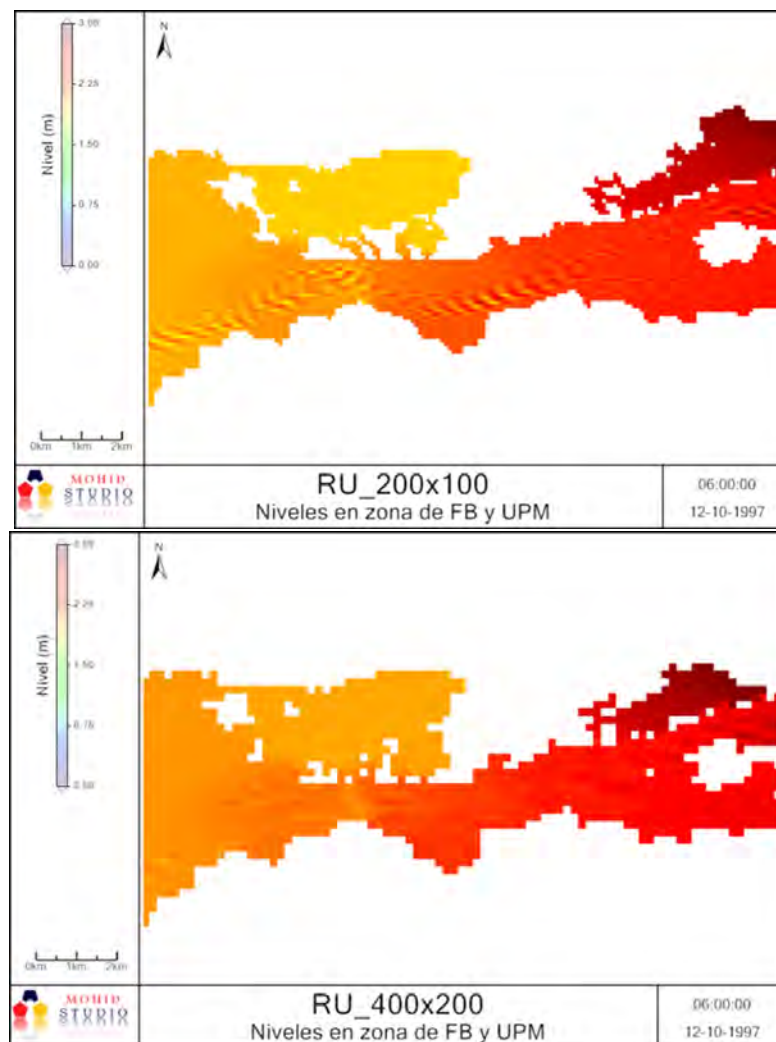
Estableciéndose la altura mínima de agua para que una celda sea computable en 10cms y reduciendo el paso temporal a 5 segundos (número Courant 1.58), se mejoran sustancialmente los resultados prácticamente eliminando las dispersiones numéricas. Este valor fue adoptado luego de que al intentar con un DT de 10 segundos se obtuvieran resultados también con perturbaciones, aunque de menor magnitud que con un DT de 15 segundos, rondando una amplitud aproximada de hasta 20cms.

Esto último se repite al utilizar como altura mínima de las celdas 30cms y un paso temporal de 5 segundos, difiriendo de los resultados con profundidad mínima de celda de 10cms no tanto en la amplitud de las oscilaciones numéricas sino en un aumento de los niveles desde unos pocos a 10 milímetros.

Por lo mencionado anteriormente, como primera conclusión el número Courant demuestra estar vinculado al grado de perturbaciones numéricas en los resultados; a menor valor de aquel sucede menor oscilación para una misma malla. Sin embargo, esto puede no aplicarse al comparar mallas con diferente resolución. La batimetría de malla variable de 200x100 presenta mayor perturbación en sus resultados a igual número Courant que la malla original de 400x200.

Asimismo, la malla 400x200 con un DT de 15 segundos genera resultados prácticamente iguales a los que entrega la malla 200x100 con un DT de 5 segundos, teniendo esta última un tiempo de procesamiento 12 veces mayor al primero. Por lo tanto, la configuración utilizada como Dominio Padre para la implementación de modelos anidados con la malla de 400x200 y con DT de 15 segundos es válida. Por otra parte, la variable de profundidad

FIGURA 5.36: Comparación de campo de niveles para diferentes resoluciones de malla

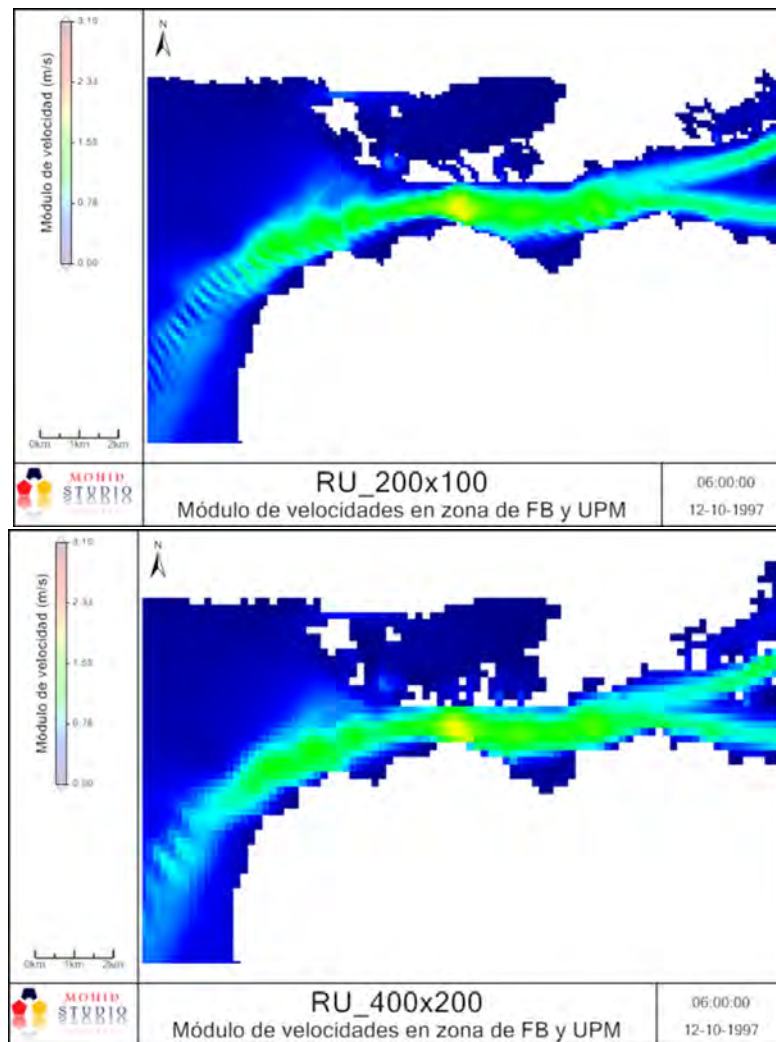


mínima de celdas contribuye a la estabilidad del modelo, sin afectar de forma sustantiva los resultados del mismo, por lo que el valor de este parámetro se establece en 30cms a lo largo de todo el trabajo aquí presentado.

5.7. Proceso de calibración

Luego de analizar variables de ajuste se procede a efectuar la calibración al modelo con el ajuste del coeficiente de rugosidad de fondo. Para ello se adopta incrementos al valor originalmente adoptado de 0.002m, en un orden y dos órdenes como es expuesto a continuación.

FIGURA 5.37: Comparación de campo de velocidades para diferentes resoluciones de malla



5.7.1. Coeficiente de rugosidad

El ajuste del valor de rugosidad de fondo del dominio (k) se analiza considerando dos valores diferentes que el adoptado en la configuración original de 0.002m: 0.02 y 0.2 metros respectivamente. Ambas variantes (0.02 y 0.2m) suponen valores de mayor magnitud, ya que el valor 0.002 metros se considera extremadamente bajo, pudiendo ser fácilmente un valor mínimo para cauces reales (Chow, 1959).

En líneas generales, los resultados de simulaciones exponen una abrupta disminución de la correlación entre los niveles registrados en Fray Bentos y los obtenidos por el modelo para las diferentes configuraciones en cuanto a la rugosidad de fondo. A mayor rugosidad, el coeficiente de correlación decrece, incrementándose las diferencias con la configuración original en cuanto a la variabilidad y magnitud de tirantes y velocidades. Esto se debe

a que ante la existencia de una rugosidad mayor, para un mismo caudal disminuyen las velocidades medias e incrementan los tirantes.

Relacionado con lo anterior, las disminuciones de nivel suceden con menor rapidez y se destacan mínimos y máximos relativos de mayor magnitud que en la situación original. Esto trae consigo también un corrimiento temporal entre los mínimos y máximos, retardándose ambos.

Estas características se dan con mayor importancia en el escenario de caudales medios y altos, en relación con el escenario de caudales bajos. Por ello, seguidamente se presentan algunas conclusiones del primero, entendiéndose que son extrapolables al segundo, aunque en el caso de caudales altos las diferencias respecto a la configuración original serían de mayor magnitud.

En la Tabla 5.14 se presentan los coeficientes de correlación y las diferencias máxima y promedio de niveles entre cada una de las configuraciones consideradas (con rugosidades 0.002, 0.02 y 0.2m) y los datos de registros, todos obtenidos para el escenario de caudales medios en la sección de Fray Bentos. Las Figuras 5.38 y 5.39 esquematizan las series de niveles y velocidades para las tres configuraciones consideradas en la sección de Fray Bentos. Como primera conclusión, la disminución del coeficiente de correlación y el incremento en la diferencia de niveles indican un deterioro en el ajuste del modelo al incrementar la rugosidad. También se observan grandes cambios en las velocidades instantáneas al incrementar la rugosidad de fondo.

TABLA 5.14: Indicadores de similitud entre resultados de modelo de niveles para diferentes rugosidades de fondo y registros reales en Fray Bentos

	Configuración original ($k=0.002m$)	Configuración $k=0.02m$	Configuración $k=0.2m$
Coefficiente de Correlación	0.957	0.819	0.463
Diferencia Promedio (m)	0.071	0.249	0.856
Diferencia Máxima (m)	0.328	0.714	1.754

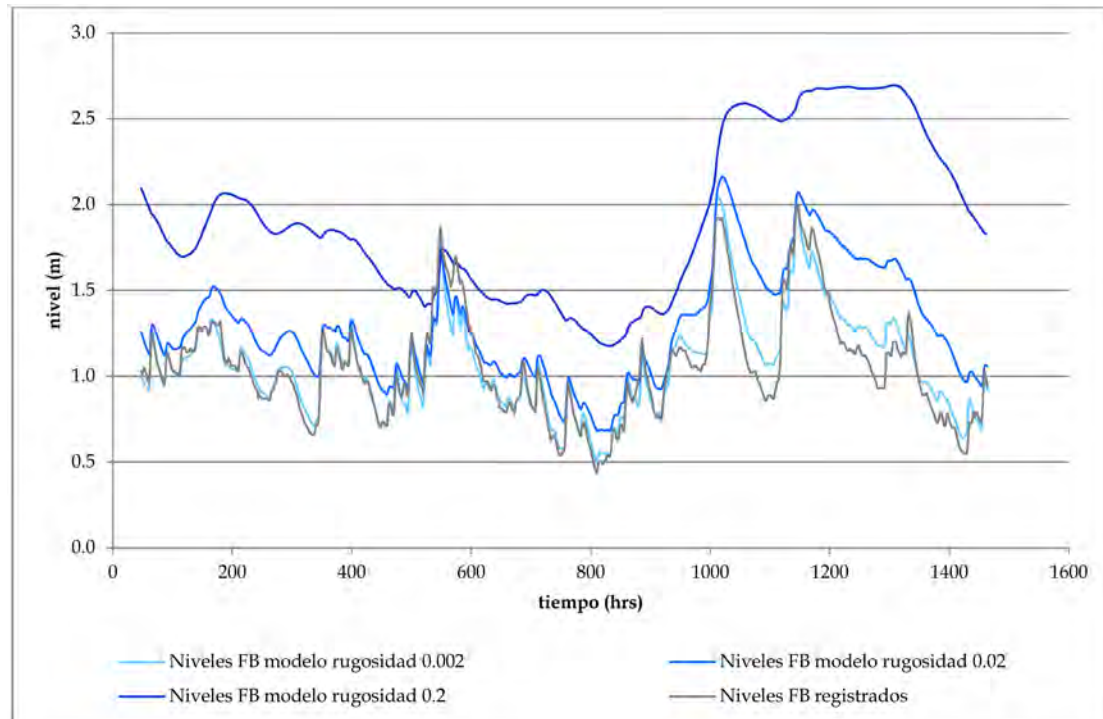
Como segunda conclusión, se observa que las diferencias entre las tres configuraciones consideradas dependen de las condiciones hidrodinámicas, pues se observan dos comportamientos según domine el efecto de marea o el caudal erogado por la Represa. En el caso del primero, los picos de niveles no sufren gran deterioro pero se observa que luego de dichos picos la disminución de los niveles sucede más lentamente cuanto mayor sea la rugosidad de fondo, logrando atenuar las fluctuaciones de niveles en los valles de la curva. En cambio, cuando el sistema se encuentra dominado por forzantes de caudal descargado por Salto Grande, además de un deterioro en la variabilidad de los niveles existe también un desfase temporal. El deterioro identificado al aumentar la rugosidad

se explica tanto por los incrementos de nivel como por un desfase temporal en la ondulación de las curvas temporales de niveles, y es mayor cuanto mayor sea la rugosidad de fondo del cauce. También al escurrir mayor caudal suceden mayores apartamientos de la curva de datos reales, tanto en cuanto al valor de los niveles como al corrimiento temporal. El retardo puede variar sensiblemente en la serie de caudales medios: para la variante de rugosidad 0.02m se traduce en un rango entre 6 y 11hrs, y para la variante de rugosidad 0.2m en un rango entre 13 y 44hrs o más, ambos respecto a la configuración original del modelo y medidos en Fray Bentos.

Lo anterior redundaría en la reducción de ocurrencias de inversión de flujo detectadas en Fray Bentos. Con el aumento de rugosidad en un orden, es suficiente para que en el escenario de caudales medios se eliminen las tres ocurrencias identificadas anteriormente de inversión de flujo en la configuración original. Asimismo, las diferencias entre ambas configuraciones, tanto en velocidades como en niveles, suceden con mayor significancia cuanto mayor sea el caudal de aporte.

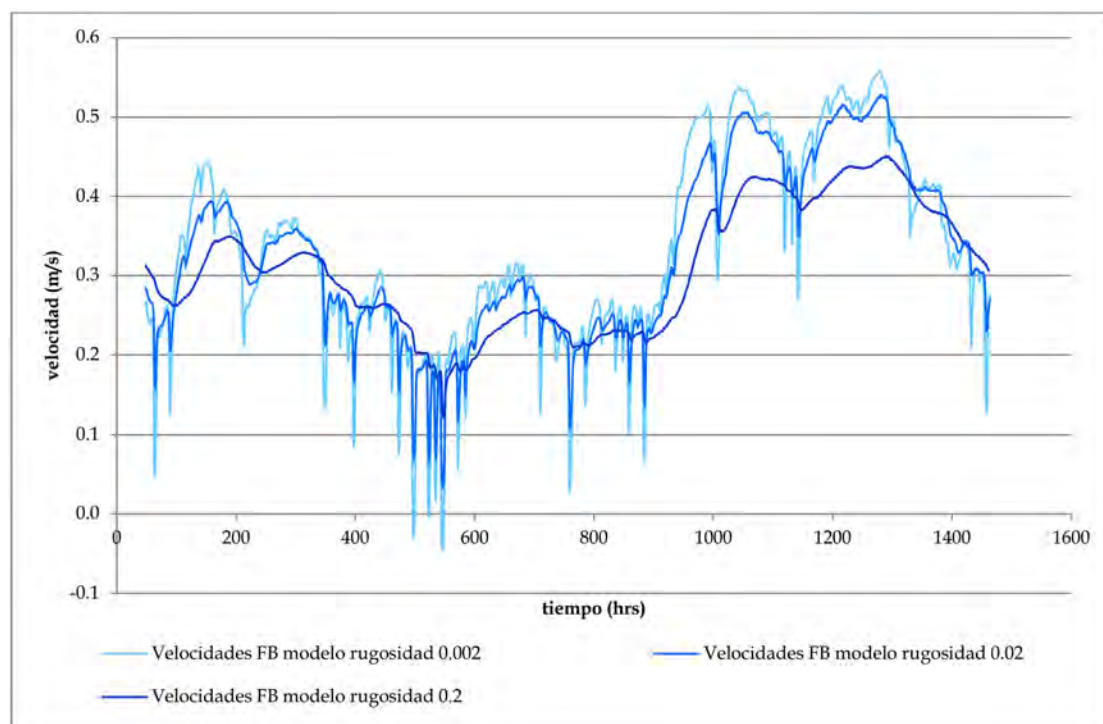
En el caso de Paysandú, debido a que la influencia de marea es mucho menor, las variaciones de niveles al aumentar la rugosidad son sensiblemente mayores.

FIGURA 5.38: Efecto de rugosidad de fondo en los niveles en sección Fray Bentos, escenario de caudales medios



Analizando las diferencias de velocidad para ambas configuraciones modificadas frente a la configuración original, en la Tabla 5.15 se presentan las diferencias en términos

FIGURA 5.39: Efecto de rugosidad de fondo en las velocidades en sección Fray Bentos, escenario de caudales medios



promediales y máximos para la sección Fray Bentos.

TABLA 5.15: Relación entre resultados de modelo de velocidades para diferentes rugosidades de fondo y la configuración original en Fray Bentos, escenario de caudales medios

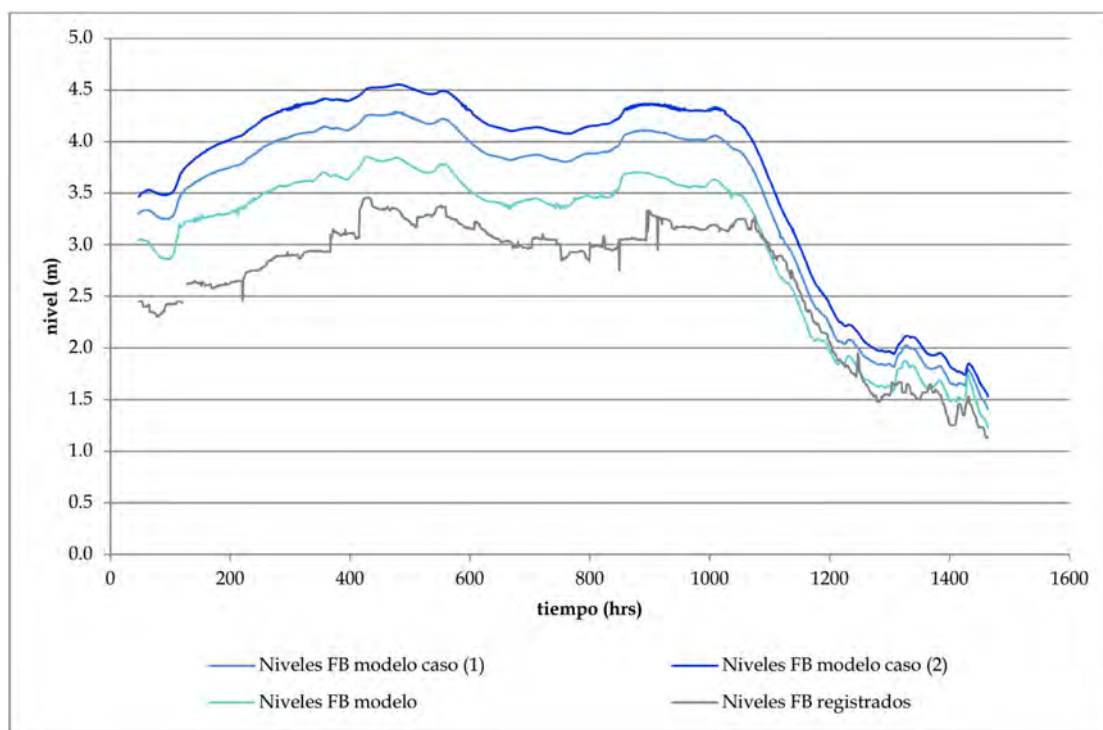
	Configuración k=0.02m (m/s)	Configuración k=0.2m (m/s)	Relación
Diferencia Promedio	0.023	0.058	2.5
Diferencia Máxima	0.136	0.253	1.9

Por otra parte, también se considera dentro de este análisis de la rugosidad, una variación sectorial de la misma en el dominio, debido a las diferencias detectadas para el escenario de caudales altos presentadas en la sección “Situación caudales altos” (sección 5.4.3.3). Estas diferencias se refieren tanto a diferencias entre los niveles del modelo y los registros reales como un desfase de dichos valores en el tiempo. Por lo tanto, se pretende analizar si un incremento en la rugosidad de las planicies del dominio logra retardar el tránsito de las ondas de crecida en el río. Con ello se acercarían los resultados del modelo en la sección de Fray Bentos a los registros reales. Se plantean entonces dos modalidades: (1) a partir de la cota de 3 metros, las celdas adoptan una rugosidad de 0.01, y el resto el valor de rugosidad original de 0.002 metros; (2) para celdas con zampeado mayor a 3 metros por encima del cero del modelo, se establece un valor de rugosidad de 0.02 metros,

menor de 2 metros, se adopta el valor original de 0.002 y en el caso de las celdas con zampeados entre 2 y 3 metros, se efectúa una relación proporcional entre los dos valores antes mencionados. Las cotas a partir de las cuales se modifica la rugosidad pertenecen a las planicies y no al cauce del río, lo que podría habilitar un retardo en el vaciado de las mismas hacia el cauce, implicando un retardo en las ondas de crecida.

Ninguna de las modalidades implementadas como variación sectorial de la rugosidad repercute en beneficios significativos para los resultados obtenidos previamente, sino que por el contrario, se incrementan los niveles suavizándose su variación. Esto ocasiona que las curvas de niveles obtenidas por el modelo no reproduzcan la evolución de los niveles registrados. En la sección de Fray Bentos se incrementa la diferencia con la curva real en hasta un orden de 50cms para el caso (1) y de 80cms para el caso (2). Esto es posible observar en la Figura 5.40, en la que se presentan las curvas de nivel para ambos casos junto con la obtenida en la configuración originalmente adoptada y la curva de registros.

FIGURA 5.40: Efecto de rugosidad de fondo en los niveles en sección Fray Bentos para los casos (1) y (2), escenario de caudales altos



5.7.2. Conclusiones

Ante variaciones de rugosidad de fondo se obtienen variaciones en los resultados del modelo. El incremento en la rugosidad en forma homogénea en todo el dominio, tanto

en uno como en dos órdenes, provoca un deterioro en la curva de niveles obtenida en Fray Bentos ya que se disminuye el reflejo del comportamiento de la marea y la magnitud de los niveles incrementan. Esto se relaciona con una disminución de la velocidad por el incremento de las pérdidas por fricción. Esto conlleva un deterioro en el coeficiente de correlación con los datos de registros efectuados en los puntos de control de Fray Bentos y Paysandú.

Vinculado a lo observado para el escenario de caudales altos, a modo de procurar provocar una disminución en el tránsito del flujo descargado, se suma a lo anterior el análisis de variantes de rugosidad en las planicies. Para ello se consideran configuraciones del modelo con sectores del dominio de diferente rugosidad. También con estas configuraciones se obtienen niveles superiores y más enlentecidos en el tiempo. Se concluye que el coeficiente de rugosidad adoptado en la configuración original de 0.002m, si bien es considerado un valor mínimo para cauces reales y bajo para el río Uruguay, es el adecuado a modo del presente estudio.

Como conclusión, en función de los efectos inducidos por cada una de las variables mencionadas antes, se considera adecuado adoptar para la formulación final del modelo los siguientes parámetros: un coeficiente de rugosidad de 0.002 metros, y una profundización de la información batimétrica en la totalidad del dominio de 50cm.

Las consideraciones recién punteadas se adoptan para la configuración del modelo que será objeto de posterior validación.

5.8. Esquematización finalmente adoptada

A partir de lo precedentemente expuesto, para el modelo Padre se opta por la malla bidimensional rectangular de paso variable de 400x200 metros, imponiendo un paso temporal de 15 segundos. Se efectúa una reducción total batimétrica de 50cms, y se impone una profundidad mínima de celda computable de 30cms para controlar las ocasionales inestabilidades intermareales y por los grandes gradientes de velocidad que traen las ondas de crecidas elevadas.

Es importante mencionar, sin embargo, dos falencias de la implementación del modelo que no alcanzaron a ser corregidas con el proceso de calibración ni con las variables de ajuste analizadas. La primera de ellas es que, particularmente en la zona de Fray Bentos, no reproduce adecuadamente la hidrodinámica del río ante caudales elevados, pero sí lo hace muy bien en el escenario de caudales medios y bajos.

Como segunda falencia, el modelo no logra reproducir adecuadamente los niveles en la parte superior del río, reflejado por los resultados obtenidos en la sección de Paysandú. En esta parte, si bien se dispone de una adecuada representación de la evolución de los niveles reales, los resultados del modelo presentan un desfase respecto a las medidas, variando de un máximo de 0.60 metros durante caudales bajos, un máximo de casi 2 metros ocurriendo en escenario de caudales elevados y un máximo superior a 2m para el escenario de caudales medios. Esto es presentado en detalle en el Anexo B.

Por otra parte, las velocidades a lo largo y ancho del dominio pueden adoptar diversos valores según el observador se sitúe en el canal, en las zonas someras o en las planicies. O según se sitúe aguas arriba de Fray Bentos, en donde el cauce se encuentra más confinado, o aguas abajo en donde se cuenta con mayor extensión de zonas someras. O inclusive, según el caudal de escorrentía, el cual puede variar entre 600 y 22000m³/s aproximadamente.

El comportamiento del modelo seleccionado ante los escenarios de caudales bajos, medios y elevados se expone a continuación.

5.8.1. Resultados para períodos seleccionados

5.8.1.1. Situación caudales bajos

Respecto a la configuración batimétrica inicialmente considerada, la ahora seleccionada como definitiva no presenta variaciones significativas en cuanto a la relación de los resultados del modelo respecto a la información disponible. Sino que, como lo cuantifica la Tabla 5.16 para el caso de Fray Bentos, exhibe una pequeña desmejora respecto a la configuración original (ver Tabla 5.3 a efectos comparativos).

TABLA 5.16: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales bajos, etapa de calibración

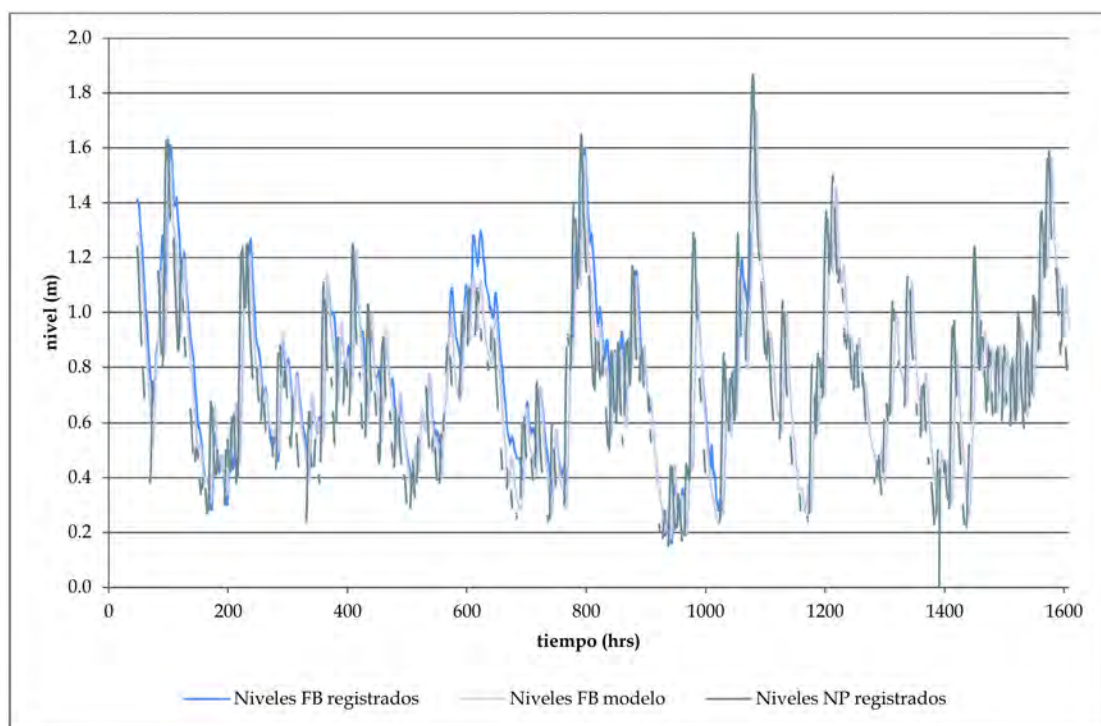
Coefficiente de Correlación	0.975
Diferencia Promedio (m)	0.068
Diferencia Máxima (m)	0.278

En el presente escenario, el escurrimiento del flujo se concentra principalmente dentro del cauce. Sin embargo, bajo algunas condiciones presenta ocupación de celdas en las márgenes del río que en la configuración originalmente establecida no ocurría, debido a la profundización efectuada en todo el dominio.

Los niveles impuestos por la condición de borde en Nueva Palmira varían entre 0.15 y 1.96 metros respecto al cero hidrológico del modelo (0.95 y 2.76 metros respecto al cero

Wharton). Los niveles en Fray Bentos presentan gran similitud en cuanto a la variación y magnitud respecto a los datos reales, como lo muestra la Figura 5.41, con valores de entre 0.18 y 1.83 metros.

FIGURA 5.41: Niveles en Fray Bentos para el escenario de caudales bajos, etapa de calibración



En la Figura 5.42 se presenta un mapa de niveles y velocidades para un instante dado del tramo final del dominio, limitado aproximadamente desde Nuevo Berlín hasta Nueva Palmira. La misma esquematiza un evento de inversión en dicho tramo del río. La Figura 5.43 es una ampliación de la figura precedente, con intención de mostrar claramente la trascendencia del fenómeno en la zona principal del estudio.

A partir de la Figura 5.42 se puede observar además como una disminución de nivel en Nueva Palmira ocasiona una modificación en el comportamiento del flujo. En la parte superior del tramo, el flujo se encuentra invertido mientras que en el inferior debido a la disminución de los niveles en la frontera inferior, el flujo se dirige hacia ella.

Como lo indica la Figura 5.41, la influencia del Río de la Plata es dominante, llevando a frecuentes eventos de inversión de flujo los cuales en su mayoría alcanzan la sección de Paysandú, así como también incrementa la permanencia de los mismos. Particularmente esto sucede durante los caudales bajos de la serie. En cambio, durante la onda de crecida de la Represa las inversiones no alcanzan a Paysandú (ver Anexo B).

FIGURA 5.42: Inundación máxima de la mitad inferior del río en escenario de caudales bajos

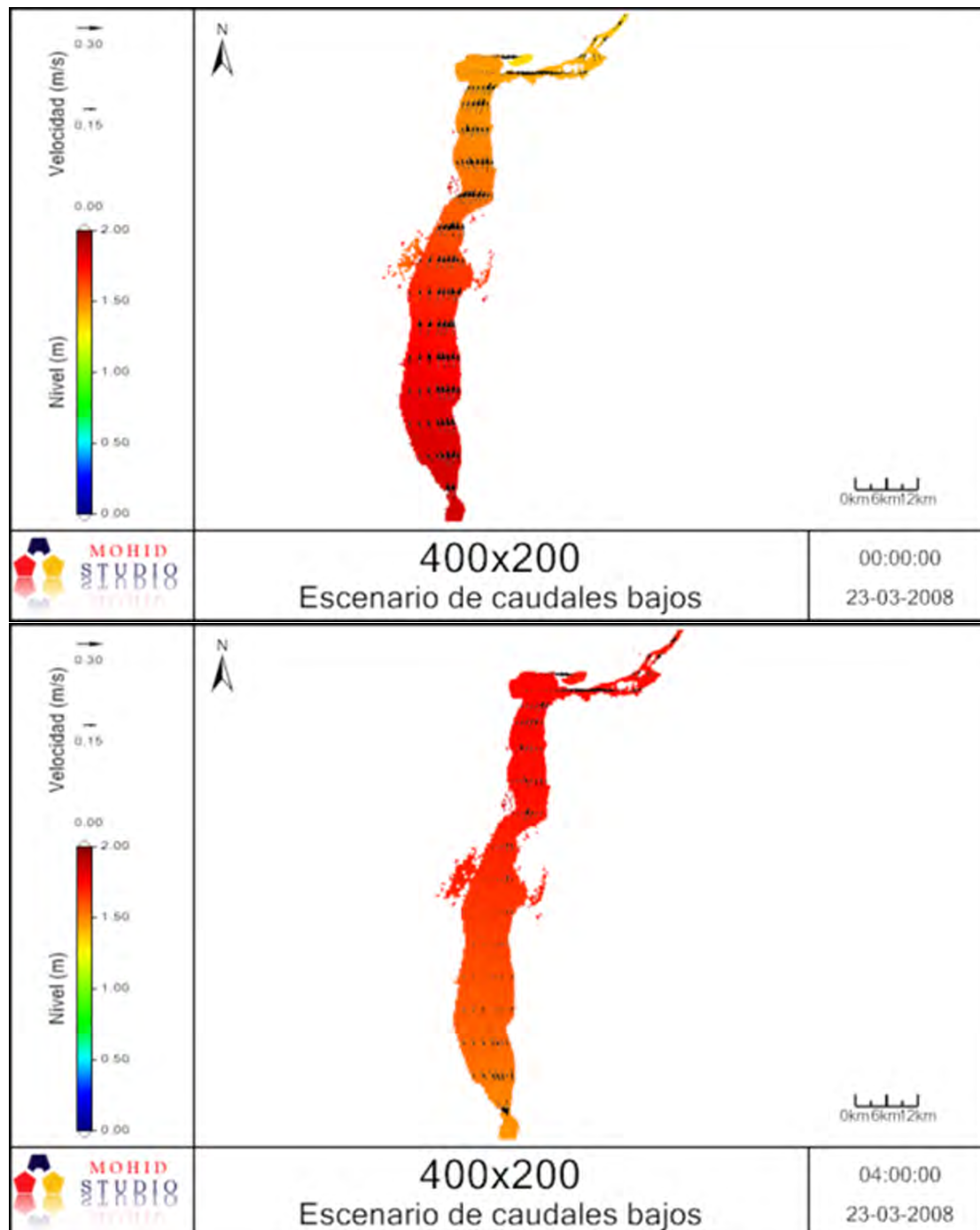
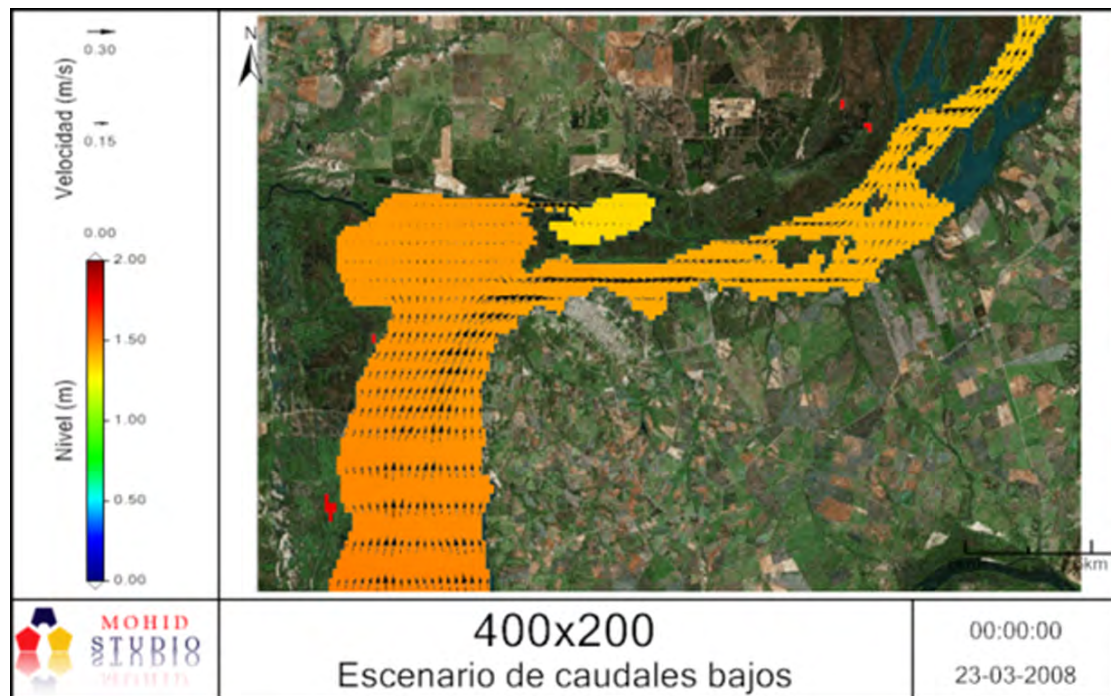


FIGURA 5.43: Inundación máxima en la zona de Fray Bentos en escenario de caudales bajos, etapa de calibración



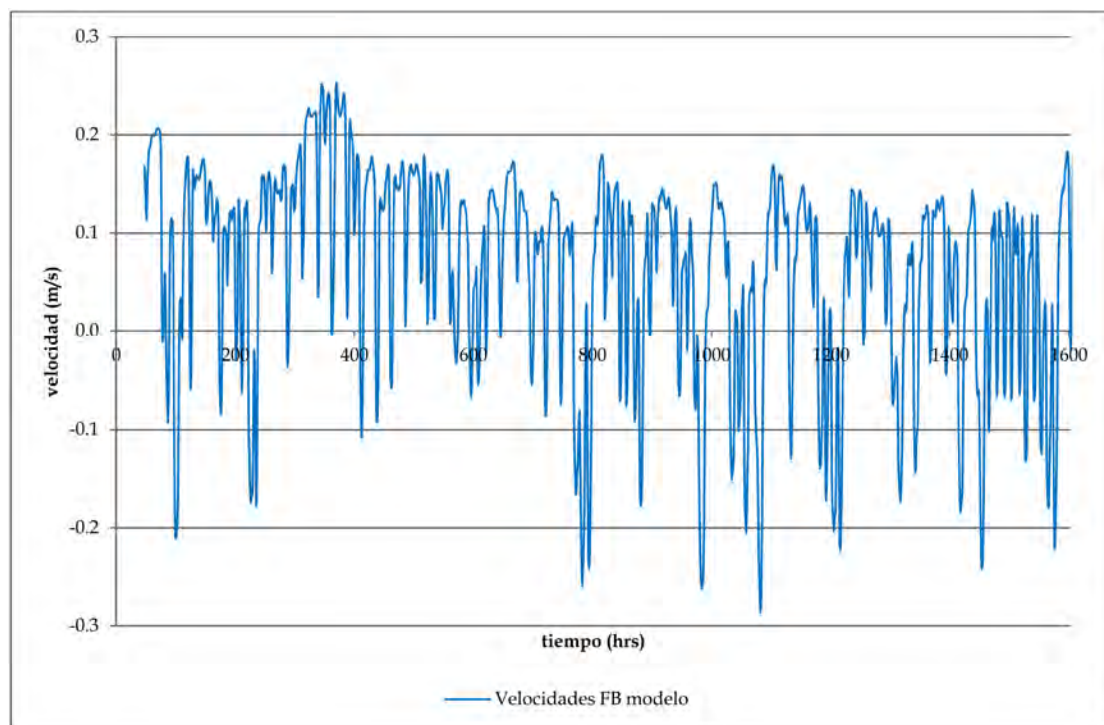
En las Figuras 5.44 y 5.45 se encuentran graficadas las velocidades y caudales respectivamente, ambos en la sección de Fray Bentos. En la última de ellas se compara los caudales en dicha sección frente a la serie temporal de caudales erogados por la Represa y también es posible percibir los valores de caudales de inversión que se obtiene, inclusive alcanzando valores de casi $4000\text{m}^3/\text{s}$. Dicho valor máximo se corresponde a un incremento de nivel en Nueva Palmira de 1m en 12hrs, partiendo de 0.82m hasta 1.87m.

Las velocidades en Fray Bentos, presentan los valores máximos de 0.25 y 0.29m/s, tanto para velocidades positivas como negativas respectivamente (Figura 5.44).

En cuanto al tiempo de tránsito de la onda de inversión, se compone de un tiempo de 5 horas de desplazamiento de Nueva Palmira hasta Fray Bentos. La duración de la inversión de flujo varía entre unas pocas y 22 horas en Fray Bentos.

Puede suceder que estas ondas de inversión se extiendan hasta Paysandú, dependiendo de la velocidad de flujo e inclusive más aún. Para ello, la velocidad del flujo invertido en Fray Bentos debe ser mayor a 0.05m/s ocurriendo de forma simultánea en Paysandú con una situación mantenida de caudales bajos (en el período de tiempo en que se da la onda de marea en Nueva Palmira hasta ésta alcanzar la ciudad de Paysandú), y por lo tanto velocidades positivas en esta ciudad menores a unos 0.25m/s. En cuanto a niveles en Nueva Palmira, en general deben superar los 0.85m respecto al cero del modelo, aunque durante caudales bajos de la serie ($400\text{m}^3/\text{s}$) picos de nivel de solo 0.44m también pueden

FIGURA 5.44: Velocidades en Fray Bentos para el escenario de caudales bajos, etapa de calibración



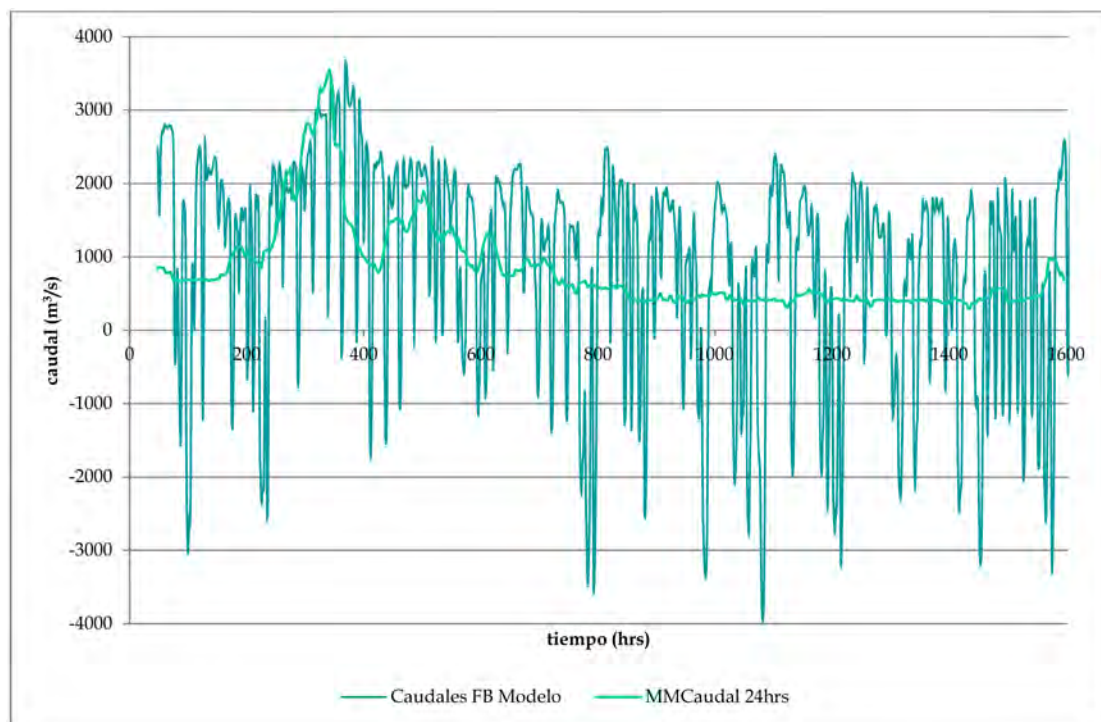
provocar inversiones en Paysandú (y 0.34m en Fray Bentos). El tiempo de permanencia de la inversión en Paysandú, es el valor en Fray Bentos reducido entre un 50 y 70 %. El tiempo en que tarda la onda en alcanzar Paysandú desde la ciudad de Fray Bentos es de unas 5 horas aproximadamente, pudiendo ser un tanto menor o mayor según sea la magnitud de la onda de marea.

5.8.1.2. Situación caudales medios

Al igual que para el escenario recién presentado, los resultados obtenidos para el escenario de caudales medios en general exponen un comportamiento muy similar a la configuración original del modelo de acuerdo a la información documentada precedentemente. No obstante, esto no es así en el tramo final de la serie de nivel en la sección Fray Bentos, coincidente con la predominancia del forzante del caudal de la Represa frente a la condición de borde inferior en Nueva Palmira.

Pues, en este último tramo temporal la configuración seleccionada logra un adecuado acercamiento a la curva de registros reales, según puede apreciarse en la Figura 5.46 donde también puede extraerse los resultados para el resto del período simulado. La relación entre ambas curvas se cuantifica en la Tabla 5.17, la que al igual que el escenario

FIGURA 5.45: Caudales en Fray Bentos para el escenario de caudales bajos, etapa de calibración



anterior muestra buenos coeficientes de correlación respecto a los datos reales, mejorando el homólogo para la configuración original del modelo considerada.

TABLA 5.17: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales medios, etapa de calibración

Coefficiente de Correlación	0.974
Diferencia Promedio (m)	0.067
Diferencia Máxima (m)	0.347

Los niveles en la sección de Fray Bentos varían en un rango entre 0.43 y 1.98 metros a lo largo del período simulado, identificándose tres máximos relativos de niveles según se indica en la Figura 5.46 de 1.80, 1.96 y 1.98 metros, asociados a las horas de la serie 548, 1144 y 1011 respectivamente. Ya para el menor de éstos ocurre una inundación parcial de la planicie del río en la zona del delta aluvial, pero de forma muy leve. Sin embargo, los otros dos extremos de niveles en Fray Bentos se correlacionan con mayores extensiones de inundaciones a los costados del río en dicha zona, debido al efecto sinérgico entre elevados niveles en Nueva Palmira y elevados caudales de escorrentía rondando los 7000 y 8000m³/s.

En cuanto a las velocidades en Fray Bentos, las mismas pueden alcanzar valores de hasta 0.54m/s en sentido normal de flujo y 0.08m/s ante ocurrencia de inversión del

FIGURA 5.46: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de calibración

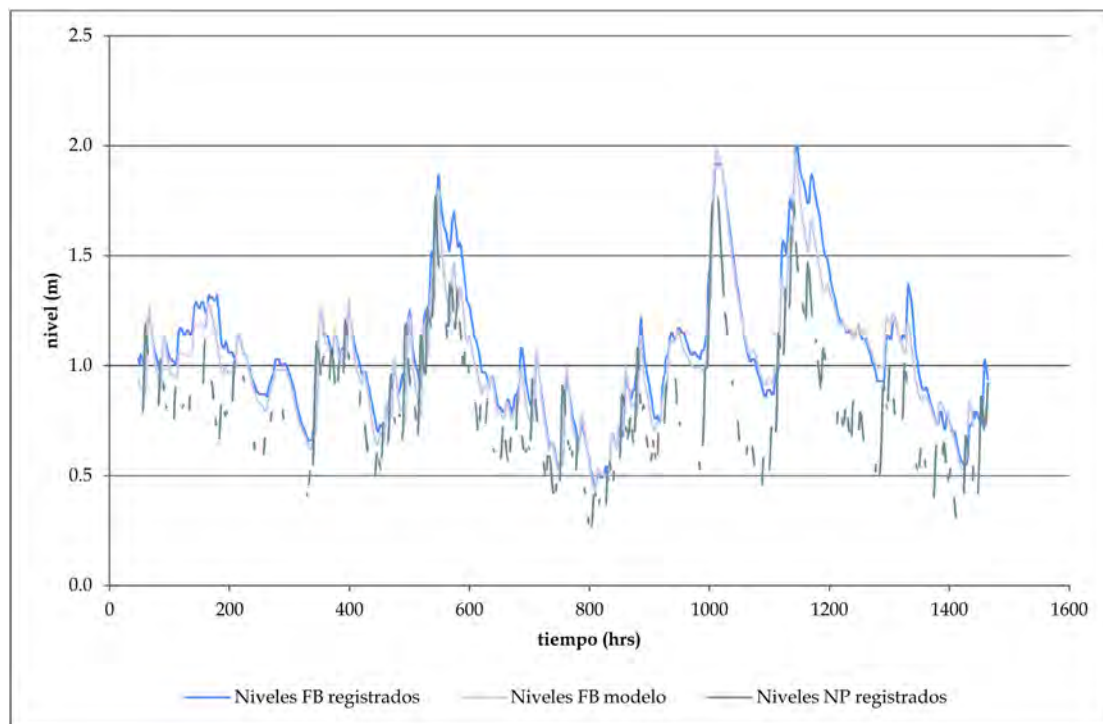
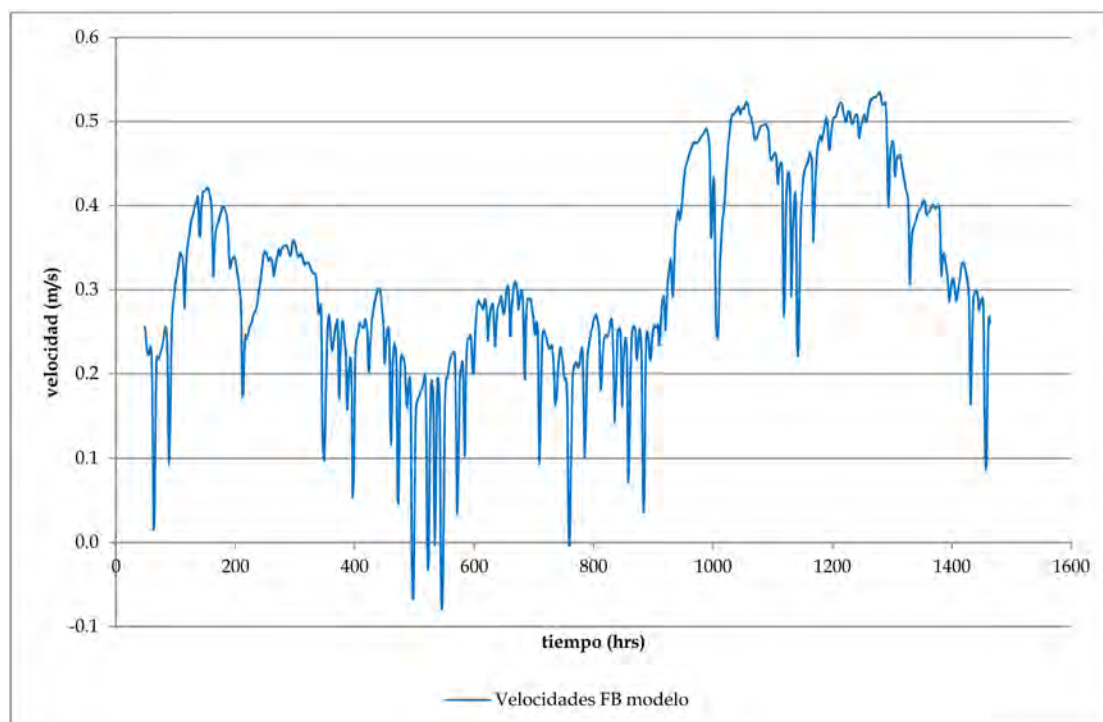


FIGURA 5.47: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de calibración



sentido, como muestra la Figura 5.47 (este caso es diferente a la configuración original en donde se obtenía 0.035m/s como velocidad máxima negativa). Este favorecimiento a las inversiones de flujo que ocurre al profundizar el dominio, repercute no solamente en la velocidad sino también en la recurrencia del fenómeno, emergiendo nuevos eventos para la presente configuración.

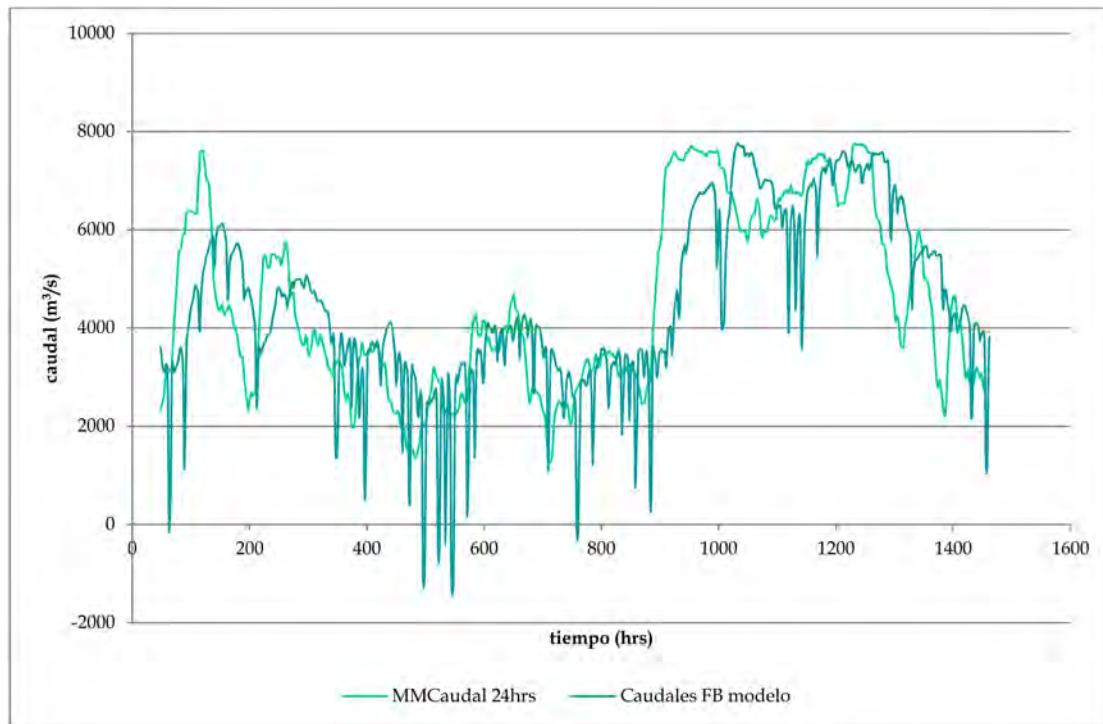
En orden de ocurrencia, los tiempos de inversión de mayor relevancia en la sección de Fray Bentos son de casi 4, 2.4 y 4.3 horas, coincidiendo con velocidades de flujo de poca magnitud (unos 0.068, 0.033 y 0.079m/s respectivamente) y variando según el nivel de condición de borde y el caudal del aporte. Para niveles de Nueva Palmira superiores a 1.15 metros, junto a valores de media móvil de 24 horas de caudales erogados menor a 3000m³/s durante un tiempo prolongado (mayor al tiempo de tránsito de las ondas de crecidas erogadas), ocurren estos fenómenos de inversión.

En cuanto a la extensión longitudinal de la inversión, en el caso del primer evento que sucede el 6/7/2007 a las 16 horas a la altura de Fray Bentos, a las 18 alcanza el punto más lejano de influencia a 14km aguas arriba de dicha ciudad (entre el conjunto de islas Abrigo, Caballos y Caballada y la isla Zapatero). El segundo evento, asociado al 7/7/2007 a las 18 horas en Fray Bentos, llega hasta la punta inferior de la isla Abrigo a las 20hrs, distando unos 9km aguas arriba desde Fray Bentos. Por último, el día 8/7/2007 a las 16hrs comienza la inversión de flujo en Fray Bentos ocasionado por la tercera ocurrencia, que trasciende hacia aguas arriba alcanzando el punto más lejano ubicado a 14km desde Fray Bentos (al igual que el primer caso) a las 20hrs. Por lo tanto, las velocidades de onda de marea resultan entre 1.62 y 4.86m/s.

Por último, es importante destacar la gran diferencia en los caudales de inversión sucedidos en el escenario de caudales bajos y medios. Mientras que en el primero puede alcanzar valores extremos de unos 3900m³/s según ya fue comentado, en el segundo puede alcanzar solamente 1370m³/s, inferior a la mitad del anterior.

En la Figura 5.48 se presentan los caudales instantáneos obtenidos por el modelo en la sección de Fray Bentos. Al compararla con la Figura 5.47 (velocidades instantáneas en el canal), se observa que algunos eventos de inversión no suceden de forma completa a lo ancho de dicha sección. Del campo de velocidades se aprecia que mientras en el canal se obtienen velocidades positivas, en las orillas el flujo es invertido. En general, estos eventos no trascienden aguas arriba de la sección de Fray Bentos. En esos instantes aguas abajo de Fray Bentos suceden inversiones completas; el caudal ingresa a la bahía de Gualeguaychú para luego ingresar a la laguna contigua, que logra funcionar como una laguna de amortiguación, la cual se desagota una vez el flujo en el río es positivo.

FIGURA 5.48: Caudales en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de calibración



En Paysandú, en general la curva de resultados de niveles tiene una forma que se corresponde con la curva de datos reales. No obstante, se obtienen diferencias mayores entre los niveles del modelo y registros particularmente en los períodos temporales en que domina el ingreso de caudal fluvial. A mayor magnitud de caudal son mayores las diferencias. Las máximas, del orden de 1.5 a 2m, se tienen para los caudales entre 7000 y 8000m³/s. En cuanto a las velocidades positivas en la sección de Paysandú, éstas son aproximadamente 2.5 veces mayores a las obtenidas en Fray Bentos cuando el forzante de caudal domina (prácticamente toda la serie a excepción de la ventana entre las horas 500 y 600).

Cuando domina el efecto de marea, los resultados de nivel del modelo son muy cercanos a los datos reales, habiendo diferencias de pocos centímetros.

Por tanto, al igual que el escenario anterior, las diferencias entre ambas curvas para el caso de Paysandú, estaría indicando que si bien dicha sección podría estar bien representada las profundidades de la misma no lo estarían. Otra razón podría radicar en el tramo entre la Represa y Paysandú, el cual en la realidad dispondría de mayor ancho y/o profundidad, con lo que se atenuaría los niveles en Paysandú durante la dominancia de los caudales de aporte.

5.8.1.3. Situación caudales altos

La configuración seleccionada, si bien no ha significado una mejora en el desfasaje temporal previamente identificado entre los niveles registrados y los niveles calculados por el modelo, repercute positivamente en una reducción de la brecha en sus valores, como reflejan los índices mencionados en la Tabla 5.18 para la sección Fray Bentos (ver Tabla 5.5 a efectos comparativos).

TABLA 5.18: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales altos, etapa de calibración

Coefficiente de Correlación	0.960
Diferencia Promedio (m)	0.194
Diferencia Máxima (m)	0.558

No hay eventos de inversión identificados para este escenario, sino que al contrario se observan fuertes parámetros hidrodinámicos. Los niveles pueden superar levemente los 3.5 metros y las velocidades pueden alcanzar los 1.25m/s. En la Figura 5.49 se esquematizan los niveles y en la Figura 5.50 las velocidades instantáneas, ambas en Fray Bentos. No se presentan resultados de los caudales instantáneos en Fray Bentos, ya que su comportamiento es análogo al de la serie de la Represa.

FIGURA 5.49: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de calibración

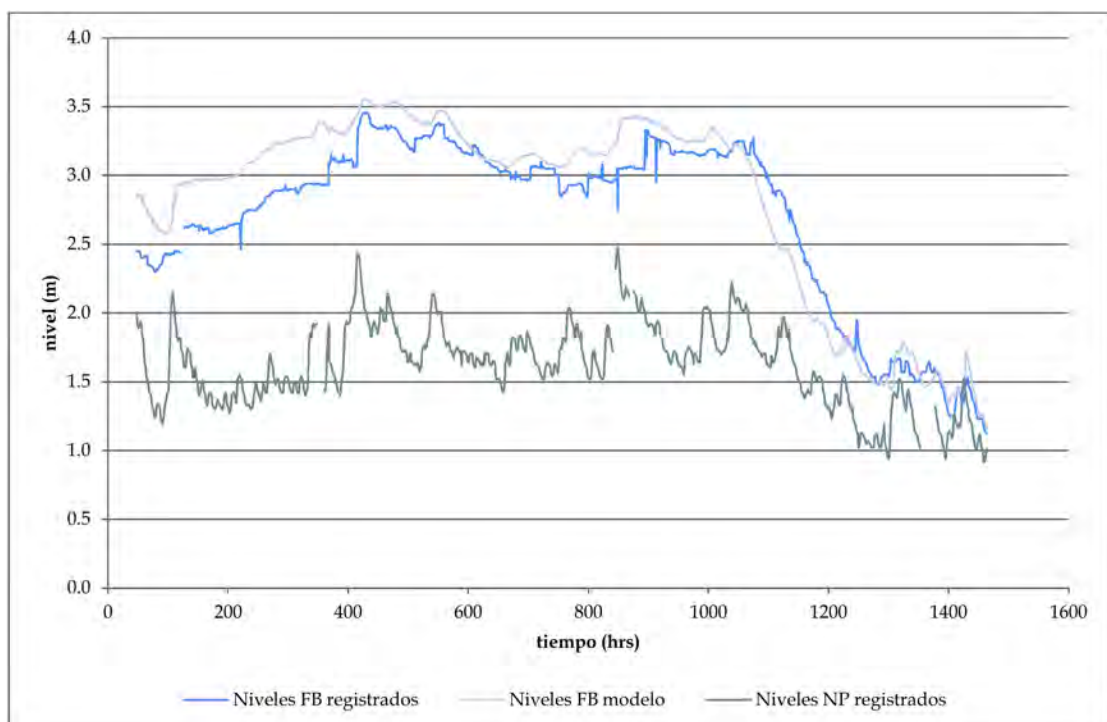
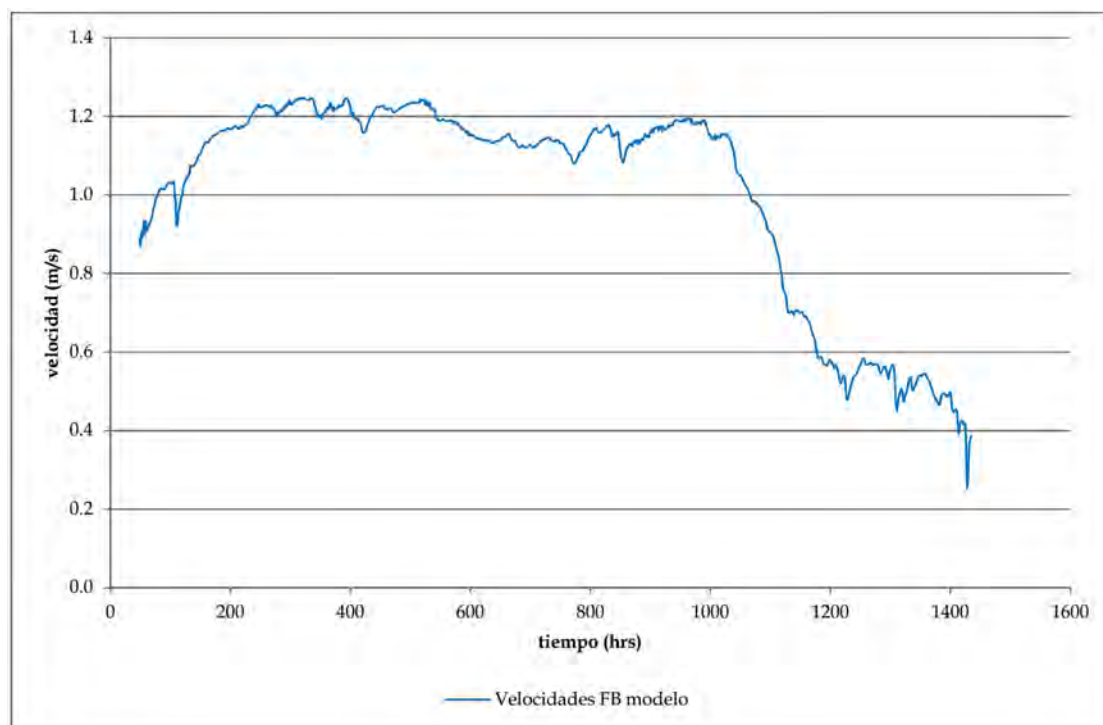


FIGURA 5.50: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de calibración



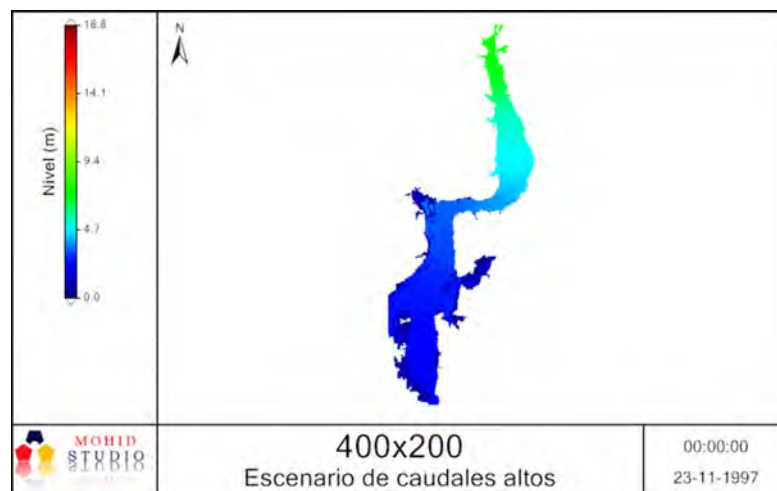
Al comparar los niveles obtenidos para la presente configuración respecto a los obtenidos para la configuración original, se observa que los mismos pueden diferir en un orden de 30cms aproximadamente en Fray Bentos. La configuración actual reproduce, aunque no de forma muy relevante, un aumento en el área de inundación para caudales altos. En la Figura 5.51 se esquematiza la mancha de inundación asociada al instante de mayor nivel en Fray Bentos, de forma análoga que como fue presentado para la configuración original.

Sin embargo, se continúa observando en la serie de niveles del modelo de Fray Bentos un adelanto respecto a los datos reales, significando que el caudal está alcanzando dicha sección de forma más rápida que la que debería.

En la sección de Paysandú se obtienen diferencias entre la curva de registros y la de resultados mayores a las obtenidas en Fray Bentos. Las diferencias máximas son de unos 1.7m y ocurren, al igual que el escenario de caudales medios, ante caudales de unos $8000\text{m}^3/\text{s}$, siendo mayor a las diferencias durante caudales extremadamente elevados, del entorno de $25000\text{m}^3/\text{s}$. Este comportamiento es opuesto al obtenido en Fray Bentos, cuando a menores caudales se obtiene un mejor ajuste de los resultados.

Lo anterior se relaciona con la diferencia de la extensión de la inundación. En el caso de caudales altos extremos la inundación es completa en el tramo superior del río hasta

FIGURA 5.51: Inundación máxima del dominio para escenarios de caudales altos, etapa de calibración



Fray Bentos, mientras tanto, durante los caudales del entorno de los $8000\text{m}^3/\text{s}$, ocurre solo una inundación parcial del delta.

En cuanto al desfase temporal de las curvas de niveles en la sección de Paysandú en el tramo final de la serie, el mismo es de igual orden que en Fray Bentos.

5.9. Validación de resultados obtenidos

Una vez culminada la etapa de calibración y una vez seleccionada la configuración óptima para continuar los estudios, se da lugar a la validación del modelo.

Esta etapa consiste en someter el modelo seleccionado a diferentes condiciones de borde y analizar su comportamiento frente a éstas. En este sentido, se utilizan períodos temporales para caudales bajos, medios y elevados, análogamente a la fase de calibración, los cuales fueron los presentados en el subcapítulo "Períodos de simulación".

Si bien a continuación se focaliza en los resultados obtenidos en Fray Bentos, más información de los resultados en Paysandú se presenta en el Anexo B.

5.9.1. Resultados para períodos seleccionados

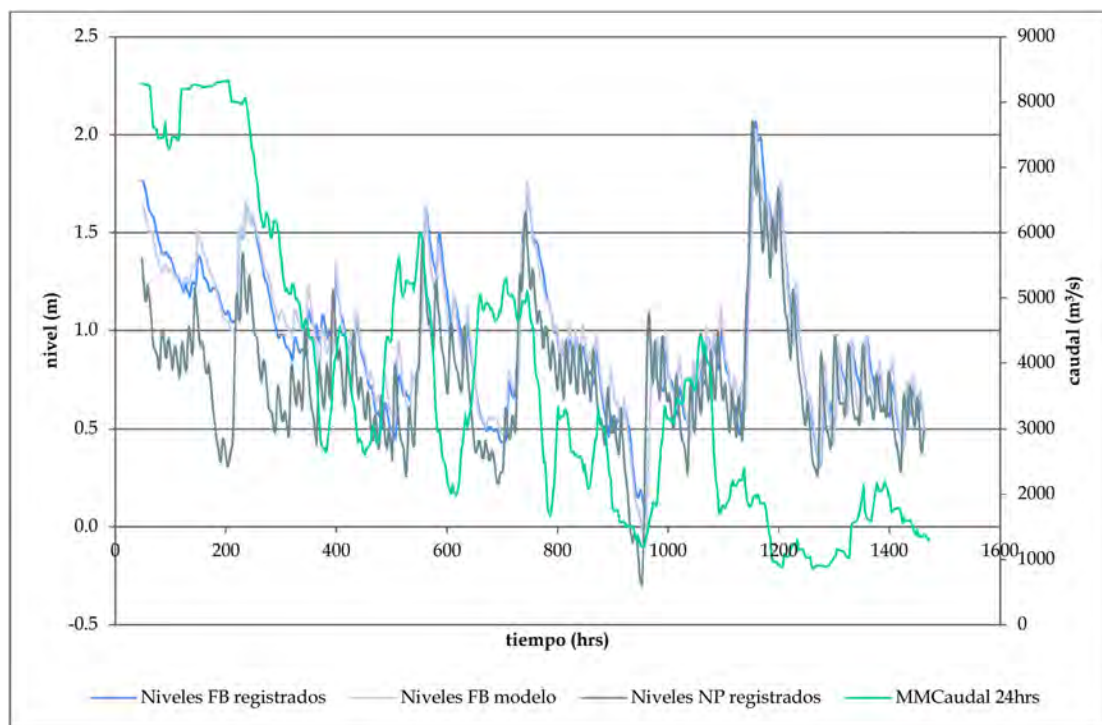
5.9.1.1. Situación caudales bajos

Para el análisis de validez del modelo se seleccionó el período comprendido entre 22/9/10 hasta el 21/11/2010, el cual se corresponde inicialmente con grandes caudales erogados de la Represa Salto Grande (en el entorno de los $8000\text{m}^3/\text{s}$ en términos de media móvil de

ventana temporal 24 horas) para luego ir disminuyendo a lo largo de la serie, presentando igualmente algunos períodos breves de caudales elevados aunque de menor magnitud que el primero (Figuras 5.52 y 5.54).

Esto trae consigo diferencias en la evolución de los niveles observados en la sección de Fray Bentos y Paysandú. En este último, la influencia de la condición de niveles impuesta en Nueva Palmira es perceptible en la faja temporal final del período simulado, a partir de la hora 1150 aproximadamente. El modelo, si bien reproduce mayores niveles respecto a los datos reales debido a la escueta sección transversal con que cuenta por no considerar planicies laterales en dicha zona, logra reproducir adecuadamente la evolución de la curva real de niveles. Las diferencias entre ambas curvas de nivel varían según la magnitud del caudal de escurrimiento del sistema, variando desde 2 metros (caudales elevados) hasta pocos centímetros en momentos que domina el forzante de aguas abajo. Por lo tanto, en la sección de Paysandú, la configuración seleccionada no reproduce de forma adecuada el comportamiento de los registros para caudales del sistema dominantes (superiores a unos $3000\text{m}^3/\text{s}$).

FIGURA 5.52: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos, etapa de validación



A diferencia de la sección de Paysandú, Fray Bentos presenta una clara dependencia de las condiciones de aguas abajo a lo largo de todo el período simulado, ocasionando un correcto y cercano continuo acompañamiento de la curva de niveles respecto a la condición de frontera inferior. La Figura 5.52 permite inferir lo anterior, y la Tabla

5.19 indica la relación entre los resultados obtenidos por el modelo y la curva real de mediciones, ambos en la sección de Fray Bentos.

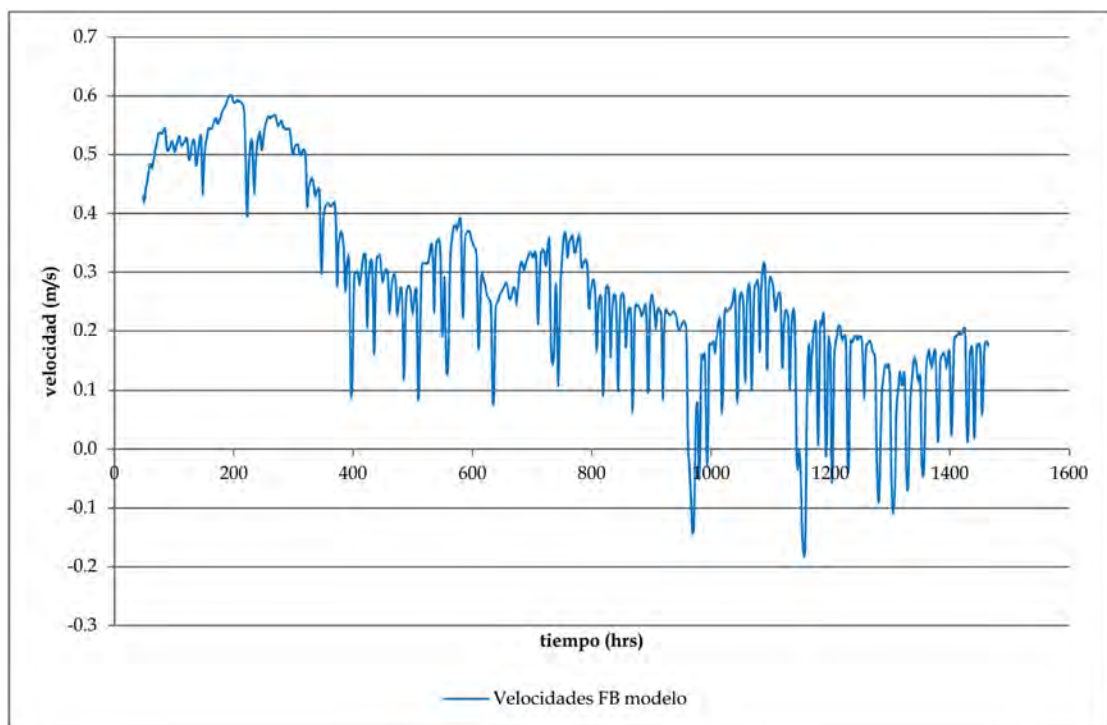
A partir de dicha tabla, junto con ambas figuras, es posible asumir que al igual que el escenario de caudales bajos en la etapa de calibración, los resultados del modelo para la configuración batimétrica seleccionada son adecuados.

TABLA 5.19: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales bajos, etapa de validación

Coefficiente de Correlación	0.977
Diferencia Promedio (m)	0.064
Diferencia Máxima (m)	0.240

La dependencia mencionada ocasiona algunos eventos de inversión de flujo, representados en la Figura 5.53 en términos de velocidades y en la Figura 5.54 en términos de caudales, para el caso de la sección de Fray Bentos, aunque significativamente menos frecuentes que en el escenario de caudales bajos considerado en la fase de calibración.

FIGURA 5.53: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos, etapa de validación



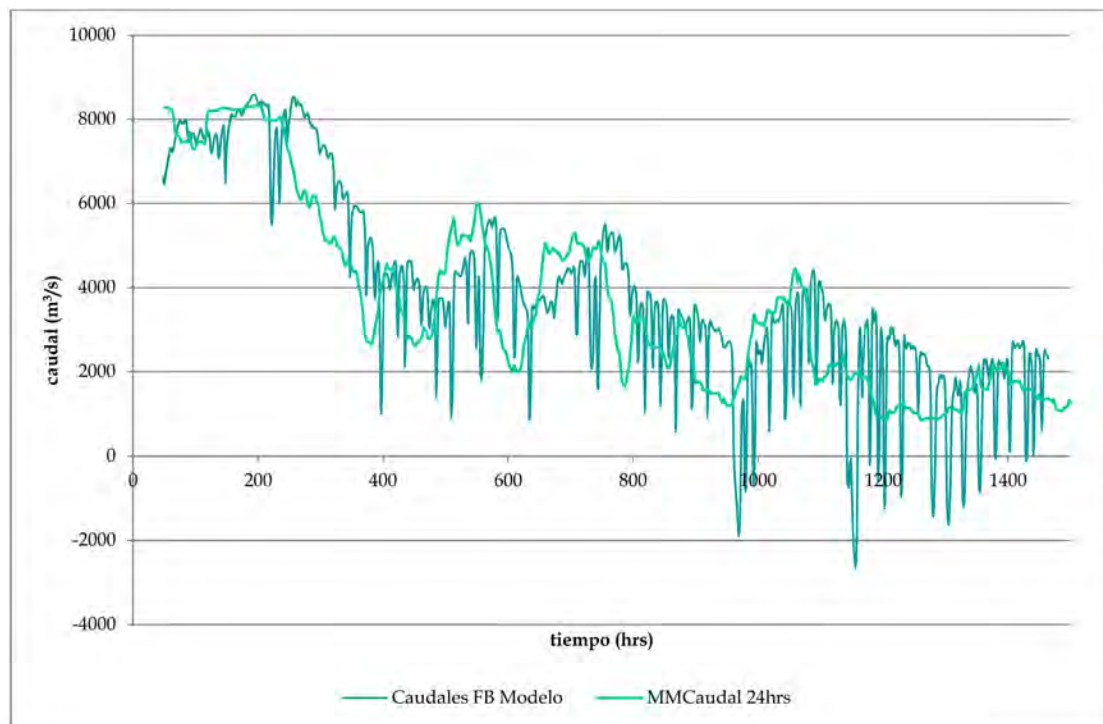
Las velocidades desarrolladas para los eventos de inversión pueden alcanzar valores de hasta casi 0.18m/s y duración de hasta 17 horas.

Asociado a los dos eventos de inversión que más se destacan en la Figura 5.53, en los que ocurren mayores velocidades de inversión en la sección de Fray Bentos, ocurren

eventos de inversión también en la sección de Paysandú, aunque breves y con pequeñas velocidades negativas. La primera se mantiene por un lapso de 2 horas con velocidades de 0.017m/s, y la segunda por 3 horas con velocidades 0.033m/s.

Por tanto, los caudales de inversión también son menores que para el caso de la serie de caudales bajos utilizada en la etapa de calibración, según se esquematiza en la Figura 5.54.

FIGURA 5.54: Caudales en Fray Bentos para condiciones de caudales bajos, etapa de validación



5.9.1.2. Situación caudales medios

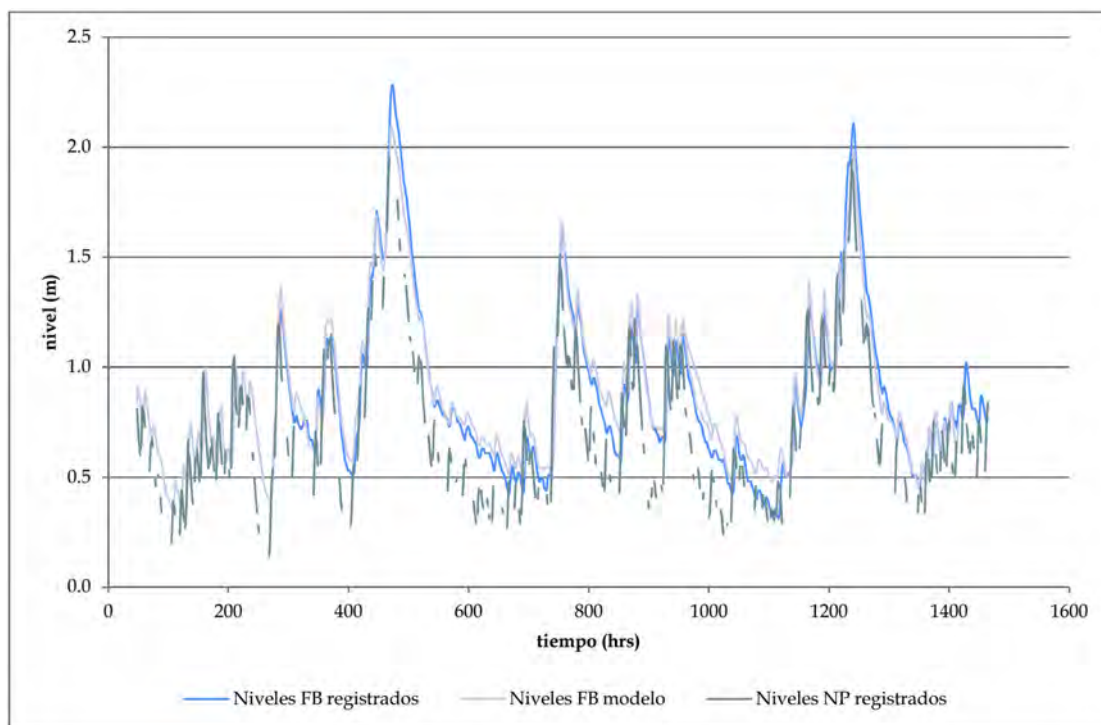
El escenario aquí considerado, limitado por las fechas 1/06/2008-31/07/2008, dispone mayoritariamente de caudales medios, y los niveles en la frontera inferior del dominio, en Nueva Palmira, llegan a superar los 2 metros respecto al cero del modelo.

Eso conlleva que en los niveles en la sección de Fray Bentos se observe una dependencia de lo que ocurre en dicha frontera, como muestra la Figura 5.55, y por ende, se obtienen buenos índices de correlación en la sección considerada entre la curva real de registros y la curva conformada por niveles del modelo, como lo indica la Tabla 5.20. Se recuerda que hasta las primeras 285hrs no son consideradas en el análisis por su inconsistencia (Capítulo 3).

TABLA 5.20: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales medios, etapa de validación

Coefficiente de Correlación	0.984
Diferencia Promedio (m)	0.067
Diferencia Máxima (m)	0.274

FIGURA 5.55: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de validación



También esto repercute en la dinámica del río, ocasionando inversiones temporales de flujo de forma más frecuente que en el escenario expuesto previamente. Las velocidades de inversión en la sección de Fray Bentos, pueden ser de hasta 0.14m/s (ocurrida en la hora 211 de la serie, a las 19 horas del día 9/06/2008). En cambio, en sentido normal de flujo, las velocidades en la sección de Fray Bentos pueden alcanzar los 0.44m/s. La Figura 5.56 evidencia dicho rango de velocidades.

Para el evento de máxima velocidad de inversión, la misma no alcanza la sección de Paysandú, sino que culmina en el punto medio aproximadamente entre las localidades de San Javier y Nuevo Berlín. La Figura 5.57 esquematiza dicho evento en la zona del *Martillo*, en el que ocurren velocidades negativas de mayor magnitud que en el escenario de caudales medios considerado para la etapa de calibración, pues en el caso último las velocidades alcanzaron como máximo 0.08m/s cuando ahora alcanzan 0.14m/s.

En la Figura 5.58 se indican los caudales instantáneos en la sección Fray Bentos, cuyos

FIGURA 5.56: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de validación

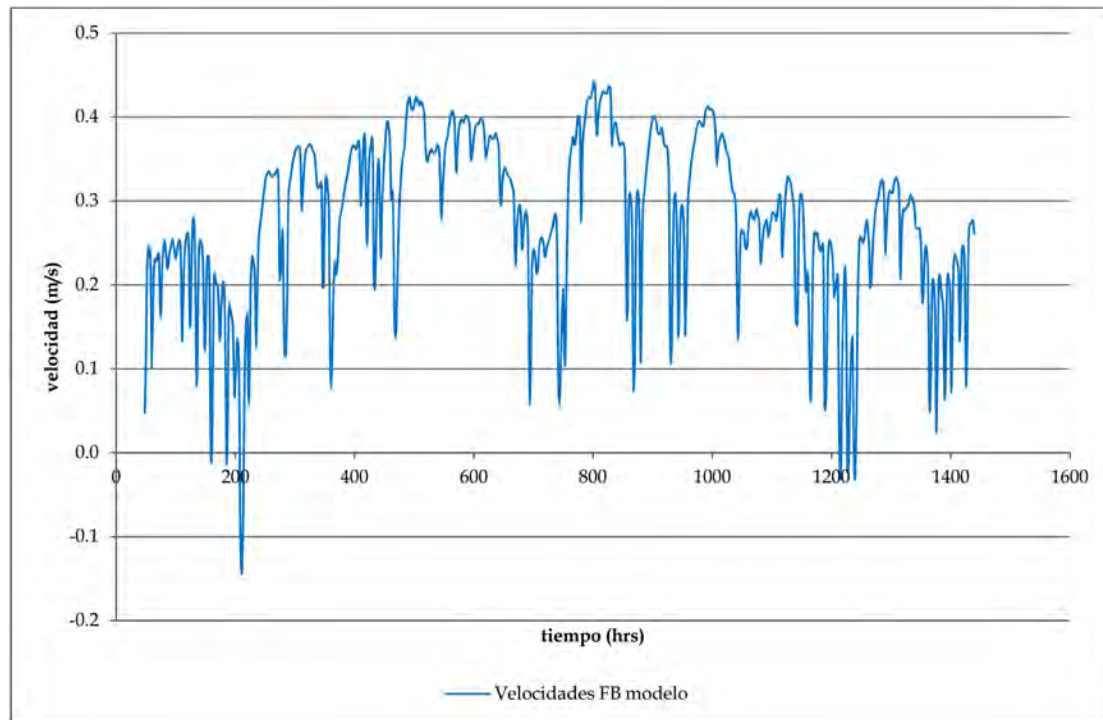
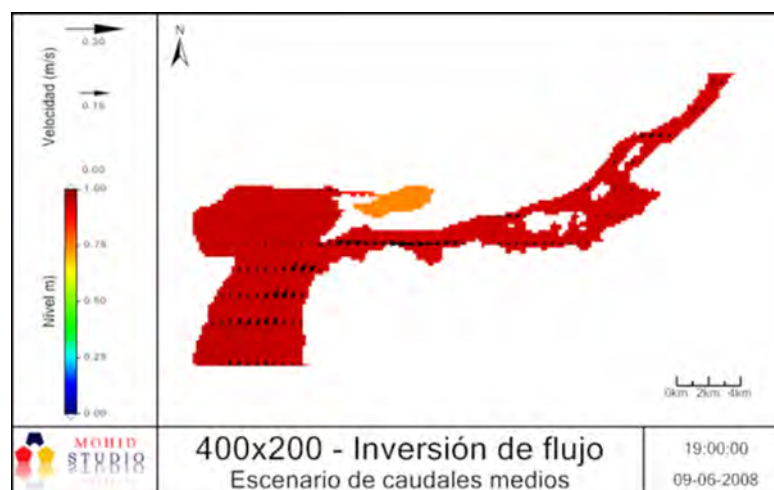
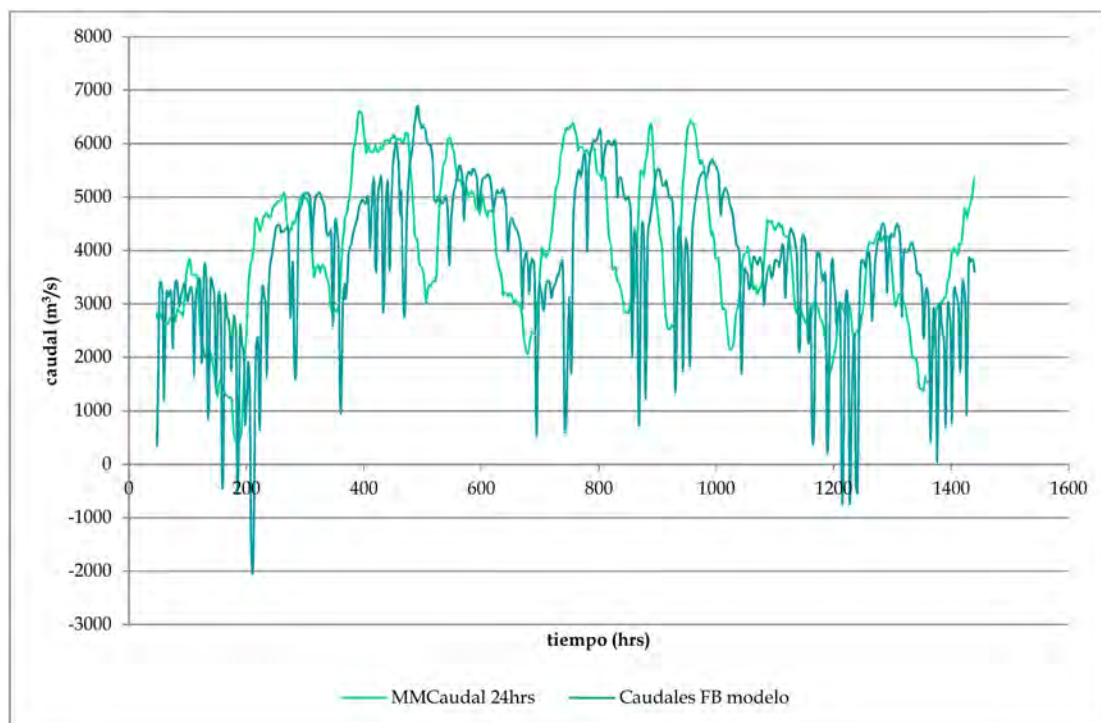


FIGURA 5.57: Máxima inversión de flujo en escenario de caudales medios, zona del Martillo, etapa de validación



valores negativos coinciden con los de la serie de velocidades (Figura 5.56), indicando la inexistencia de inversiones parciales en dicha sección.

FIGURA 5.58: Caudales en Fray Bentos para condiciones de caudales medios, etapa de validación



En cuanto a Paysandú, se obtiene el mismo comportamiento que el escenario de caudales medios para la etapa de calibración: mejor ajuste ante dominancia de marea y mayores diferencias a mayor caudal de aporte, durante dominancia de éste.

5.9.1.3. Situación caudales altos

Al igual que para el escenario de caudales altos de la etapa de calibración, en esta situación no se registran eventos de inversión, alcanzando en cambio altos valores de niveles principalmente aguas arriba de Fray Bentos. Esto puede visualizarse en la Figura 5.59 para el caso de la sección de Fray Bentos, y en el Anexo B para el caso de Paysandú. Cabe señalarse que la serie de registros en Fray Bentos cuenta con importantes vacíos, dificultando el análisis con respecto al ajuste de resultados de niveles a ésta.

En el caso de la sección Fray Bentos, si bien los niveles calculados y medidos se pueden diferenciar como máximo en casi 50cms para los caudales más elevados, se detecta un crecimiento en las diferencias a medida que incrementa el caudal descargado en Salto Grande. También es importante el comportamiento de las curvas de registros y resultados del modelo a lo largo del tiempo, particularmente en el tramo final de la serie a partir de

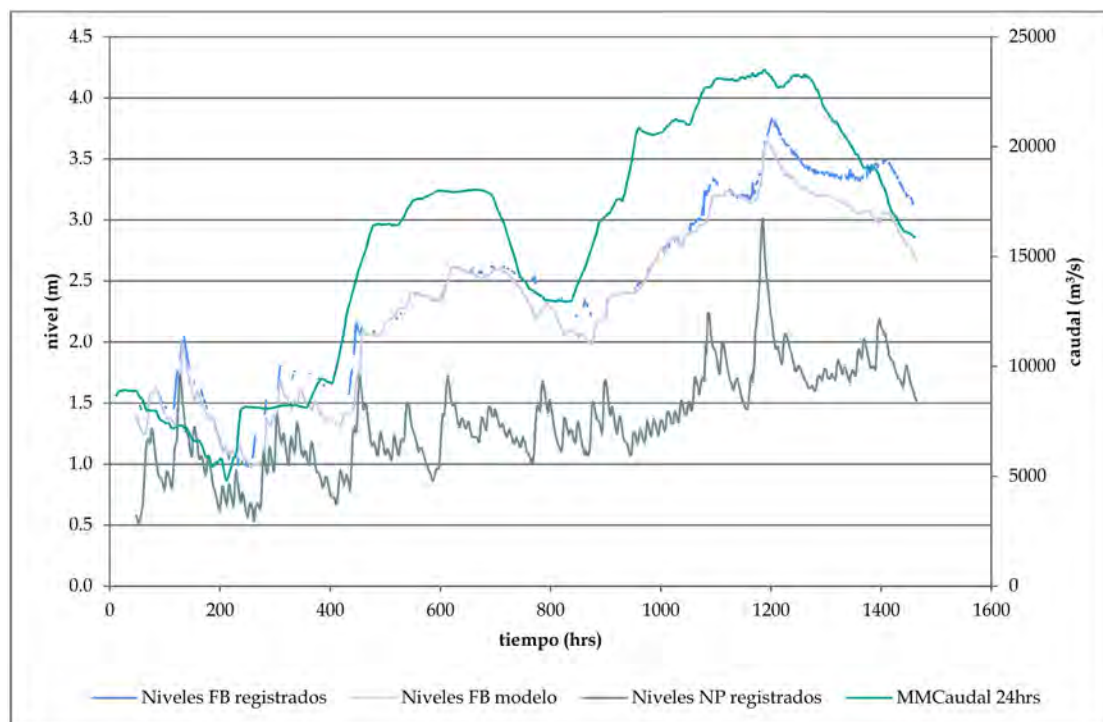
la hora 1100. Los mismos son contradictorios, observándose tanto anteposiciones como postergaciones respecto a los datos reales, aunque en ambos casos los desfases son menores que los máximos identificados para el escenario de caudales altos de la etapa de calibración. Mientras que en este último eran de 20 y 40 horas, en el actual caso los máximos son del orden de 10 y 12 horas.

Por otra parte, para el caso de la sección de Paysandú, la curva de niveles presenta mayor distancia en sus valores calculados respecto a la curva de datos reales, aunque ambas se encuentran más sincronizadas que el caso de Fray Bentos. Adicionalmente, la diferencia de nivel entre ambas curvas tiende a disminuir mientras que se avanza en la serie temporal, al igual que en el escenario de caudales altos para la etapa de calibración. En cuanto al desfase temporal, la curva de nivel obtenida por el modelo en general antecede a la curva real, siendo las diferencias temporales máximas de igual orden que las identificadas en la sección Fray Bentos.

TABLA 5.21: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Fray Bentos para caudales altos, etapa de validación

Coefficiente de Correlación	0.984
Diferencia Promedio (m)	0.155
Diferencia Máxima (m)	0.480

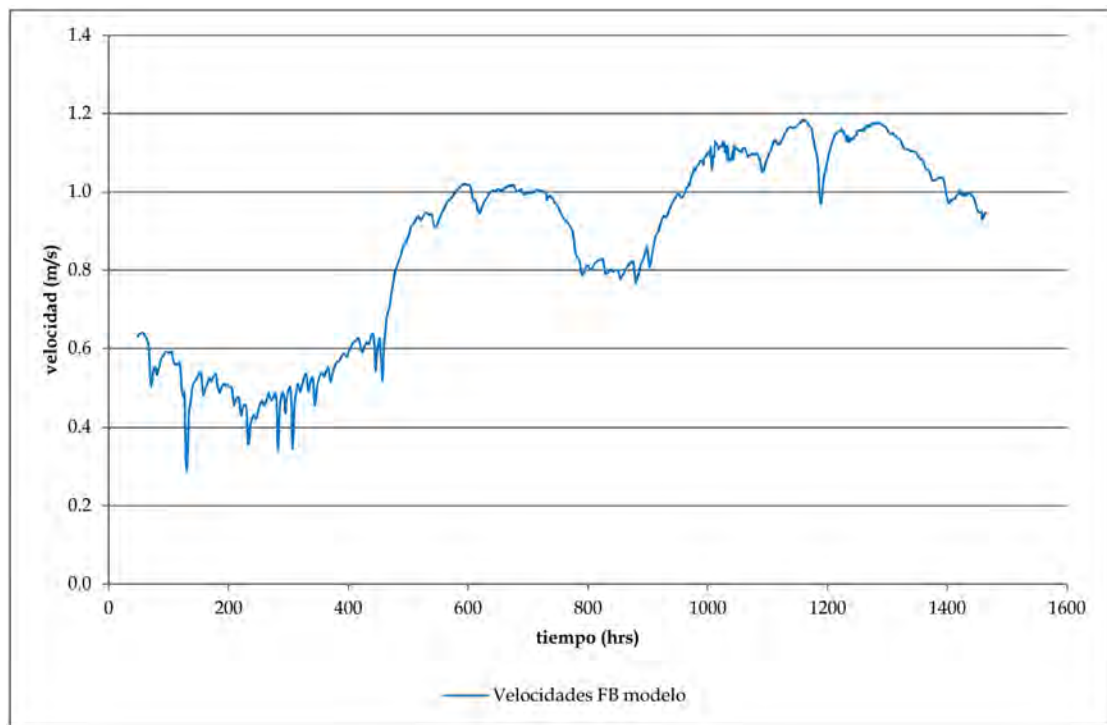
FIGURA 5.59: Niveles en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de validación



Sin perjuicio de lo anterior, se obtiene buena relación entre la serie de niveles obtenida en Fray Bentos y la de datos reales, como lo indica la Tabla 5.21.

En cuanto a las velocidades, éstas adoptan valores inclusive superiores a 1m/s en la zona de UPM. Los valores obtenidos en la sección Fray Bentos se indican en la Figura 5.60.

FIGURA 5.60: Velocidades en Fray Bentos para condiciones de caudales altos, etapa de validación



5.10. Conclusiones finales

La configuración seleccionada del modelo reproduce adecuadamente el comportamiento del río tanto para los escenarios de caudales bajos, como también los de medios en la zona de Fray Bentos.

A diferencia de los casos anteriores, para el escenario de caudales altos el modelo no produce resultados satisfactorios en dicha zona.

Considerando los objetivos del presente estudio, los cuales radican en el transporte de contaminantes, se entiende que el escenario más comprometido sería el de caudales bajos debido a que a igual cantidad de contaminante su concentración será mayor y en consecuencia de mayor afectación. Por lo tanto, los resultados no tan buenos para el escenario de caudales altos son relativamente de menor significancia que los resultados

satisfactorios obtenidos para caudales bajos y medios. En este contexto, se continúa el trabajo con el énfasis en estos dos escenarios.

Sin embargo, se aclara que al momento de referirse a resultados satisfactorios debe considerarse que son favorables considerando los insumos de información de datos reales que se cuenta en este trabajo. Wagner y Mueller (2002) han demostrado que el ajuste de un modelo hidrodinámico a datos de niveles no necesariamente refleja adecuadamente el campo de velocidades. Esto último es importante ya que el transporte de sustancias es intensamente dependiente de dicho campo, por lo que sería conveniente efectuar a futuro una validación adicional del modelo con registros de velocidades en el río.

Por lo antes expuesto, la configuración del modelo validada se utiliza como plataforma hidrodinámica para el siguiente capítulo a modo de estudiar el transporte de sustancias. Debido a que esta configuración cuenta con una resolución relativamente gruesa para un análisis más detallado de la evolución de las partículas en la zona de la planta UPM, se configura un modelo encajado de mayor resolución como se describe en la siguiente sección.

5.11. Modelo encajado Padre-Hijo

Como fue anticipado anteriormente, a modo de efectuar un análisis más detallado y preciso en la zona focal del presente trabajo se implementan modelos encajados, herramienta que dispone MOHID, donde con un enfoque “downscaling” se dispone de un dominio de mayor escala (denominado “Padre”) y otro de menor escala (denominado “Hijo”) el cual está inmerso en el anterior.

El modelo mayor se ejecuta de forma independiente del menor, siendo los resultados obtenidos insumo para las condiciones de borde y el interior del dominio hijo.

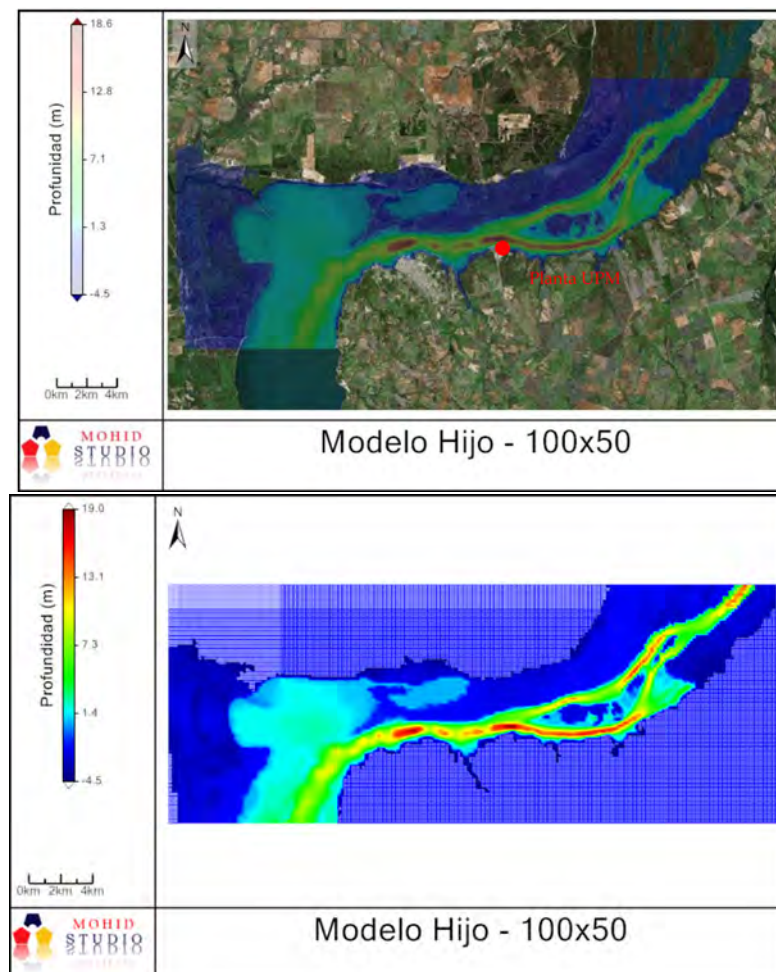
En el caso que aplica aquí, el submodelo Hijo se encuentra totalmente incluido en el dominio Padre (esto no es obligatorio para que el modelo funcione, sino que sí se encuentre totalmente incluida la frontera abierta), y con él se pretende obtener una mejor definición en una zona seleccionada, sin ser necesario incrementar el costo computacional a todo el modelo. Para este caso, el submodelo brinda mayor información en donde UPM efectúa la descarga de sus efluentes y en la zona de influencia de esta descarga.

Al igual que el modelo Padre, el submodelo Hijo también adopta una configuración de malla rectangular de tipo variable pero con tamaño de celdas menores con lado de 50 y 100 metros, ubicadas las más pequeñas en las inmediaciones de la descarga de la planta. La orientación del modelo Hijo debe ser la misma que la del modelo Padre, y además se

debe mantener un ratio en cuanto al tamaño horizontal de celdas que van de 1:3 a 1:5, para modelos 3D y 2D respectivamente.

En la Figura 5.61 se esquematiza el modelo Hijo, en la que se observa una distancia prudente entre la planta UPM (indicado como punto color rojo) y ambas fronteras (superior e inferior) del dominio.

FIGURA 5.61: Profundidades (arriba) y grilla (abajo) del Modelo Hijo



Este submodelo cuenta con 237.456 celdas computables (entre 7 y 8 veces más que el dominio Padre), y los bordes del dominio se seleccionaron de modo de evitar zonas intermareales, con vacío y llenado de celdas. La batimetría de este submodelo se configura a partir del modelo Padre, efectuando una atenuación de diferencias con la herramienta “SmoothBathymNesting”. De esta forma se reduce la posibilidad de inestabilidades producidas por diferencias de información batimétrica en las fronteras Padre-Hijo.

Finalmente, se obtiene el modelo Hijo como una adecuada configuración de mayor resolución para el transporte de partículas en la zona de UPM. Con esta configuración, los resultados obtenidos durante el proceso de validación no se ven alterados y por lo tanto el modelo Hijo no altera la representatividad hidrodinámica del modelo en esa zona.

Capítulo 6

Modelación de Contaminantes

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan resultados del transporte de contaminantes descargados por la planta de celulosa UPM. Al no tener acceso a registros continuos de calidad del agua del río, se analiza cualitativamente el transporte de contaminantes.

Como fue mencionado en el Capítulo 2, un trazador conservativo implica que no reacciona con el ambiente, conservando su estado desde el vertido (Shook et al., 2004). Una sustancia pasiva dinámicamente no afecta las propiedades del agua ambiente ni su hidrodinámica (Fischer et al., 1979).

Previo al estudio de dispersión de contaminantes interesa conocer los tiempos de residencia característicos de la zona aledaña a la descarga. Tiempos de residencia han sido determinados en cursos lénticos y fluviales (Aikman III y Lanerolle, 2004, Blair y Atkinson, 1993, Braunschweig et al., 2003, Campuzano Guillén et al., 2004). Este parámetro es usualmente utilizado como indicador de cómo responden los cuerpos de agua a los usos que son efectuados por el hombre (Aikman III y Lanerolle, 2004), aunque Monsen et al. (2002) advierten que no hay una única escala temporal de transporte que pueda representar diferentes períodos temporales y ubicaciones, y tampoco todos los procesos de transporte.

Estudios han demostrado heterogeneidad en los cuerpos hídricos en cuanto al tiempo de residencia (Silva et al., 2013), con la presencia de zonas más quietas o “*muertas*”, debido a la dependencia de este parámetro con las características locales del cuerpo en cuestión (Aikman III y Lanerolle, 2004). Con ello, es posible identificar zonas en las que el tiempo de residencia es elevado, y en las que si un contaminante ingresa a la misma, en determinadas condiciones, puede alterar sus características y por lo tanto, afectar el

ecosistema del cuerpo de agua considerado. También Blair y Atkinson (1993) advierten que gran variabilidad de flujos por acción de operación de reguladores de caudales, como una represa, altera el tiempo de residencia del cauce, afectando también el transporte de contaminantes.

Para determinar valores índice de tiempos de residencia de la zona de interés, se utiliza el modelo hidrodinámico bidimensional ajustado previamente, configurando algunas herramientas adicionales.

El presente capítulo se focaliza en la zona aledaña a la planta UPM. La misma comprende el tramo del río delimitado por la descarga de UPM y, hacia aguas abajo, a la altura del Balneario Las Cañas. De esta forma se incluye también a la zona del *Martillo* y la laguna ubicada contigua a él. Se determinan tiempos de residencia en la zona de la descarga de efluentes líquidos de la planta UPM, así como un análisis cualitativo de la pluma de descarga de un trazador pasivo.

6.2. Tiempos de residencia

El tiempo de residencia cuantifica el tiempo que una porción de fluido permanece en una cierta región del dominio, por lo que puede utilizarse como indicador de escala temporal para evaluar el transporte de sustancias. El tiempo de residencia es un factor importante al momento de establecer niveles o umbrales de contaminación, concentraciones de nutrientes en un cuerpo de agua y sus efectos potenciales sobre los organismos del mismo (Aikman III y Lanerolle, 2004). Sin embargo, diversos términos de escalas temporales coexisten, y algunos son discordantes entre sí en cuanto a su determinación, por lo que es importante definir el concepto que se aplica en cada caso (Monsen et al., 2002, Wan et al., 2013).

En virtud de ello, Monsen et al. (2002) presentan las diferencias conceptuales e hipótesis de tres escalas temporales mayormente utilizadas: *flushing time*, edad y tiempo de residencia. La primera se refiere al ratio entre la cantidad inicial (volumen o masa) de un escalar y su velocidad de renovación en un volumen de control establecido (a caudal o flujo constante). Por su parte, la edad y tiempo de residencia son escalas temporales asociadas a parcelas, siendo la primera definida como el tiempo en que una parcela viaja desde una frontera a una ubicación definida dentro de un cuerpo de agua. En cambio, tiempo de residencia es el tiempo en que una parcela de agua permanece en un dominio antes de salir del mismo. Al igual que el concepto de edad, el tiempo de residencia depende de la ubicación del punto de interés dentro del dominio de control y del momento en que sucede la descarga. Sin embargo, los autores advierten que las magnitudes de estas

variables, en cuerpos de agua reales, dependen de las complejidades de los mismos, como puede ser la presencia de caudales no estacionarios, heterogeneidad espacial e influencia de marea.

Mientras que el concepto de *flushing time* es una medida integral del sistema, tanto edad como tiempo de residencia son medidas locales. Por ello, se realiza el abordaje de esta última variable, considerando la gran complejidad topográfica del río Uruguay, particularmente en la zona de UPM. Esto implica que diferentes tiempos de residencia se hallarán para el conjunto de zonas que conformen la zona de interés.

A efectos del presente estudio se define tiempo de residencia como el tiempo que se retiene una cierta porción de fluido en una región definida. Sin embargo, como advierten de Brauwere et al. (2010), existen situaciones en que el efecto de marea ocasiona el reingreso de partículas en el volumen de control establecido, diferenciando el tiempo definido como el cual demora la sustancia en abandonar el volumen de control en la primera vez, o como el tiempo que requiere la sustancia en abandonar el volumen de control considerando todos los reingresos. Las diferencias de estos conceptos son analizados más adelante con resultados de simulaciones del modelo para diferentes situaciones.

La metodología de determinar las escalas temporales ha sido diversa, abarcando desde lo más simple de pruebas experimentales de trazadores o colorantes, hasta la implementación de modelos numéricos de alta precisión. Aikman III y Lanerolle (2004) efectúan una revisión y análisis de las diferentes metodologías, destacando las grandes virtudes de la modelación. Pues, gracias a las elevadas resoluciones temporales y espaciales de los modelos, es posible obtener tiempos de residencia más precisos, determinarlos en zonas parciales del dominio, y también se pueden determinar los factores físicos que más influyen en sus magnitudes y distribución espacial.

Aquí se adopta la metodología implementada en Braunschweig et al. (2003) y Campuzano Guillén et al. (2004), estos últimos basados en los primeros. En ambos estudios se analizan estuarios con forzantes de marea y descarga de ríos, siendo el primero mayor al segundo. También Ascione Kenov et al. (2002) utiliza esta misma metodología, entre otros.

Dichos trabajos utilizan el módulo Lagrangiano del software MOHID, acoplado al modelo hidrodinámico, como el instrumento para determinar tiempos de residencia de diferentes áreas (Braunschweig et al., 2003) o en su totalidad del dominio del modelo (Campuzano Guillén et al., 2004). Campuzano Guillén et al. (2004) evalúa los resultados para dos escenarios difiriendo en el forzante del caudal descargado por el río.

Definiendo las zonas en las que se desea determinar los tiempos de residencia, se efectúan las simulaciones para escenarios de caudales bajos y medios. Para ello, se simulan tramos temporales de los escenarios de caudales medios y bajos utilizados en la etapa de calibración. Se contempla varios tramos al analizar los tiempos obtenidos y la eventual influencia del efecto de marea en las escalas temporales, advertido por Aikman III y Lanerolle (2004), de Brauwere et al. (2010), entre otros.

También se busca detectar diferencias en los tiempos de residencia de las zonas definidas debido a las condiciones de caudales de flujo. Se analizan resultados obtenidos tanto en situaciones que domina el forzante del caudal de aporte como el de marea, con sus eventos de inversión de flujo.

6.2.1. Descripción del módulo Lagrangiano

Se utiliza entonces el módulo Lagrangiano del modelo hidrodinámico MOHID, el cual considera el transporte de sustancias como partículas discretas. Dicho módulo concierne a un modelo de trazadores (*particle-tracking model*), en que a cada partícula se le determina su posición espacial (x, y, z) a lo largo del tiempo, siendo función del campo de velocidades y de los parámetros característicos de la turbulencia local (viscosidad turbulenta, longitud de mezcla, varianza de la velocidad turbulenta). A través de esta metodología, es posible simular dispersión de petróleo, procesos de calidad de agua y transporte de sedimentos. En función del parámetro que se desea analizar, son los módulos que interactúan con el Lagrangiano, y las propiedades que se asignan al trazador. En este caso se desea analizar un trazador conservativo por lo que no se le asigna ninguna propiedad especial.

El transporte de un trazador es analizado a través de un gran número de partículas, método de trazadores por *random walk*. Cada partícula se mueve con el campo de velocidades obtenido en la solución de las ecuaciones generales de flujo, al cual se le suma un desplazamiento randómico para simular dispersión. De esta forma se evita resolver la ecuación de transporte euleriana, obviando así difusión numérica y oscilaciones numéricas. Asimismo, en dominios con gran cantidad de celdas y con gran heterogeneidad, los tiempos de simulación son sensiblemente menores que utilizando método euleriano u otros (Salomon et al., 2006). También los Lagrangianos son capaces de simular altos gradientes. Sin embargo, su defecto radica en que no es posible tener un intercambio continuo con el ambiente (Osadchiev y Zavialov, 2013).

La metodología *random walk* determina el desplazamiento de la partícula, considerando que la velocidad instantánea es igual a la suma de la velocidad media con una velocidad aleatoria.

El desplazamiento temporal de la partícula se determina por medio de la Ecuación 6.1, siendo x la posición respecto a los ejes, y u_i la velocidad media de la partícula. Como las velocidades del modelo se corresponden con las caras verticales de las celdas, la velocidad media de la partícula es determinada por la Ecuación 6.2, donde u_x y u_{x+dx} son las velocidades de la celda en la que se encuentra, y dx_1 y dx_2 son las distancias entre la partícula y las caras de la celda a donde corresponden dichas velocidades.

$$x_i^{t+\Delta t} = x_i^t + \Delta t u_i^{t+\Delta t} \quad (6.1)$$

$$u_i = \frac{u_x dx_2 + u_{x+dx} dx_1}{dx_1 + dx_2} \quad (6.2)$$

El intervalo de tiempo (Δt) que una partícula demora en efectuar un desplazamiento aleatorio (Δs) se determina a partir de considerar una función estadística de distribución de partículas, según Allen (1982). Dicha función es de tipo binomial, teniendo el desplazamiento aleatorio la misma probabilidad de ser positivo o negativo. Para un período de tiempo t el número de desplazamiento aleatorios es $N = t/\Delta t$. Para números elevados de desplazamientos aleatorios, Δs sigue una distribución normal con varianza del desplazamiento σ y media nula, siendo σ determinado por la Ecuación 6.3.

$$\sigma^2 = \frac{t \Delta s^2}{\Delta t} \quad (6.3)$$

El método implementado en MOHID para calcular el Δt , es a partir de la relación de la longitud de mezcla y las condiciones locales de turbulencia, dada por la raíz cuadrada de la varianza de la velocidad turbulenta. La longitud de mezcla se adopta como el doble del tamaño de la malla (calculado por el módulo Turbulence).

$$\Delta t = \frac{L}{\sqrt{u'u'}} \quad (6.4)$$

La raíz cuadrada de la varianza de la velocidad turbulenta, o sea, su desviación estándar, se determina como la suma de dos términos: uno que es proporcional a la velocidad del flujo medio (con valores de a entre 0 y 1) y el segundo una constante de pequeño valor (Ecuación 6.5).

$$\sqrt{u'u'} = a \bar{u} + b \quad (6.5)$$

Los coeficientes *a* y *b* corresponden a las palabras llave del modelo VARVELHX (valor por defecto 0.2) y VARVELH (valor por defecto 0) para el plano horizontal, y VARVELVX (valor por defecto 0) y VARVEL (valor por defecto 0) para la dirección vertical. Los valores de estos coeficientes representan la difusión o “spreading” de las partículas en el fluido. Para un modelo bidimensional los coeficientes de la dirección vertical son nulos.

Si bien las ecuaciones antes presentadas representan el movimiento de mayor escala que el tamaño de la partícula, los vórtices de menor tamaño provocan la mezcla incrementando el volumen de la partícula y disminuyendo la concentración (Leitão, 2002). Esto se configura en el modelo por medio de las variables TVOL200 (tiempo que demora la partícula en duplicar su volumen) y VOLUME_INCREASE (la forma en que el incremento de volumen es calculado).

En el presente trabajo se consideran solamente el movimiento de las partículas según los vórtices mayores, ya que considerar mezcla de las partículas de trazador, reducirían la nube de puntos. Por lo tanto, al no considerarlas se está en una situación más exigente. También es posible considerar decaimiento bacteriano en el modelo y el método por el cual quiere determinarse, aunque esto no es considerado ya que se trata de un trazador conservativo.

Asimismo, en el modelo es posible considerar descargas instantáneas, continuas y accidentales, de forma puntual o zonal.

6.2.2. Metodología

Como fue anticipado anteriormente, se replica la metodología utilizada en Braunschweig et al. (2003) con el objetivo de determinar tiempos de residencia de diferentes áreas.

Para ello se definen boxes cuya función es liberar los trazadores Lagrangianos y cuantificar su volumen a lo largo del tiempo dentro de los mismos. A diferencia de Campuzano Guillén et al. (2004) que define un único box para el estuario, en el caso de Braunschweig et al. (2003) se divide el estuario en varios boxes, cubriendo la totalidad del mismo. Si bien el ingreso de caudales al sistema es constante en el tiempo, debido a la imposición de condición de marea, se obtienen caudales variables temporalmente en varios de los boxes. Por ello se definen los períodos a analizar en función del caudal instantáneo en la sección de Fray Bentos.

Ambos estudios antes citados observan que luego de un tiempo prolongado una pequeña porción de partículas quedan dentro del box, lo que desvirtúa el valor final obtenido de tiempo de residencia. Por ello, se establece el tiempo de residencia como el tiempo en que

el 95 % de las partículas necesitan para evacuar el box definido. En ambas situaciones se detecta que la fracción remanente de trazador dentro de los boxes en general se aproxima a una relación de tipo exponencial respecto al tiempo. A partir de los resultados obtenidos, se efectúa una regresión lineal con la que se determina el valor del tiempo de residencia para ambos escenarios considerados, y grado de ajuste con la determinación de R^2 según el método de mínimos cuadrados.

Por lo expuesto, en el presente análisis, se resuelve considerar los escenarios de caudales medios y bajos ya seleccionados para las etapas de calibración con la misma metodología que los trabajos antes citados. Estos escenarios se caracterizan por una mayor influencia de marea en la zona cercana a la planta UPM. Pues, la influencia de marea provoca perturbaciones en los caudales instantáneos en las inmediaciones de UPM, mientras que los caudales se encuentran en magnitudes bajas. A partir de los escenarios seleccionados, también es posible seleccionar trechos temporales en los que se mantiene el caudal aproximadamente constante en Fray Bentos, determinando a partir de los mismos valores de escalas temporales que contemplan variabilidad de niveles de frontera inferior pero no de caudales. Gracias a ello es posible efectuar una comparación entre los tiempos de residencia determinados para las diferentes situaciones de forzantes.

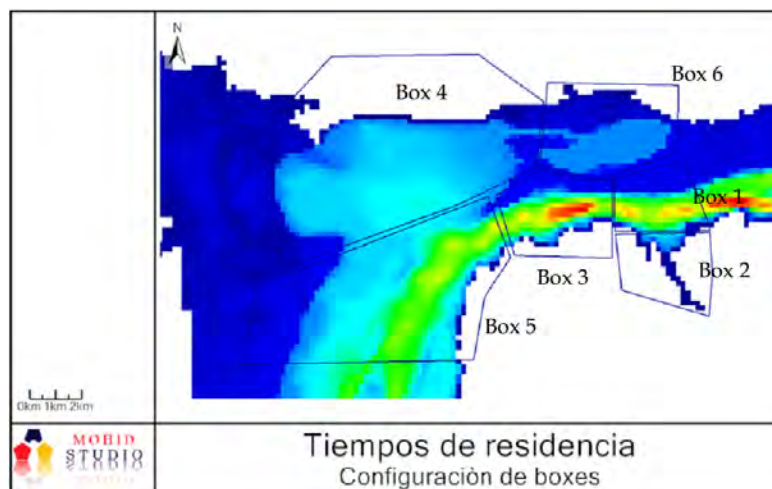
6.2.3. Configuración del modelo

Para determinar los tiempos de residencia característicos de la zona de interés (aledaña a la planta UPM), se divide el mismo en seis boxes según presenta la Figura 6.1, de acuerdo a las características locales que pueden diferenciar cada zona. El Box 1 incluye la descarga de efluentes de UPM y su zona inmediata de influencia. El Box 2 encierra la zona inmediata a la desembocadura del arroyo Yaguareté, comprendiendo la bahía de escasa profundidad y pequeñas velocidades, considerando lo advertido por Ecometrix (2006) en cuanto a que el fósforo y posiblemente coliformes superan valores aceptables.

El Box 3 se ubica entre la frontera oeste del Box 1 y la sección del río asociada a Fray Bentos. El Box 4 confina el área poco profunda del *Martillo*, zona que recibe los efluentes del río Gualaguaychú (bahía de Ñandubaysal). El Box 5 se encuentra delimitado por los boxes 3 y 4 y por la sección correspondiente al balneario Las Cañas del lado uruguayo. Por último, el Box 6 concierne al lago por la presencia de islas del lado argentino, previo a la desembocadura del río Gualaguaychú. Dicho lago conforma un apéndice del *Martillo*. Se recuerda, sin embargo, que la profundidad de dicho lago no es conocida, estableciéndose en la configuración seleccionada en el Capítulo 5 en un valor de 50cms por debajo del cero del modelo. Si bien el tiempo de residencia asociado

a este box contiene por lo tanto incertidumbre, se entiende que puede representar un comportamiento cualitativo.

FIGURA 6.1: Configuración de boxes para tiempos de residencia



En términos prácticos, la metodología para determinar los tiempos de residencia consiste en considerar en el instante inicial el volumen de cada box completamente lleno de partículas, en estado de reposo, como lo esquematiza la Figura 6.1. Luego, las mismas comienzan a dispersarse al someterse a la hidrodinámica del río, y los mismos boxes actúan como elementos de monitoreo, registrando la cantidad de partículas en los mismos a lo largo del tiempo. Si las partículas se encuentran con la frontera abierta, son eliminadas del dominio.

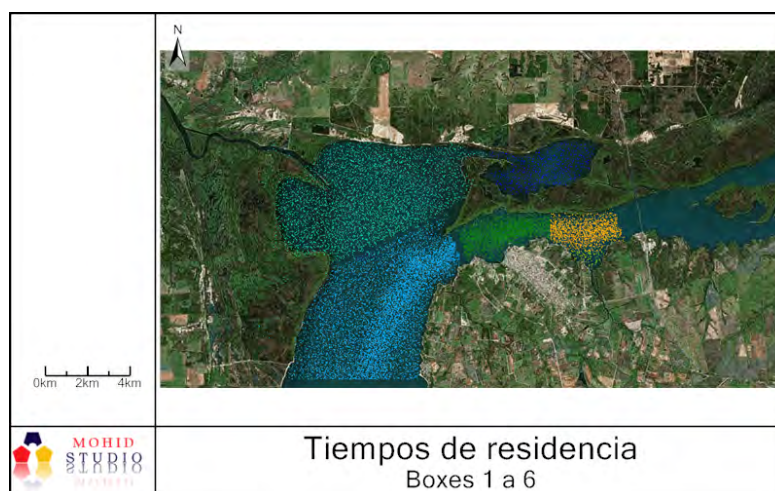
Los valores de los coeficientes de la desviación estándar de la velocidad turbulenta, $VARVELHX$ y $VALVELH$ se adoptaron en un comienzo con valores 0.02 y 0.03m/s respectivamente. El primer valor se estableció según bibliografía consultada (DRIFTER, 2010), y el segundo a modo de establecer un tiempo de residencia en zonas donde las velocidades son muy pequeñas. Debido a que son valores no calibrados, se complementa con un análisis de sensibilidad de estos parámetros. Debido a que en bibliografía el $VARVELH$ se desprecia o se impone valores muy pequeños, se considera un rango menor que el $VARVELHX$ (intensidad de turbulencia), variando entre 0.003 y 0.03m/s. En cambio, $VARVELHX$ varía en un rango de 0.002 y 0.2.

A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos para los diferentes escenarios.

6.2.4. Resultados

Se adopta como definición de tiempo de residencia, el tiempo que tarda la concentración del trazador reducirse al 5 % de su valor inicial, en cada box considerado. Una vez que se

FIGURA 6.2: Representación de partículas en boxes, estado inicial



alcanza dicho porcentaje, no se consideran los reingresos a los boxes. Se opta por dicho criterio porque en este tramo se cuenta con aproximadamente un comportamiento de decaimiento exponencial en gran cantidad de los boxes analizados.

A partir de los resultados obtenidos, se efectúa una regresión lineal para determinar el tiempo de residencia para ambos escenarios considerados, y su grado de ajuste. Se considera un ajuste adecuado a las configuraciones con R^2 mayor a 0.80.

A continuación, se encontrará abreviado tiempo de residencia como TR para alivianar la lectura.

6.2.4.1. Caudales medios

Del escenario de caudales medios de la etapa de calibración, se seleccionan tres lapsos temporales según la variabilidad de caudales en la sección de Fray Bentos: uno que incluye eventos de inversión de flujo (caso A, del 5/7 al 15/7 de 2007), otro que presenta valores aproximadamente constantes con un caudal promedio de unos $5000\text{m}^3/\text{s}$ (caso B, del 4/8 al 8/8 de 2007), y otro análogo al anterior pero con un caudal promedio de unos $7200\text{m}^3/\text{s}$ representando caudales medio-altos (caso C, del 4/8 al 8/8 de 2007). A diferencia del caso B y C, el caso A presenta valores de caudal variables, en un rango delimitado por -1425 y $4278\text{m}^3/\text{s}$.

En las Figuras 6.3 y 6.4 se presenta los caudales horarios en la sección de Fray Bentos y la variación de la fracción de trazadores que permanecen en los boxes 1 a 6 respectivamente, ambos para el caso A.

En el caso A, por presentar eventos de inversión de flujo en la sección de Fray Bentos, la pendiente de la fracción de volumen remanente muestra cambios de signo a lo largo

FIGURA 6.3: Caudales horarios en Fray Bentos para caso A

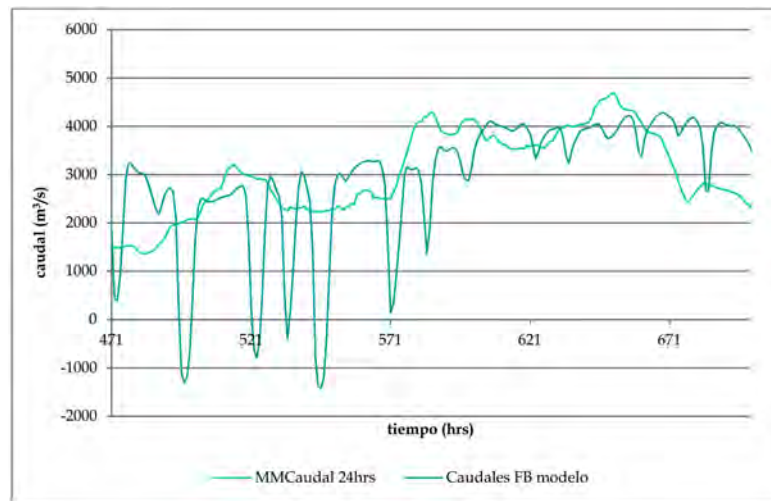
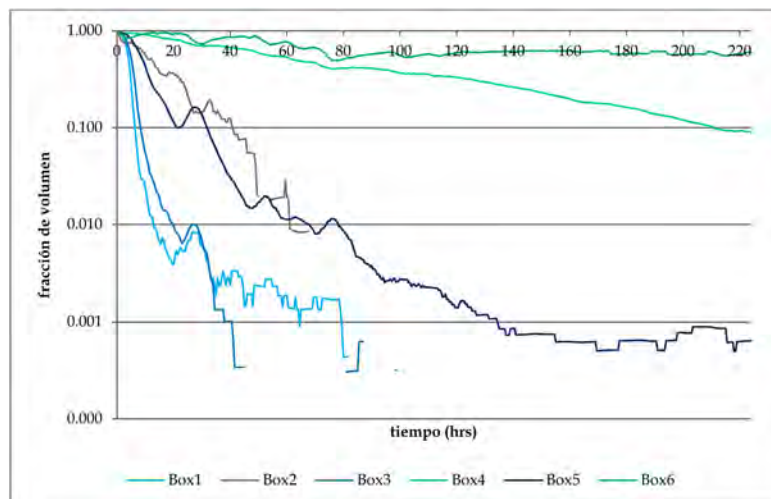


FIGURA 6.4: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para caso A



del tiempo, como lo esquematiza la Figura 6.4. La primera ocurrencia de inversión, a la hora 26 de la serie temporal (hora 497 de la serie completa de caudales medios), produce un incremento de la concentración total en los boxes 1, 3 y 5, los cuales se ubican comprendidos en el cauce principal del río. Sin embargo, dicha inversión no produce alteraciones en el tiempo de residencia en los boxes 1 y 3 ya que en el instante en que ocurre se encuentra una proporción de trazador menor al 5 % del volumen total de los mismos. En cambio, en el box 5 sí se encuentra la inversión de flujo dentro del tiempo de residencia calculado.

Por el contrario, el box 2, como comprende una bahía, presenta fluctuaciones en la fracción remanente de trazadores a lo largo del tiempo debido a las fluctuaciones del campo de velocidades en el mismo. Ante la primera inversión de la serie temporal, sucede una disminución de las partículas ya que la inversión ocasiona que las mismas

sean desplazadas hacia aguas arriba y salgan de la bahía. Luego de finalizada la inversión, en general estas partículas vuelven a la bahía para luego irse en sentido normal del flujo.

En el caso del box 6, es el cual presenta mayor dificultad en la salida de sus partículas, permitiendo el ingreso de partículas desde la bahía de Ñandubaysal.

A partir de una regresión lineal de los datos obtenidos, se obtiene las ecuaciones de ajuste de tipo exponencial de las curvas de fracción de partículas dentro de los boxes, como lo presenta la Tabla 6.1. En los casos que se obtiene buenos ajustes (según valor de R^2), se determina el tiempo de residencia como el tiempo que demora el box en renovarse por nuevas partículas en un 95 %. En el caso del box 6, no es posible determinar un tiempo de residencia, pero se observa de la Figura 6.4 una tendencia a mantener la concentración de partículas remanentes prácticamente constante en un valor entre un 55 y 60 %.

TABLA 6.1: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, caso A

	Ecuación exponencial de ajuste	R^2	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -0.42x + \ln(1.7653)$	0.883	8.49
Box 2	$\ln(y) = -0.057x + \ln(0.9665)$	0.972	51.96
Box 3	$\ln(y) = -0.318x + \ln(1.7329)$	0.919	11.15
Box 4	$\ln(y) = -0.01x + \ln(1.0179)$	0.989	301.35
Box 5	$\ln(y) = -0.077x + \ln(0.9066)$	0.880	37.63
Box 6	$\ln(y) = -0.002x + \ln(0.8165)$	0.535	-

Ahora, si en vez de considerar caudales variables en el tiempo, se consideran caudales más o menos constantes de $5000\text{m}^3/\text{s}$ y $7200\text{m}^3/\text{s}$ en las proximidades de Fray Bentos, se observan curvas de pendientes más pronunciadas que el caso anterior (observar que las series temporales del caso A, B y C difieren en su extensión, siendo mayores en el caso A) como lo esquematiza las Figuras 6.6 y 6.8. Las Tablas 6.2 y 6.3, que presentan los tiempos de residencia obtenidos para el caso B y C respectivamente, reflejan que en general los valores son menores que los obtenidos en el caso A.

TABLA 6.2: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, caso B

	Ecuación exponencial de ajuste	R^2	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -1.06x + \ln(1.3457)$	0.966	3.11
Box 2	$\ln(y) = -0.069x + \ln(0.7485)$	0.96	39.22
Box 3	$\ln(y) = -0.717x + \ln(1.3479)$	0.974	4.59
Box 4	$\ln(y) = -0.018x + \ln(0.9402)$	0.99	163
Box 5	$\ln(y) = -0.222x + \ln(1.1903)$	0.995	14.28
Box 6	$\ln(y) = -0.001x + \ln(0.9626)$	0.550	-

Como era de esperarse, en el caso C, debido a mayores caudales, se obtienen menores tiempos de residencia en los boxes ubicados en el cauce principal del río: los boxes 1, 3 y 5. También la zona bahía del Martillo muestra una disminución en su tiempo de residencia

FIGURA 6.5: Caudales horarios en Fray Bentos para caso B

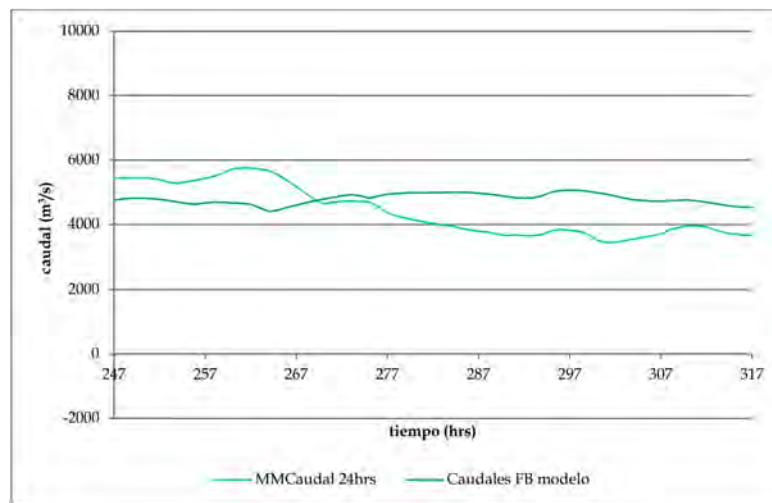
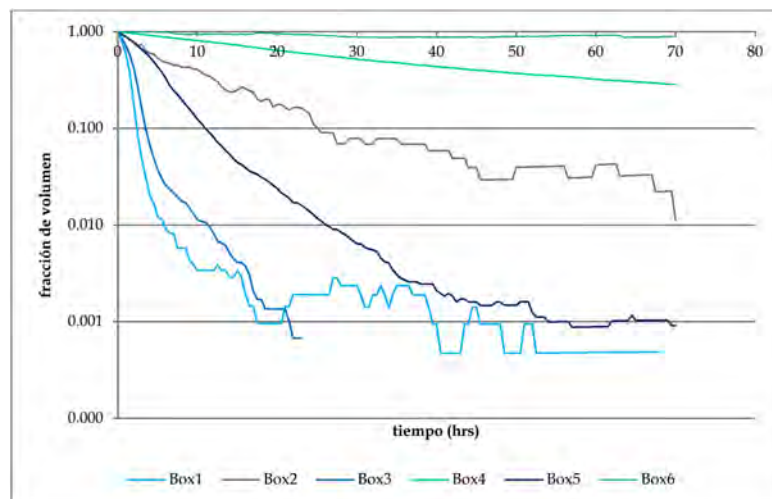


FIGURA 6.6: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para caso B



respecto al caso antes mostrado. En cambio, la bahía del arroyo Yaguareté expresa un incremento en su tiempo de residencia. Esto indica que al haber un mayor gradiente entre las velocidades del cauce y las velocidades en esta bahía, provoca mayor dificultad a las partículas en salir.

Por último, la laguna contigua a esta bahía, presenta una curva de fracción remanente de partículas prácticamente constante y coincidente con un valor del 100 %. Este comportamiento es similar al caso anterior, en donde la misma curva muestra un valor aproximado a un 90 %. Sin embargo, ambos casos distan del caso A antes presentado, en que los valores rondan el 55 y 60 %. Esto indica que eventos de inversión favorecen el intercambio de fluido entre la laguna y el exterior.

A partir de un análisis general de los tres casos presentados, los boxes 1 y 3, ubicados ambos aguas arriba de Fray Bentos, presentan los menores tiempos de residencia. Vale

FIGURA 6.7: Caudales horarios en Fray Bentos para caso C

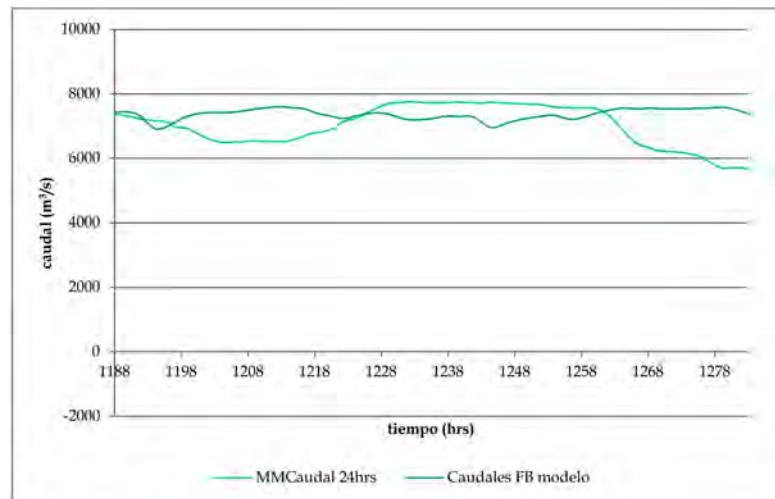


FIGURA 6.8: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para caso C

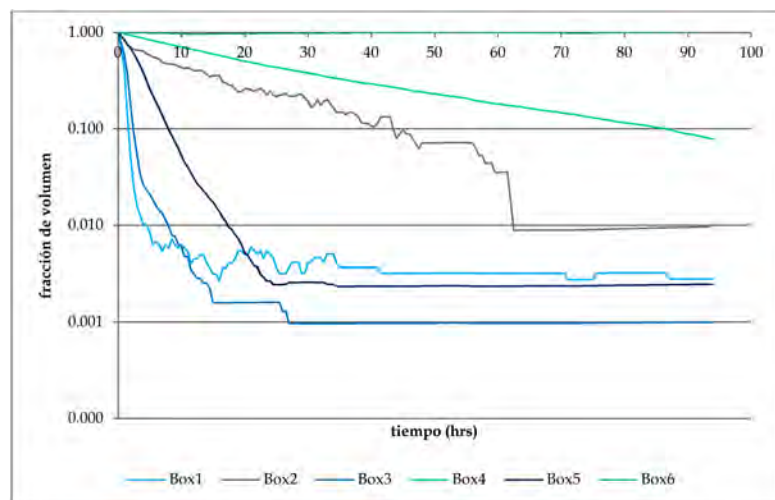


TABLA 6.3: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, caso C

	Ecuación exponencial de ajuste	R^2	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -1.538x + \ln(1.3256)$	0.955	2.13
Box 2	$\ln(y) = -0.045x + \ln(0.7132)$	0.978	59.06
Box 3	$\ln(y) = -1.02x + \ln(1.3015)$	0.972	3.2
Box 4	$\ln(y) = -0.026x + \ln(0.8677)$	0.995	109.76
Box 5	$\ln(y) = -0.307x + \ln(1.1936)$	0.995	10.33
Box 6	$\ln(y) = 0.0003x + \ln(0.9738)$	0.497	-

recordar que ambos conciernen una sección de flujo más confinada que el resto de los boxes, y por lo tanto, velocidades mayores ante un mismo caudal. El comportamiento del box 5 se ubica cercano a los boxes 1 y 3, aunque a diferencia de estos últimos, puede sufrir alteraciones en su tiempo de residencia debido a ocurrencias de inversión de flujo.

Por último, en la Figura 6.9 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos para los casos A, B y C; en la parte superior se compara los valores de tiempos de residencia y en la parte inferior los R^2 obtenidos en las líneas de tendencia. A partir de las mismas, se puede observar que los boxes 1, 3 y 5 se encuentran expuestos a las condiciones de flujo: las inversiones de flujo del caso A ocasionan que las partículas demoren más en salir del box. Sin embargo, en los tres casos ocurre que la ocurrencia de inversiones de flujo repercute en el ajuste de la curva de la fracción remanente de partículas respecto al tiempo, ocasionando una reducción en el valor de R^2 . El box 5 es el cual presente mayor afectación.

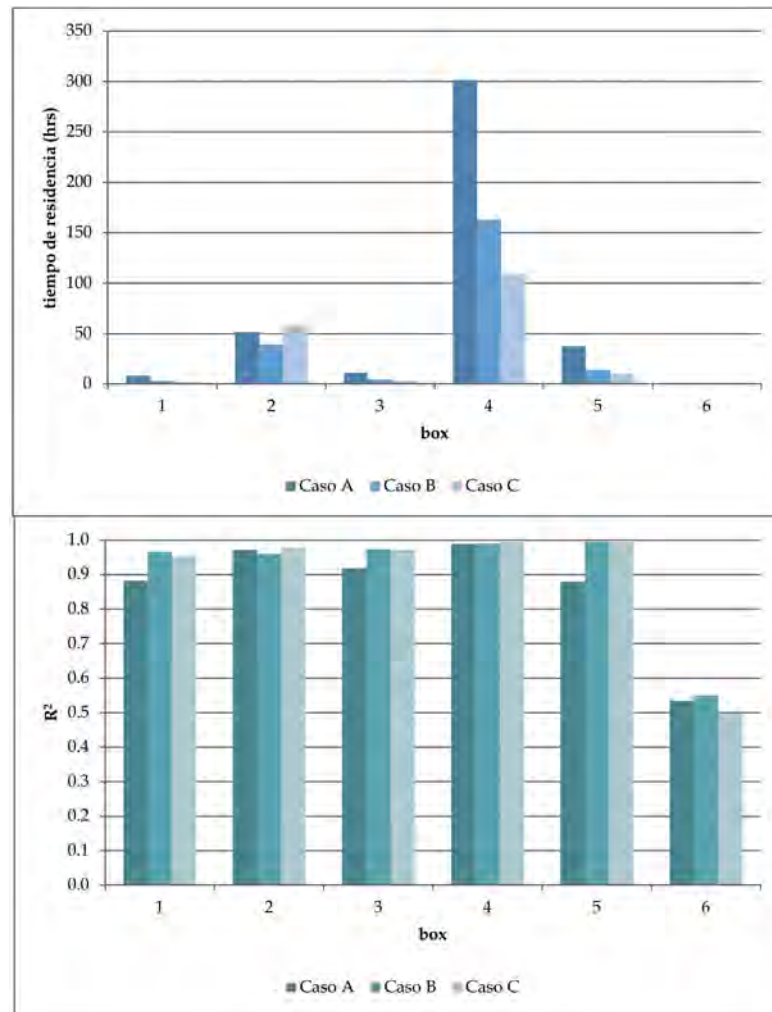
Similar a estos tres boxes, el box 4 correspondiente a la zona del Martillo presenta dependencia de las condiciones de flujo, pero de forma sensiblemente mayor. Los tiempos de residencia de los casos B y C pueden ser duplicados o superados aún más al someterse a eventos de inversión de flujo, como lo representa el caso A.

En el caso del box 2, correspondiente a la bahía del arroyo Yaguareté, se obtienen menores diferencias para los casos A, B y C que los obtenidos para el box 4. Por lo tanto, este último presenta mayor sensibilidad ante cambios en la hidrodinámica del río.

En la Figura 6.10 se presenta un conjunto de imágenes, las cuales representan las partículas emitidas por cada uno de los boxes para determinados tiempos de las series analizadas. Se presentan los casos A y B, sin incluir el caso C siendo este último considerado similar al caso B. Los tiempos son de 2, 5, 10, 25 y 50 horas de cada una de las series. En la misma es posible observar las diferencias en el transporte de las partículas anteriormente mencionadas. Además, es posible observar las diferencias en la mezcla de las partículas procedentes de diferentes boxes. Se ilustra que eventos de inversión favorecen el efecto de mezcla (observar las imágenes correspondientes a las 25 horas), y dificulta la salida de las partículas.

Por último, para estos tres casos también se determina un tiempo de residencia de todo el dominio, considerado como un único box. Debido a la gran heterogeneidad del dominio, y por lo tanto, la disparidad entre los tiempos de residencia ya presentados, el tiempo de residencia del dominio considerado como un único box resulta en valores entre los máximos y mínimos determinados para cada caso. Los mismos ascienden a 228 (R^2 de 0.961), 97 (R^2 de 0.889) y 95 (R^2 de 0.896) horas para los casos A, B y C respectivamente.

FIGURA 6.9: Comparación de tiempos de residencia (superior) y R^2 (inferior) de los casos A, B y C

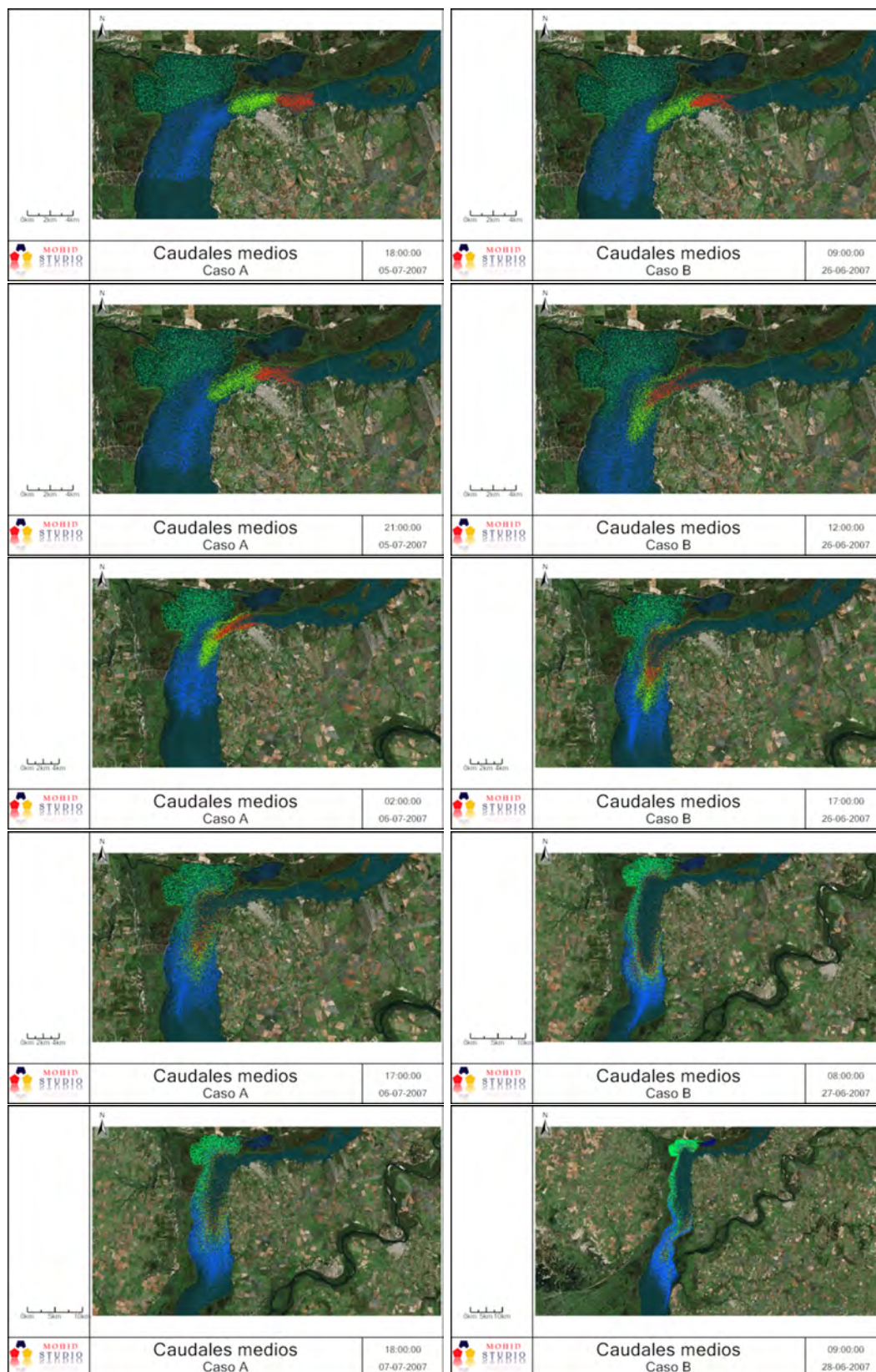


Para el caso A, en que sucede inversión de flujo, la curva del sistema se encuentra más cercana a las curvas de los boxes 4 y 6.

6.2.4.2. Caudales bajos

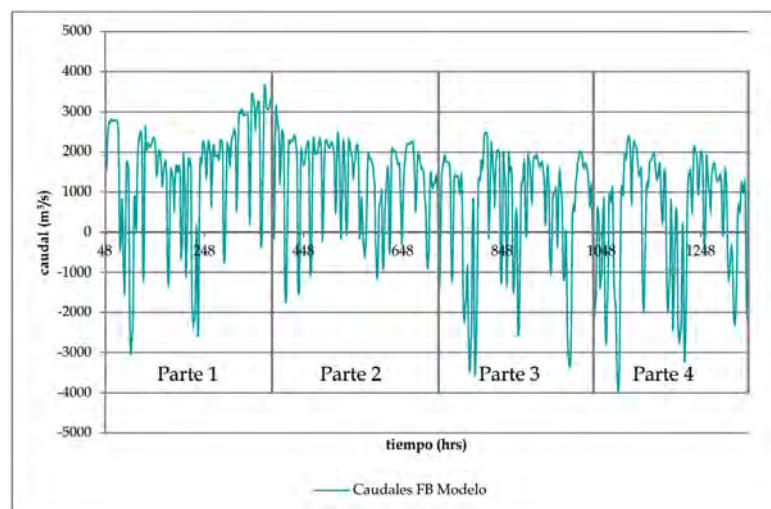
Se analizan los tiempos de residencia para el escenario de caudales bajos de la etapa de calibración. Se utiliza el período prácticamente en su totalidad, desde el 9 de febrero al 2 de abril inclusive del año 2008. Se divide la serie en 4 partes prácticamente iguales: parte 1 (9 al 23 febrero, comienza a la hora 48 de la serie completa), parte 2 (24/2 al 8 de marzo, comienza a la hora 384 de la serie completa), parte 3 (8 al 20 de marzo, comienza a la hora 720) y parte 4 (20 de marzo al 2 de abril, comienza a la hora 1032). Según mencionado en capítulos anteriores, las partes 3 y 4 corresponden a un caudal promedio de la Represa de $400\text{m}^3/\text{s}$.

FIGURA 6.10: Esquematización del flujo de partículas para los casos A (izquierda) y B (derecha) a iguales tiempos de las series



En la Figura 6.11 se presenta la serie temporal de caudales horarios, indicando las partes temporales consideradas. En la Figura 6.12 se presenta la variación del volumen de trazador en los boxes a lo largo del tiempo. En la Tabla 6.4 se indican los valores obtenidos de tiempos de residencia.

FIGURA 6.11: Series temporales de caudales bajos: partes 1, 2, 3 y 4



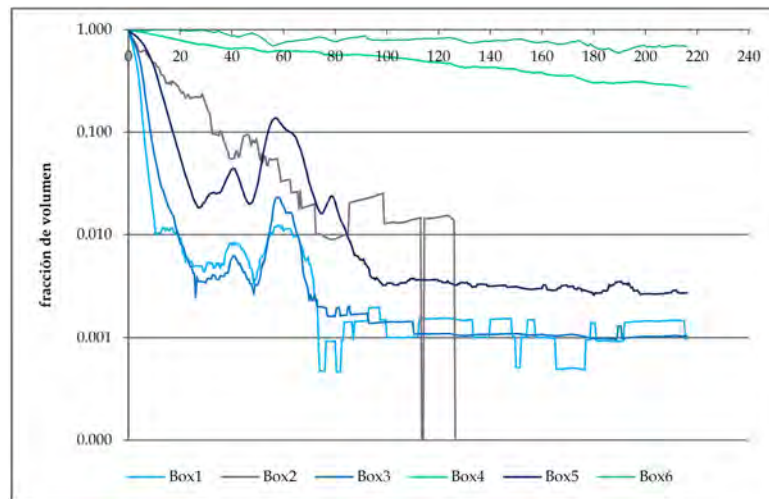
Para la primera parte de la serie, el comportamiento de los tiempos de residencia se asemeja a los arrojados en el caso A de los caudales medios, particularmente en los boxes 1 a 3. En el resto de los boxes suceden situaciones diferentes. Para el caso del box 4 se incrementa el tiempo de residencia en un 90 % respecto el caso A. En el caso del box 5, el tiempo de residencia es inferior para este caso en el que la influencia de la condición de aguas abajo es mayor. Sin embargo, también se observa que si se considerara el tiempo en el que demora el box en renovarse considerando los reintegros de flujo, éste es sensiblemente mayor que el caso de inversión del escenario de caudales medios analizado previamente (caso A).

TABLA 6.4: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 1 de caudales bajos

	Ecuación exponencial de ajuste	R ²	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -0.429x + \ln(1.4138)$	0.957	7.79
Box 2	$\ln(y) = -0.055x + \ln(0.7994)$	0.933	50.4
Box 3	$\ln(y) = -0.296x + \ln(1.4132)$	0.963	11.29
Box 4	$\ln(y) = -0.005x + \ln(0.8866)$	0.982	575.07
Box 5	$\ln(y) = -0.151x + \ln(1.501)$	0.958	20.77
Box 6	$\ln(y) = -0.002x + \ln(0.9652)$	0.754	-

La segunda parte de la serie temporal de caudales bajos presenta leve afectación por parte de los niveles impuestos en la condición de aguas abajo. La Tabla 6.5 menciona los tiempos de residencia obtenidos para los 6 boxes, y la Figura 6.13 indica las curvas de

FIGURA 6.12: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 1 de caudales bajos



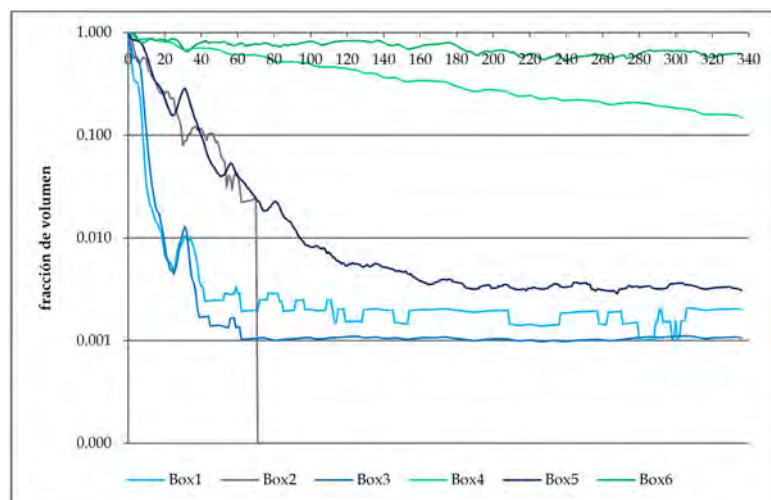
fracción remanente de partículas en ellos. Únicamente el box 5 presenta una leve inversión en el flujo de partículas hacia afuera del mismo, dentro de su tiempo de residencia. En el caso de los boxes 1 y 3, si bien se observa también repercusión por efectos de inversión de flujo, ésta sucede posteriormente a la salida del 95 % de las partículas, por lo que no afecta su valor de tiempo de residencia.

TABLA 6.5: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 2 de caudales bajos

	Ecuación exponencial de ajuste	R ²	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -0.429x + \ln(1.4138)$	0.919	11.03
Box 2	$\ln(y) = -0.055x + \ln(0.7994)$	0.924	54.44
Box 3	$\ln(y) = -0.296x + \ln(1.4132)$	0.882	13.73
Box 4	$\ln(y) = -0.005x + \ln(0.8866)$	0.985	563.61
Box 5	$\ln(y) = -0.151x + \ln(1.501)$	0.898	51.80
Box 6	$\ln(y) = -0.002x + \ln(0.9652)$	0.667	-

Por último, las partes tres y cuatro de la serie temporal, ambas se ubican en el tramo final de la serie en donde la Represa descarga un valor muy bajo de caudal (promedio 400m³/s), por lo que la influencia de aguas abajo cobra mayor importancia. El comportamiento de las partículas en ambas situaciones es similar aunque presentando igualmente algunas diferencias. Estas diferencias se deben a la magnitud de los niveles de frontera en Nueva Palmira, repercutiendo en diferentes caudales de inversión. Las Tablas 6.6 y 6.7, y las Figuras 6.14 y 6.15, muestran los resultados obtenidos de tiempos de residencia y curvas de fracción remanente de partículas en los boxes para las partes 3 y 4 respectivamente.

FIGURA 6.13: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 2 de caudales bajos



En la parte 4 de la serie, la descarga de partículas para la determinación del tiempo de residencia coincide con el desarrollo de una inversión de flujo. Dicha inversión es la primera de tres consecutivas, con un período de ocurrencia de 12 horas (nótese que es coincidente con la frecuencia de marea astronómica del Río de la Plata). La magnitud de los caudales máximos de dichas inversiones corresponden, en orden cronológico, a unos 2100 (hora 2 de la serie), 2800 (hora 14 de la serie) y casi 4000m³/s (hora 26 de la serie) respectivamente, los tres medidos en la sección de Fray Bentos. El corto plazo que existe entre el momento de la descarga y la siguiente inversión, dificulta la salida de las partículas, mostrando una oscilación en la concentración de las mismas a lo largo del tiempo (6.15). Aproximadamente durante las horas 80 y 100 de esta parte, se presenta un marcado regreso de partículas a los boxes, particularmente los situados a lo largo del canal, boxes 1, 3 y 5. Este reintegro se debe a una gran inversión de flujo, presentando un caudal negativo de unos 2000m³/s en Fray Bentos.

En la parte 3, los tres primeros caudales de inversión son de menor magnitud que los de la parte 4 y ocurren de forma más espaciada. Se materializan en unos 1400 (hora 2 de la serie), 1200 (hora 27 de la serie) y 2250m³/s (hora 52 de la serie), en la sección de Fray Bentos. Luego ocurren dos inversiones de 3500m³/s, en las horas 62 y 73 de la serie.

En ambos casos, los boxes ubicados a lo largo de la sección principal del río, los boxes 1, 3 y 5, se encuentran menos ajustados a una curva exponencial, respecto a los casos presentados anteriormente. Particularmente en el caso de la parte 4 de la serie temporal, se marca una oscilación más acentuada ya que las inversiones son más intensas y suceden más próximas al momento de la descarga. A diferencia de los boxes 1 y 5, en el box 3 sí es posible determinar un tiempo de residencia con un buen ajuste, cuyos valores, tanto en la parte 3 como 4, superan ampliamente el valor obtenido en el tramo temporal de

inversión de flujo de caudales medios (caso A) de unas 11 horas. En el caso de la parte 3, el tiempo de residencia es de unas 26 horas, y en la parte 4 supera las 37 horas (6.14).

Los boxes con altos tiempos de residencia, boxes 2, 4 y 6, muestran algunas diferencias entre estas dos configuraciones, y también con los casos antes presentados. En la parte 4 de la serie temporal, las curvas de los boxes 4 y 6 se encuentran menos recostadas sobre el eje de las x que en la parte 3 para tiempos elevados. Esto significa que una mayor cantidad de eventos de inversión de flujo en general colabora en la salida de partículas. Sin embargo, los tiempos de residencia de estos boxes muestran una diferencia sustancial respecto a las partes 1 y 2, asociados a mayores caudales.

En el caso del box 2, el incremento de inversiones entre la parte 4 respecto a la parte 3, implica una disminución de un 17% en su tiempo de residencia. En la parte 3, dicho box, no establece variaciones en la tendencia de la curva de fracción remanente, como sucede en la parte 4, aunque sensiblemente en menor medida que los boxes ubicados en el cauce principal.

Al ocurrir las inversiones de flujo, las Figuras 6.14 y 6.15 muestran una disminución en la fracción remanente de partículas en los boxes 4 y 6 mientras que en los boxes del canal se incrementa. Esto sucede porque los eventos de inversión favorecen la mezcla entre ellos. Esto es, partículas de la bahía ingresan a la laguna, y viceversa.

TABLA 6.6: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 3 de caudales bajos

	Ecuación exponencial de ajuste	R^2	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -0.151x + \ln(1.5112)$	0.764	-
Box 2	$\ln(y) = -0.052x + \ln(0.7318)$	0.975	51.61
Box 3	$\ln(y) = -0.133x + \ln(1.6576)$	0.84	26.32
Box 4	$\ln(y) = -0.003x + \ln(0.8579)$	0.954	947.49
Box 5	$\ln(y) = -0.012x + \ln(0.6332)$	0.574	-
Box 6	$\ln(y) = -0.002x + \ln(0.7483)$	0.481	-

TABLA 6.7: Resultados de análisis de regresión lineal para los boxes, parte 4 de caudales bajos

	Ecuación exponencial de ajuste	R^2	TR (hrs)
Box 1	$\ln(y) = -0.086x + \ln(0.4933)$	0.636	-
Box 2	$\ln(y) = -0.06x + \ln(0.6558)$	0.943	42.9
Box 3	$\ln(y) = -0.074x + \ln(0.7819)$	0.816	37.16
Box 4	$\ln(y) = -0.003x + \ln(0.7743)$	0.884	913.31
Box 5	$\ln(y) = -0.038x + \ln(0.9463)$	0.718	-
Box 6	$\ln(y) = -0.002x + \ln(0.5821)$	0.605	-

FIGURA 6.14: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 3 de caudales bajos

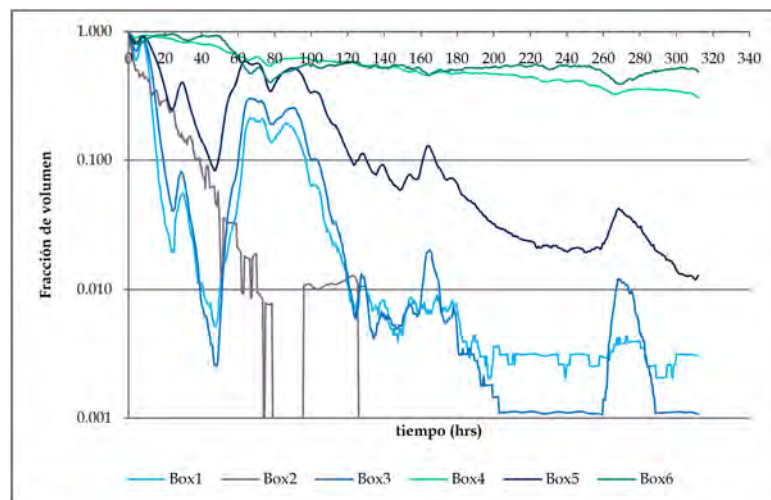
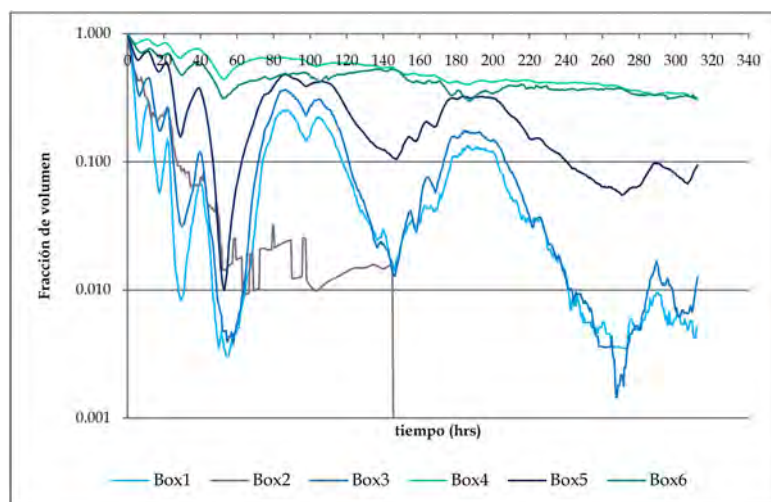


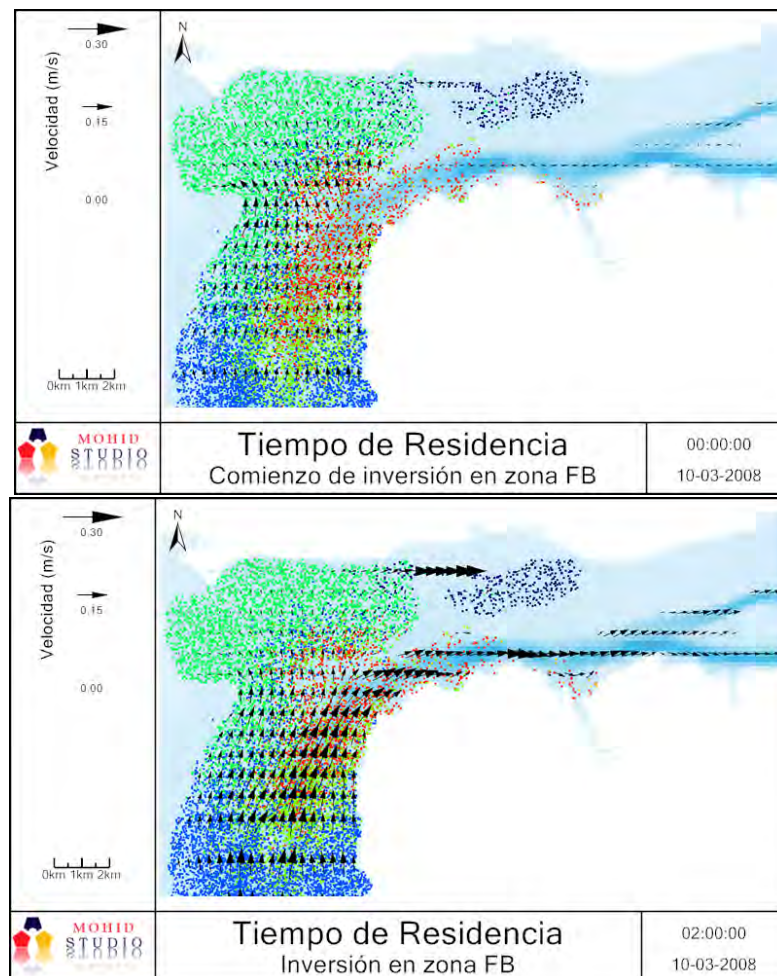
FIGURA 6.15: Curvas de fracción remanente de partículas en boxes para la parte 4 de caudales bajos



Como conclusión, se observa que en general las inversiones favorecen la mezcla transversal, y por lo tanto, la mezcla de partículas de diferentes boxes. Los boxes ubicados a lo largo del canal principal son más sensibles a los cambios hidrodinámicos, debido a que las velocidades de flujo en el mismo son mayores que en las bahías. Entonces, inversiones pueden ocasionar un mayor desplazamiento a lo largo del río, ocasionando mayores alteraciones en la renovación del fluido. Por ejemplo, si se observa la curva de fracción remanente de volumen del box 3 de la Figura 6.15, aproximadamente entre las horas 55 y 82 se incrementa de un 0.5 % a un 35 %. En cambio, en el box 4 entre las horas 52 a 81 aumenta de 45 % a 64 %. La diferencia de los comienzos de ambos incrementos se debe al desarrollo desfasado de la inversión: primero sucede en la bahía para luego invertir las velocidades en el canal del Martillo hacia aguas arriba. En los primeros momentos en que la inversión se establece las velocidades negativas en el canal son menores a las

de las zonas someras del Martillo, incluyendo la bahía, y luego las velocidades del canal se acentúan y resultan mayores a las de las zonas someras y la bahía del *Martillo*. Se presenta en la Figura 6.16 lo predicho.

FIGURA 6.16: Comportamiento de partículas ante evento de inversión, parte 3



Por otra parte, se observa que las partículas que salen del box 4 durante sentido normal del flujo, las mismas transitan recostadas contra el margen izquierdo del río.

6.2.4.3. Análisis de sensibilidad

Considerando que los parámetros VARVELHX y VARVELH suelen ser ajustados por medio de mediciones de concentraciones en campo, en el presente análisis se complementa con un análisis de sensibilidad ante variación de ambos ya que no es posible ajustarlos con datos reales. Por lo tanto, se varían en órdenes ambos coeficientes y se comparan los resultados con los antes presentados (la configuración de referencia se denomina en esta sección como Caso F).

En la Figura 6.17 se presenta los resultados de tiempos de residencia para los boxes 1, 2, 3 y 5, para los casos según Tabla 6.8. El período temporal simulado fue al correspondiente caso B de la subsección anterior, correspondiente a un período de caudales aproximadamente constantes del entorno de $5000\text{m}^3/\text{s}$. Si bien se entiende que en situaciones de caudales bajos, con mayor presencia de inversiones de flujo, serían de mayor interés, debido a que los mismos dificultan la determinación cuantitativa de los tiempos de residencia para varios boxes, se selecciona el período antes mencionado.

TABLA 6.8: Configuraciones del modelo según valores de coeficientes de difusión

	VARVELHX	VARVELH
Caso A	0.002	0
Caso B	0.02	0
Caso C	0.2	0
Caso D	0	0.003
Caso E	0	0.03
Caso F	0.02	0.03

Los resultados muestran que diferentes valores en los coeficientes VARVELHX y VARVELH pueden repercutir de forma desigual de acuerdo a las características del box. En los casos de los boxes 1, 3 y 5, los cuales se localizan sobre el cauce del río, variaciones de los coeficientes antes mencionados no implican una variación en los tiempos de residencia. El caso C presenta los valores más elevados para los boxes 3 y 5, siendo el valor del box 1 prácticamente igual a las otras configuraciones consideradas de coeficientes.

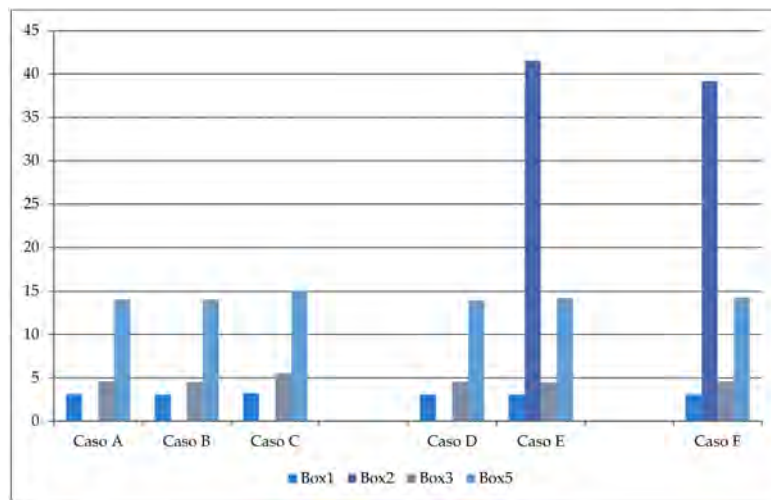
Diferente es el caso del box 2, el cual presenta comportamiento generalmente apartado de una función exponencial, por lo que en muchos casos, no es posible determinar un tiempo de residencia. La curva, luego de unas horas, adquiere una dirección prácticamente horizontal.

En el caso del box 2, debido a las bajas velocidades presentes en el mismo, variaciones en el parámetro VARVELHX no colaboran en la salida de las partículas. En cambio, el coeficiente VARVELH, debido a que es una constante que no se afecta por velocidades advectivas, mejora la aproximación de la curva de concentración remanente en el box con una curva exponencial, y por lo tanto, hace posible atribuirle un tiempo de residencia.

En el caso de los boxes 4 y 6, los mismos prácticamente no son sensibles ante cambios de los coeficientes de dispersión. En el caso del primero, se obtienen tiempos de residencia muy similares, entre 160 y 180hrs. En cuanto a la laguna, la curva para todos los casos permanece muy próxima al eje de las abscisas, manteniéndose la fracción de volumen remanente por encima del 88 %. Para los casos en que el parámetro VARVELH adquiere

valores de 0.03m/s (casos F y D), se observa en algunos momentos una diferencia de un 5 % respecto a los casos con valores menores. En dichos momentos, la fracción puede ser de 93 % cuando en las otras configuraciones es del 98 %.

FIGURA 6.17: Tiempos de residencia para los boxes 1, 2, 3 y 5 para diferentes coeficientes de difusión

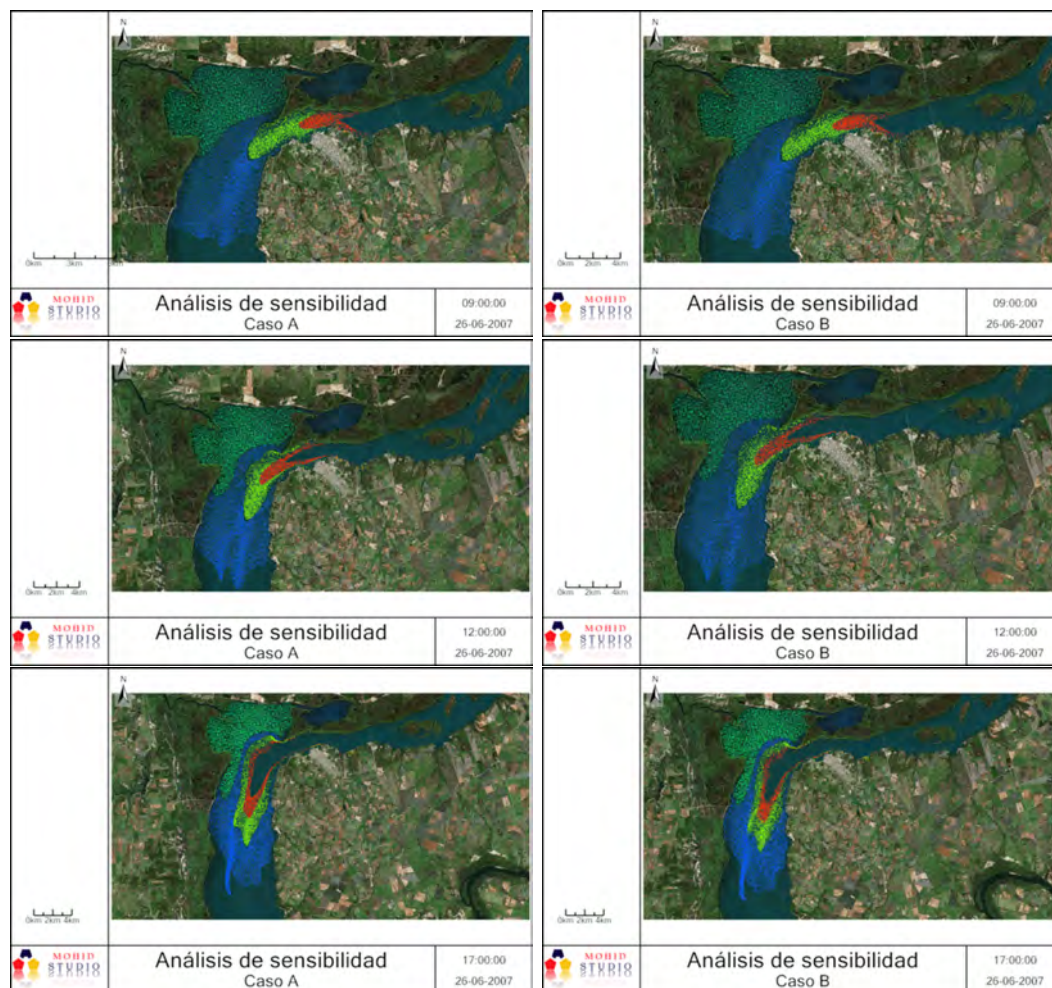


Podría concluirse, por lo antes expuesto, que para los casos de los boxes 1, 3 y 5 el tiempo de residencia de las partículas es dominado por el término advectivo y no tanto por el término difusivo. Por lo tanto, variaciones en la amplitud de la difusión de trazador no resulta alterar de forma significativa el tiempo que permanecen las partículas en dichos boxes.

Se esquematizan en figuras los resultados obtenidos para los tiempos 2, 5, 10, 15, 30 y 50 horas de la serie. En la Figura 6.18 se presentan los casos A y B, en la Figura 6.19 los casos C y D, y en la Figura 6.20 los casos E y F, según los describe la Tabla 6.8.

Se observa una difusión progresiva al comparar los casos A, B y C. Si bien inicialmente, en las primeras horas de la serie considerada las partículas se comportan de forma similar, ya a partir de la hora 5 el caso C se diferencia sensiblemente de los casos A y B. A lo largo del tiempo, en el caso C, las partículas de diferentes boxes se mezclan, no siendo posible discriminar las partículas de algunos boxes. En cambio, los casos A y B, conducen las partículas de los boxes de forma ordenada, pudiendo diferenciar claramente los conjuntos de las partículas. Recién a la hora 50 es posible visualizar para el caso B una mezcla significativa, por lo que ya no es posible diferenciar los diferentes conjuntos de partículas tan nítidamente.

FIGURA 6.18: Esquematzación del flujo de partículas para los casos A (izquierda) y B (derecha) a iguales tiempos de las series

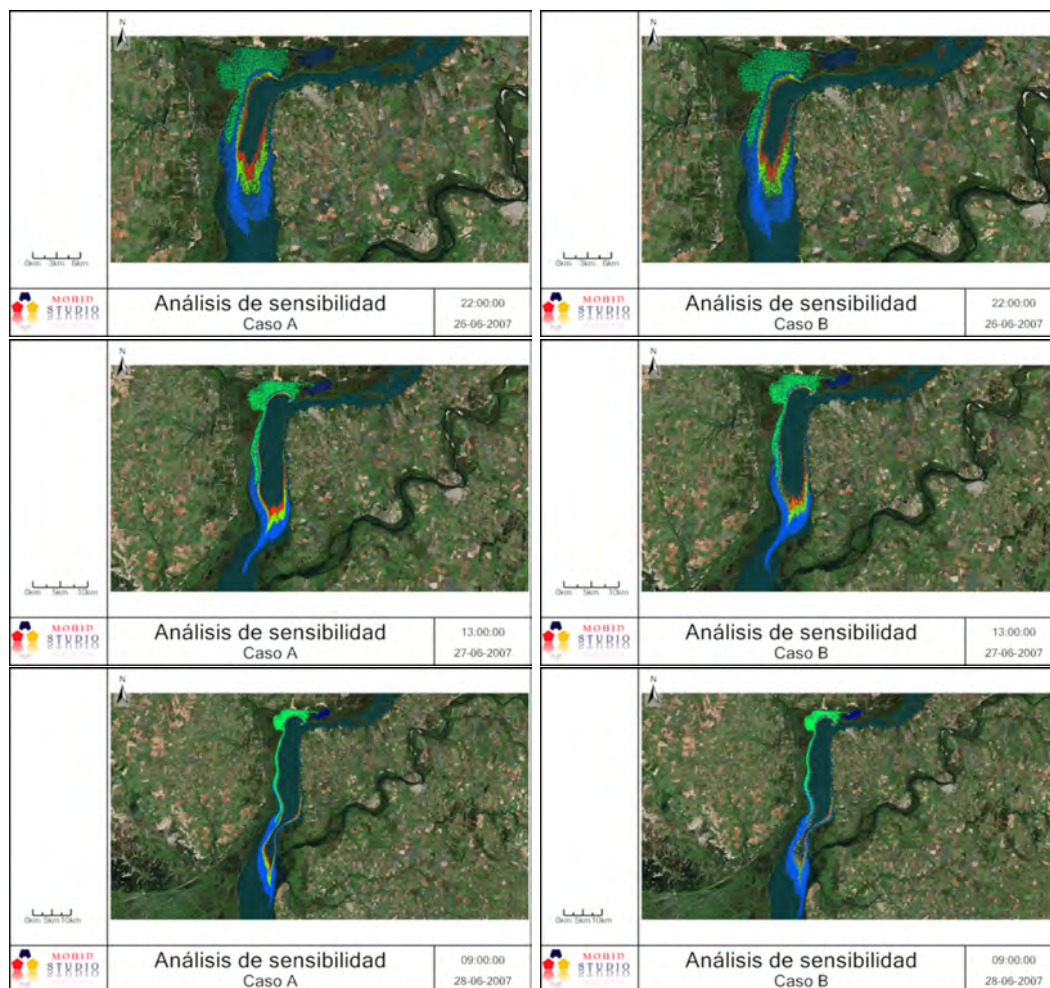


6.2.5. Conclusiones

Los tiempos de residencia de las zonas analizadas, boxes 1 a 6, pueden variar según las condiciones hidrodinámicas del medio, y según las condiciones del medio en el instante en que sucede el vertido. Esto es una característica muy importante, ya que el tiempo de residencia, por la forma en que fue definido, resulta muy dependiente del instante inicial que se adopta para el cálculo; en particular, cuán próximo sea éste de una condición de inversión de flujo significativa.

El box 1, asociado a la zona de la descarga de UPM, es el que presenta valores y rangos más acotados de tiempos de residencia, seguido en orden creciente por los boxes 3, 5 y 4. En el primer caso, los valores de tiempo de residencia rondan en los 2 y 3 horas para caudales de 5000 y 7200m³/s respectivamente, pudiendo alcanzar un valor de 11 horas para situaciones afectadas por inversión de flujo. Ante situaciones de caudales bajos provenientes de la Represa, el tiempo de residencia no puede determinarse por medio de

FIGURA 6.18: Esquematzación del flujo de partículas para los casos A (izquierda) y B (derecha) a iguales tiempos de las series (cont.)



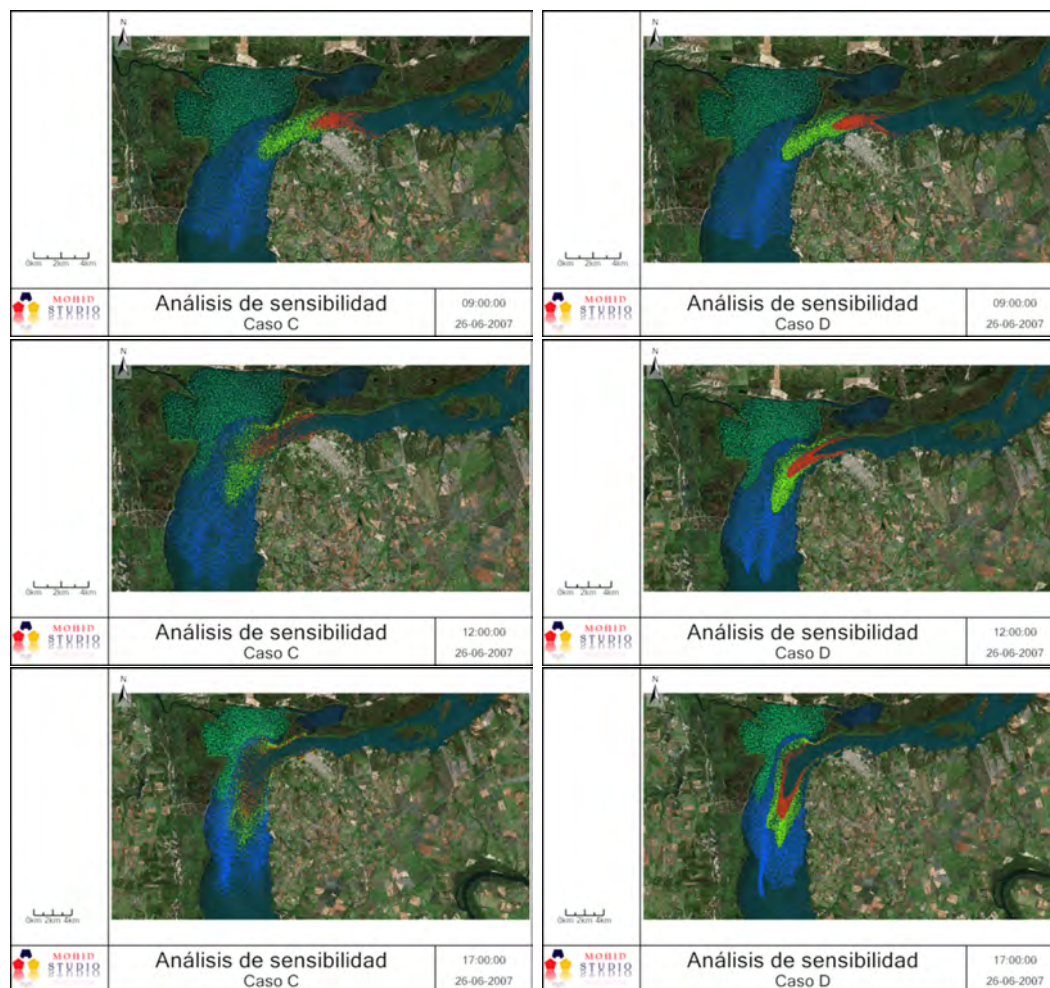
una aproximación exponencial identificándose que las partículas reingresan al box por efecto de la inversión de flujo. Debido a sus altas velocidades, este box puede renovarse rápido.

En el caso del box 3, la zona aledaña a Fray Bentos, su tiempo de residencia varía ampliamente entre 3 y 37 horas en función del caudal y de las condiciones de borde en la frontera abierta. Como dispone de pequeñas zonas quietas, particularmente contra la orilla uruguaya, algunas partículas pueden mantenerse dentro del box lo que puede suavizar las variaciones de fracción remanente por acción de inversión de flujo.

El box 5 amplifica su rango de tiempos de residencia respecto a los anteriores, variando desde 10 horas para caudales promedio de $7200\text{m}^3/\text{s}$ hasta 52 horas para situación con gran influencia de aguas abajo.

Las partículas de estos tres boxes, son las que presentan mayor desplazamiento en el dominio debido a las inversiones, alcanzando grandes distancias. Esto ocasiona que un

FIGURA 6.19: Esquematzación del flujo de partículas para los casos C (izquierda) y D (derecha) a iguales tiempos de las series

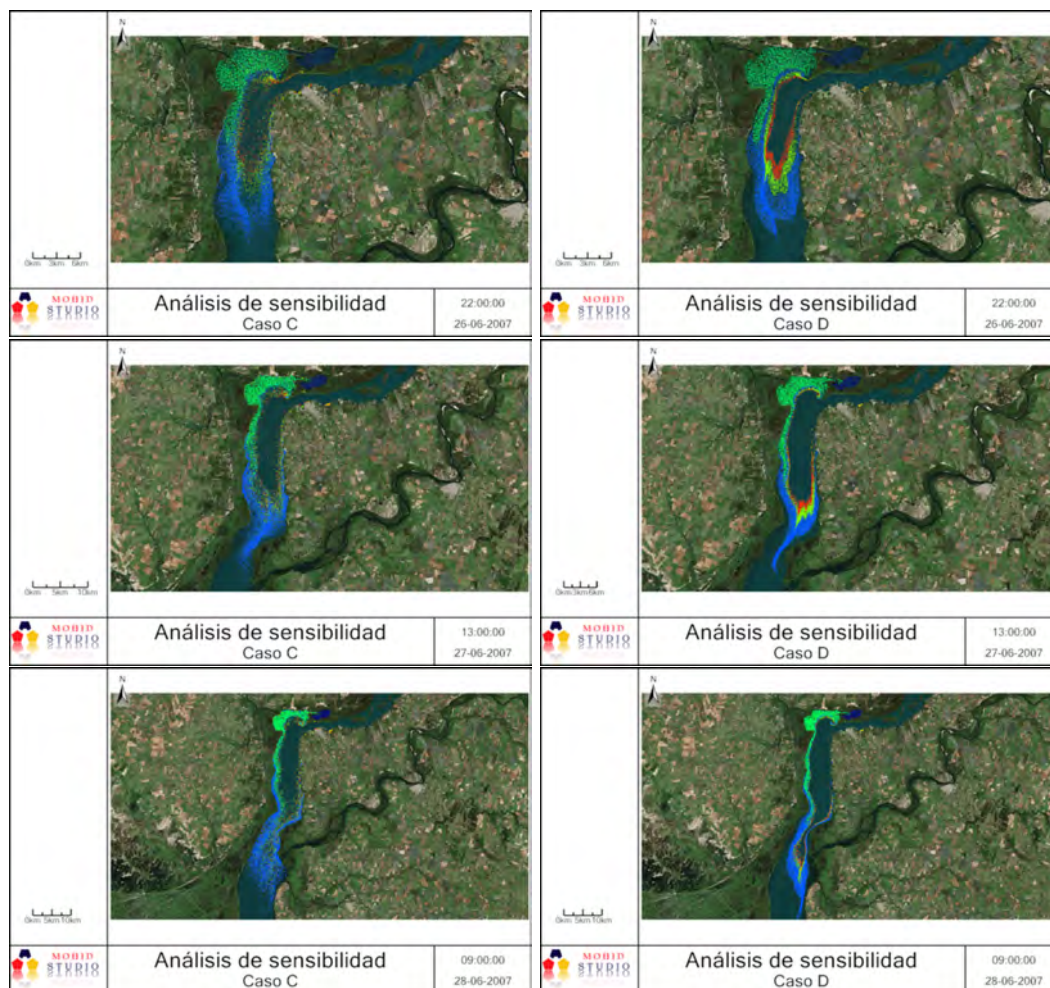


mayor porcentaje de partículas reingresen a los mismos.

Diferente a los anteriores, es el caso del box 2, asociado a la pequeña bahía en la desembocadura del arroyo Yaguareté. En general, su tiempo de residencia se considera que depende menos de la hidrodinámica del río. Cuanto mayor es la influencia de aguas abajo, menor es el tiempo de residencia durante caudales bajos, variando desde unas 43 hasta 50 horas. Ante un escenario de caudales elevados de $7200\text{m}^3/\text{s}$, el tiempo alcanza unas 59 horas. Pues, el gradiente del campo de velocidades entre el cauce principal del río y esta bahía se intensifica, dificultando la salida de partículas. Sin embargo, el menor valor de tiempo de residencia de todos los casos considerados se vincula al escenario con caudales medios de $5000\text{m}^3/\text{s}$, en donde se obtiene un tiempo de 39 horas. Por lo tanto, condiciones medias favorecen las salidas de las partículas de la bahía.

Mayor aún es el rango de diferencia de los tiempos de residencia obtenidos para el box 4, el cual comprende a la bahía del *Martillo*, abarcando valores desde unas 110 hasta 948 horas (de casi 5 a 40 días). El primero vinculado a la configuración con un caudal

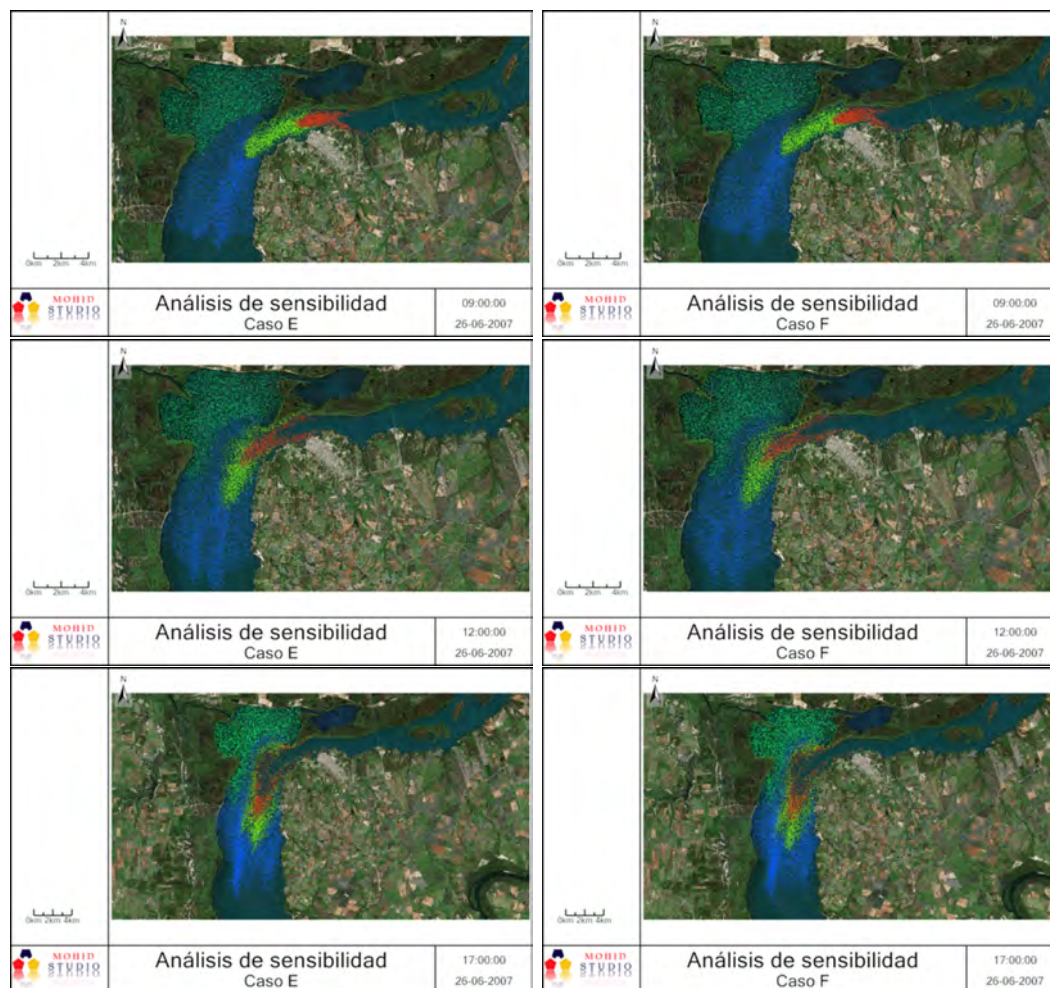
FIGURA 6.19: Esquematzación del flujo de partículas para los casos C (izquierda) y D (derecha) a iguales tiempos de las series (cont.)



de tránsito de $7200\text{m}^3/\text{s}$ y el segundo con intensa inversión de flujo y bajos caudales. El box 4, evacúa partículas tanto para la laguna adyacente como para hacia aguas abajo. Ante inversiones, se favorece el ingreso hacia la laguna. Ante flujo normal del río, sucede que las partículas tienden a salir de la bahía de forma recostada al margen izquierdo del río.

En cuanto al box 6, la laguna contigua al Martillo, presenta gran dificultad en la renovación de su volumen, no siendo posible determinar valores de tiempos de residencia en ninguno de los casos considerados. Pero a partir de las curvas de fracción remanente de partículas a lo largo del tiempo, se infiere que la laguna tiene un tiempo de residencia extremadamente elevado, lo que podría significar que si un contaminante ingresa a la misma permanecerá por mucho tiempo si no es degradada por ningún mecanismo. Sin embargo, cabe recordarse que la batimetría en la laguna es asumida, por lo que su hidrodinámica puede no estar fielmente representada, y en consecuencia, los resultados presentados aquí podrían no ser válidos.

FIGURA 6.20: Esquematzación del flujo de partículas para los casos E (izquierda) y F (derecha) a iguales tiempos de las series

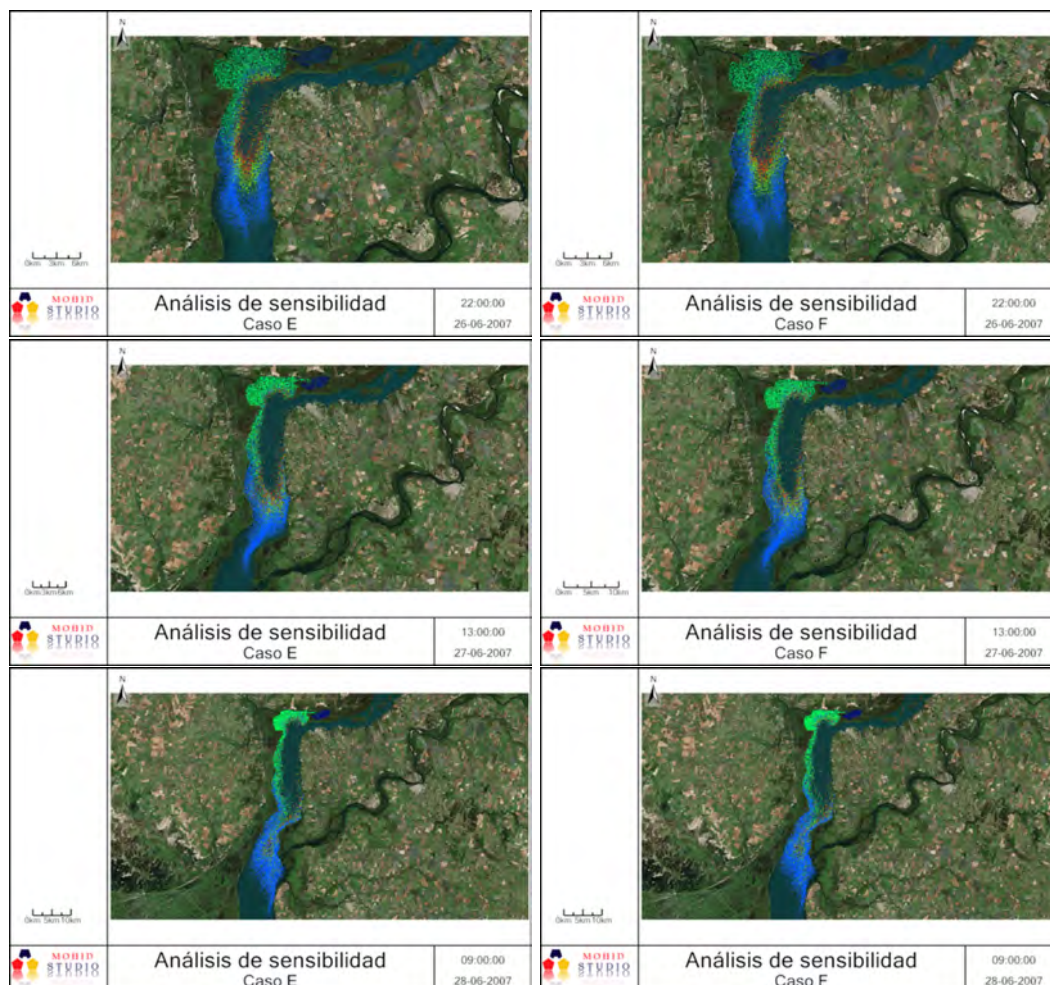


Debido a la heterogeneidad de los valores obtenidos en los diferentes boxes, no sería válido considerar un tiempo de residencia representativo de la zona como elemento único, sino que es necesario diferenciar cada una de las zonas.

A partir del análisis de sensibilidad ante variación en las variables de configuración del modelo para el caso B considerado (caudal promedio de la serie de $5000\text{m}^3/\text{s}$), se obtiene que para los casos de los boxes 1, 3 y 5 el tiempo de residencia de las partículas es dominado por el término advectivo y no tanto por el término difusivo. Por lo tanto, variaciones en la amplitud de la difusión de trazador (parámetro VARVELH) no alteran de forma significativa el tiempo que permanecen las partículas en dichos boxes.

En cambio, en el caso de los boxes 2 y 6, debido a las bajas velocidades presentes en los mismos, variaciones en el parámetro VARVELHX no colaboran en la salida de las partículas. En cambio, el coeficiente VARVELH, debido a que es una constante que no es afectada por velocidades advectivas, colabora en que la curva de fracción remanente

FIGURA 6.20: Esquematzación del flujo de partículas para los casos E (izquierda) y F (derecha) a iguales tiempos de las series (cont.)



en el box se ajuste a una curva exponencial. Para el box 2, esto hace posible atribuirle un tiempo de residencia.

En el caso del box 4 el tiempo de residencia para las diferentes configuraciones no muestra diferencias significativas, resultando en unos 7 días.

6.3. Transporte de contaminantes

En este subcapítulo se desarrolla un vertido artificial de trazador pasivo desde la ubicación del emisario de la planta UPM, con el objetivo de representar la dinámica del transporte de contaminantes descargados por la misma. Se opta por un trazador conservativo, ya que no se cuenta con información de monitoreos de parámetros ambientales lo suficientemente densa y confiable. Si se contara con mediciones de parámetros ambientales, como conductividad, DQO o temperatura, con buena densidad geográfica y

temporal, sería posible ajustar los coeficientes de dispersión del modelo. Considerando el efecto de marea al cual se encuentra sometido el río Uruguay, las mediciones de parámetros debieran contar con densidad mayor a la frecuencia de marea (Lee y Seo, 2007).

Lee y Seo (2007) encuentran que el efecto de marea puede ocasionar variaciones en la concentración de un contaminante: en zonas donde los efectos de inversión de flujo y recirculación son importantes, se produce un incremento importante de la distribución de concentraciones a lo largo del tiempo. También identifican que la marea puede ocasionar un movimiento fluctuante del contaminante mientras que el flujo viene y va, por lo que se observa oscilaciones en la concentración en puntos de monitoreo. Asimismo, dichos autores encuentran que durante el incremento de niveles de marea, la inversión y recirculación de flujo afectan notablemente el transporte de contaminantes. Las parcelas de contaminantes son desplazados hacia aguas arriba, mientras que el flujo de recirculación ocasiona un incremento en la mezcla transversal en estas zonas. También mencionan que la sinuosidad de los ríos favorece la mezcla transversal y favorecen el efecto de almacenamiento por la recirculación del flujo.

Se plantea entonces analizar el comportamiento de la pluma de descarga de UPM ante eventos de inversión de flujo, con una estimación de la longitud de la inversión de la pluma.

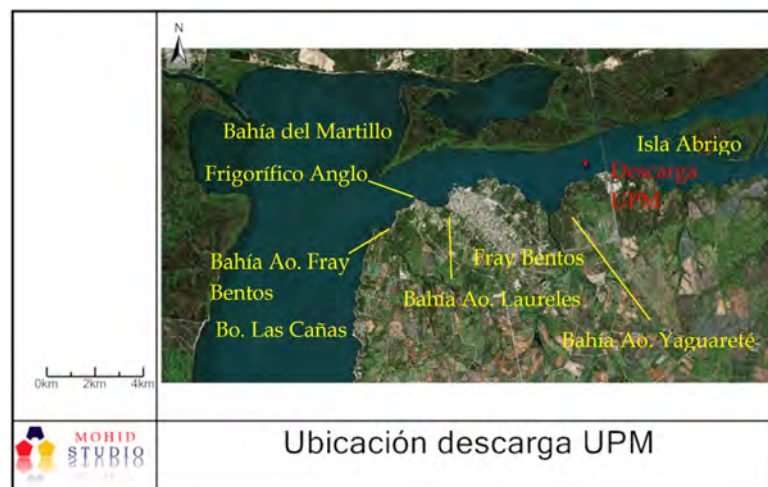
Asimismo, interesa determinar la interacción de la pluma con la bahía del Martillo, y con la bahía del arroyo Yaguareté, así como también la laguna contigua al Martillo. La relevancia de ello radica en identificar si partículas emitidas por UPM pueden alcanzar alguno de estos subdominios.

6.3.1. Metodología

Para simular la descarga de efluentes por parte de UPM, al igual que para los tiempos de residencia, se utiliza el módulo Lagrangeano del modelo MOHID. Al utilizar un abordaje Lagrangiano para simular el movimiento y dispersión de la pluma de descarga, ésta se encuentra representada por un conjunto de partículas.

Por lo tanto, se considera una descarga continua puntual de partículas conservativas con punto de descarga en coordenadas geográficas -58.2564E, -33.1051N (Figura 6.21). El caudal de descarga es de $0.83\text{m}^3/\text{s}$, correspondiente al caudal de diseño del emisario (Ecometrix, 2006).

FIGURA 6.21: Ubicación de la descarga de trazadores en el modelo



Los escenarios considerados son aquellos de caudales medios y bajos seleccionados para la etapa de validación: 1/6-30/7/2008 y 22/9-21/11/2010 respectivamente. La esquematización del modelo utilizada es la del modelo Hijo descrita en el capítulo 5, por lo cual, la descarga de UPM dista 15km de la frontera inferior a lo largo del canal principal del río.

6.3.2. Configuración del modelo

El modelo se configura con una descarga continua asociada a un único punto de emisión. El caudal considerado es de $0.83\text{m}^3/\text{s}$, emitiendo 10 partículas por segundo de simulación. El comienzo de la descarga coincide con el inicio de las series temporales consideradas.

Los valores de los coeficientes de la desviación estándar de la velocidad turbulenta, VARVELHX y VALVELH se adoptaron en un comienzo con valores 0.02 y 0 respectivamente. El primer valor se estableció según bibliografía consultada (DRIFTER, 2010), y el segundo nulo debido a que en bibliografía el VARVELH se desprecia o se impone valores muy pequeños. En la Tabla 6.9 se presenta valores calibrados y/o considerados por bibliografía consultada. Sin embargo, es importante mencionar que ninguno de los casos presentados en dicha tabla presenta características fluviales, sino del tipo estuarinas y costeras.

Debido a la incertidumbre asociada a los valores de estos coeficientes, se complementa con un análisis de sensibilidad ante variaciones del parámetro VARVELHX (intensidad de turbulencia), variando entre 0.002 y 0.2, este último considerado por Fossati et al. (2013). Específicamente, se consideran los valores de 0.002, 0.02, y 0.2.

TABLA 6.9: Coeficientes de difusión turbulenta según bibliografía

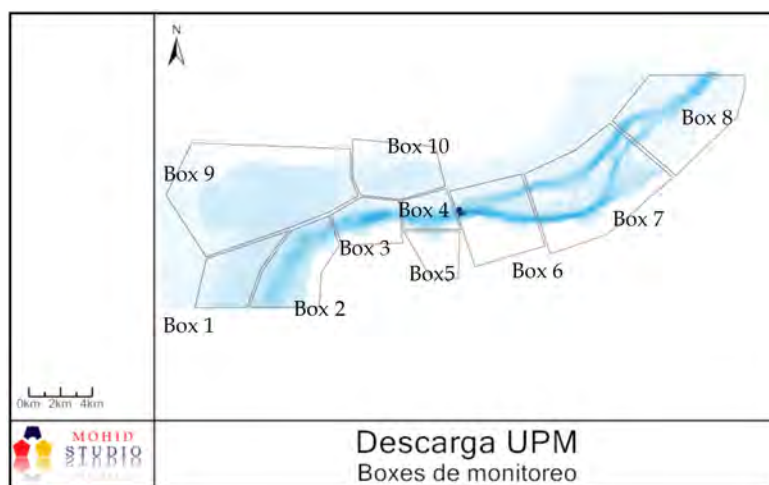
Autor/autores	Descripción del trabajo	Valores adoptados/determinados
Huhn et al. (s.f.)	Calibración del modelo ajustando el coeficiente de drag de viento y/o coeficientes de difusión turbulenta, utilizando pruebas de flotadores en dos casos: en Ría de Vigo se determina un coeficiente asociado a la velocidad del viento asumiendo un valor de coeficiente de difusión turbulenta. En el caso de Costa Estoril se determinan ambos coeficientes.	En el caso de Ría de Vigo se adopta un valor de 0.003m/s, siendo dicho valor VARVELH. VARVELHX es considerado nulo. Los coeficientes de difusión turbulenta obtenidos para la Costa Estoril son VARVELHX=0.02 en general, y de 0.03 en las primeras horas. En cambio, VARVELH se adopta nulo.
Fossati et al. (2013)	Análisis de diferentes configuraciones (ubicación y características) para un emisario de descarga de efluentes domésticos en la zona costera de Montevideo, Uruguay.	Se adopta un valor de VARVELHX en 0.20, con VARVELH = 0.
Fernandes et al. (2011)	Mejora del modelo Lagrangiano como herramienta de toma de decisiones, con medidas de boyas. Aplicación a la costa continental de Portugal y Estuario del Tejo.	Ajustan, con prueba de campo de boyas, el valor de VARVELHX en 0.02, con VARVELH = 0, para zona del Estuario Tejo y zona costera de Portugal continental.
Ascione Kenov et al. (2013)	Determinación de tiempo de residencia del Estuario Mondego, y su afectación por factores geomorfológicos, como la descarga de caudal de aporte.	Se adopta un valor de VARVELHX en 0.05, con VARVELH = 0, para zona del Estuario Mondego

Se configuran 10 boxes de monitoreo a modo de detectar la interacción entre las partículas emitidas por UPM y las zonas circundantes al punto de descarga, esquematizados en la Figura 6.22 junto con la ubicación de la descarga. En dichos boxes, se determina la cantidad máxima de partículas a lo largo del tiempo. El box 6 se corresponde con la descarga de efluentes, comprendiendo también un tramo hacia aguas arriba de la misma. Continuando hacia aguas arriba, el box 7 comprende desde la mitad de la isla Abrigo (donde termina el box 6) hasta la mitad de la isla Zapatero. El box 8, desde el extremo superior del anterior y la frontera del dominio Hijo.

Hacia aguas abajo del box 6, el box 5 se asocia con la bahía del arroyo Yaguareté, el box 4 comprende desde esta última hasta la descarga de UPM. El box 3 desde el box 4 hasta el comienzo de la bahía del *Martillo*. El box 2 comprende el canal principal del tramo inferior del dominio, desde el box 3. El box 1 es contiguo al box 2, vinculado a las zonas someras del río ubicadas del lado argentino.

Los boxes 9 y 10 también son del lado argentino, el primero comprendiendo la bahía del *Martillo* y el segundo la laguna contigua a éste.

FIGURA 6.22: Ubicación de boxes de monitoreo



6.3.3. Resultados

Se obtienen resultados asociados al comportamiento de la pluma de descarga, así como la fracción de efluente presente en cada uno de los boxes para instantes dados. Dicho valor es la relación entre el volumen instantáneo de trazador dentro del box y el volumen descargado acumulado hasta ese instante. Se presentan a continuación los resultados obtenidos para los escenarios de caudales bajos y medios.

Se advierte que una vez alcanzada la frontera abierta las partículas son eliminadas del sistema, por lo que no son reingresadas por las inversiones de flujo. Gracias a ello es

posible observar la “extensión” del retroceso de la pluma originadas por las inversiones. Sin embargo, la cantidad de efluente presente en los boxes afectados por las inversiones ubicados más río abajo, principalmente los boxes 1, 2, y 3, puede estar subestimada.

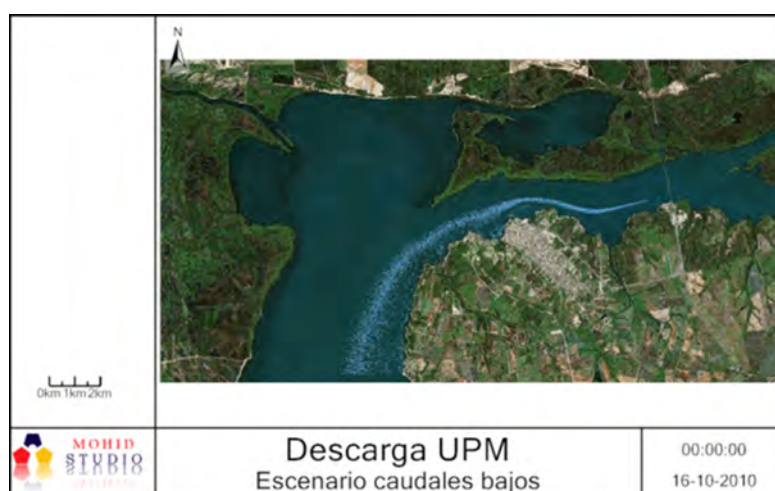
A continuación se presentan los resultados de fracción de efluente en los boxes con diferentes colores: en tonos de rojo para los boxes 7 y 8 ubicados aguas arriba de la descarga y en tonos de azul para el box donde se localiza la descarga y los ubicados aguas abajo del mismo del lado uruguayo. El box 1, ubicado del lado argentino, se presenta en color violeta, y los boxes 9 y 10, representando el *Martillo* y la laguna contigua respectivamente, se presentan en tonos de verde.

En las diferentes series de resultados se observa un período que la descarga requiere para alcanzar un régimen “estable” en cuanto a las fracciones de efluente, independiente de las condiciones iniciales.

6.3.3.1. Caudales bajos

Se presentan los resultados obtenidos para la configuración con un coeficiente de intensidad de turbulencia del 2 % ($VARVELHX=0.02$). En condiciones normales de flujo la pluma se extiende a lo largo del canal principal, mostrando mayor dispersión a partir de la ciudad de Fray Bentos (Figura 6.23). Durante eventos de inversión la pluma de trazador sufre una “compresión”, con deformaciones incrementando la ondulación y siendo las partículas desplazadas hacia aguas arriba. En función de la magnitud de la inversión lo es la extensión del desplazamiento.

FIGURA 6.23: Pluma de trazador de descarga UPM



El tramo inicial de la pluma es muy confinado, evitando así el ingreso de partículas en la bahía del arroyo Yaguareté en condiciones normales de flujo (box 5). Más adelante las partículas incrementan su dispersión, ocasionando que algunas alcancen las orillas

uruguayas. Por tanto, se observa presencia de partículas en la bahía del arroyo Laureles (zona de playas), entre el Frigorífico Anglo y la ciudad de Fray Bentos, las cuales tienden a permanecer. También hacia aguas abajo de esta bahía las partículas llegan a las orillas, pero en menor cantidad que la bahía del arroyo Laureles.

En la Figura 6.24 se presenta la serie de caudales instantáneos en la sección de Fray Bentos, y en la Figura 6.25 los resultados obtenidos de la fracción del volumen de trazador descargado que se encuentra en los diferentes boxes. A partir de esta última se infiere que requiere unas 800hrs para alcanzar el régimen estable. La cantidad de efluente dentro del conjunto de los boxes no supera el 8 % de su volumen descargado acumulado, lo que significa que más de un 92 % sale del dominio considerado. Sin embargo estos valores presentan un porcentaje de error, advertido anteriormente en razón de la "pérdida" de partículas a través del borde inferior del dominio, por lo que la cantidad máxima de efluente dentro del dominio podría ser mayor.

Se observa que el comportamiento del trazador reproduce la variabilidad instantánea e inversiones del flujo reflejadas en la serie de caudales instantáneos de Fray Bentos. El box 2 refleja mayor variabilidad que los boxes 3 y 4, por su mayor cercanía a Nueva Palmira.

Debido a las inversiones y reducción transitoria de caudales, se incrementa puntualmente las concentraciones de trazador en algunos boxes. Las concentraciones en la zona de la descarga (box 6) son prácticamente nulas, presentando incrementos puntuales asociados a períodos de inversión de flujo. Esto significa que una vez descargado, en condiciones normales, el trazador es inmediatamente transportado hacia aguas abajo y erradicado del box 6.

FIGURA 6.24: Serie de caudales en Fray Bentos, escenario de caudales bajos

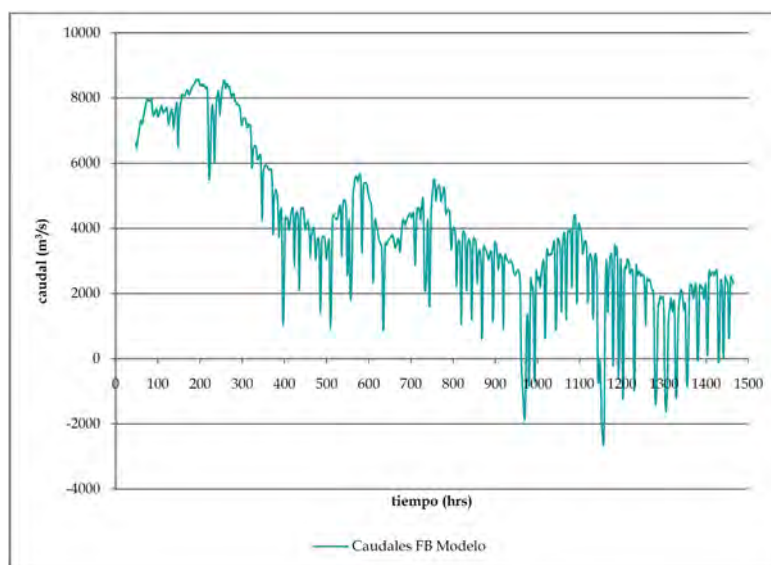
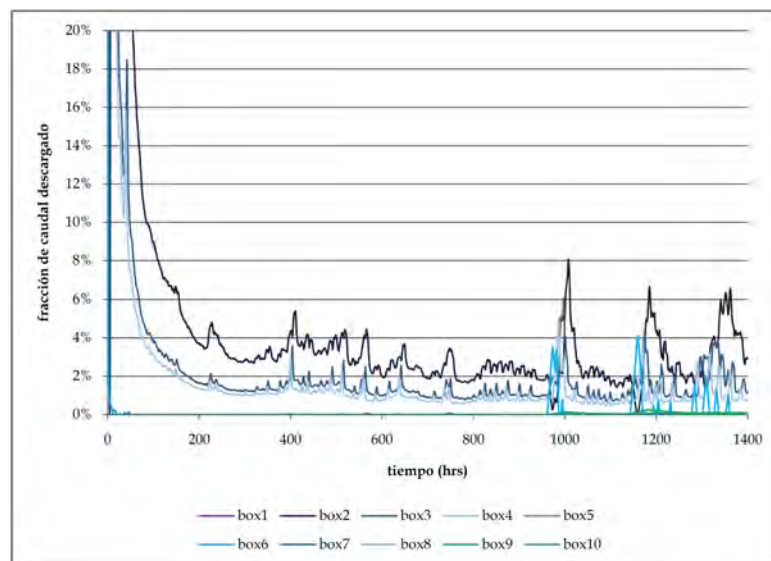


FIGURA 6.25: Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del dominio, escenario de caudales bajos



Los boxes que muestran vinculación con la descarga son los boxes 2, 3 y 4, todos ubicados a lo largo del canal principal del río. Las curvas de estos boxes muestran un desfase temporal asociado al tiempo de transporte de las partículas hacia aguas abajo. A medida que se encuentran más alejados del punto de descarga, los boxes presentan mayor fracción del volumen descargado. Esto se asocia a un mayor tiempo de viaje, favorecido por una menor velocidad de flujo en este escenario, que habilita la dispersión creciente de las partículas. En el box 2, limitado entre Fray Bentos y Las Cañas exhibe aproximadamente el doble que el box 3, y este último muestra valores un 10 % por encima del box 4. El box 2, cuando comienza a alcanzar el régimen estable, muestra valores de fracción de caudal promedio de un 3 %, y luego disminuye a una tendencia de un 2 % con incrementos puntuales que pueden superar levemente un 4 %.

Al ser las concentraciones en los boxes 7 y 8 despreciables, se infiere que la pluma de descarga no alcanza los mismos durante los eventos de inversión de esta serie. Por lo tanto, el tramo inicial de la pluma de descarga no logra una inversión suficiente para alcanzar dichos boxes.

El box 1, correspondiente a zonas someras aguas abajo del *Martillo* (lado argentino), no muestra afectación. Sin embargo, la bahía del *Martillo* (box 9) sí presenta una concentración cuantificable a partir de la hora 950 de la serie, del entorno del 2‰. Esto se debe a la inversión de flujo. El ingreso de partículas a la bahía ocasiona un ingreso de algunas de ellas en la laguna contigua (box 10) y también el box 5 (bahía Yaguareté) muestra un incremento de partículas durante inversiones, aunque éste resulta muy pequeño.

La Figura 6.26 comprende un conjunto de imágenes que muestran el efecto de una inversión que comienza el 18 de octubre de 2010 (aproximadamente la hora 650 de la serie). Se esquematiza la pluma de trazador junto con el campo de velocidades y la batimetría del dominio. En este caso la pluma no alcanza la ciudad de Fray Bentos, pero sí llega hasta la latitud de la bahía del *Martillo*. Por ello, se observa que el retroceso de la pluma no es muy importante (de unos 1000m) y ocurre en el tramo final de la misma. Cuando la inversión culmina, y las velocidades en el tramo inferior del dominio vuelven a ser positivas, se produce la liberación de las partículas retenidas por la inversión. Se incrementa la concentración de las partículas en el canal principal, también incrementando la cantidad de partículas sobre la margen uruguaya. Se demora unas 25hrs en alcanzar un régimen estable nuevamente.

La inversión de mayor magnitud sucede casi a los 42 días de comenzada la serie temporal (1000 horas aprox.), comenzando el 1 de noviembre de 2010. Se corresponde con un caudal negativo de $2660\text{m}^3/\text{s}$ en la sección de Fray Bentos. A diferencia del caso anterior, se logra invertir la dirección de la pluma desde el punto de descarga. En vez de ser las partículas conducidas hacia aguas abajo, las mismas son transportadas hacia aguas arriba. A las 12hrs la pluma alcanza su máximo retroceso: las partículas ubicadas en la frontera inferior al comenzar la descarga alcanzan los 7.6km hacia aguas arriba (1.5km aguas abajo de la ciudad de Fray Bentos) y el tramo inmediato a la descarga llega hasta 5km aguas arriba de la misma. A esta altura el río se encuentra dividido en dos brazos por la isla Abrigo. Se observa que la pluma invertida se extiende sobre el brazo del lado uruguayo, como se esquematiza en la primera ilustración de la Figura 6.27. Debido a la inversión, algunas partículas logran ingresar a la bahía del *Martillo* y a la bahía del arroyo Yaguareté.

En la Figura 6.27 se presenta una secuencia temporal de imágenes de esta última inversión. Las partículas que ingresan a la bahía Yaguareté, una vez reestablecido el flujo normal, logran salir casi en su totalidad. Sin embargo, en la bahía del *Martillo* las partículas permanecen por más tiempo. En este caso la pluma tarda unos 3.4 días para volver a su estado previo a la inversión, aunque dejando remanentes en las bahías antes mencionadas.

6.3.3.2. Caudales medios

En las Figuras 6.28 y 6.29, respectivamente, se esquematizan los caudales instantáneos en la sección de Fray Bentos junto con la cantidad del volumen de efluente descargado en cada uno de los boxes para el escenario de caudales medios.

FIGURA 6.26: Comportamiento de la pluma de trazador ante inversión de flujo del 18/10/2010, escenario de caudales bajos

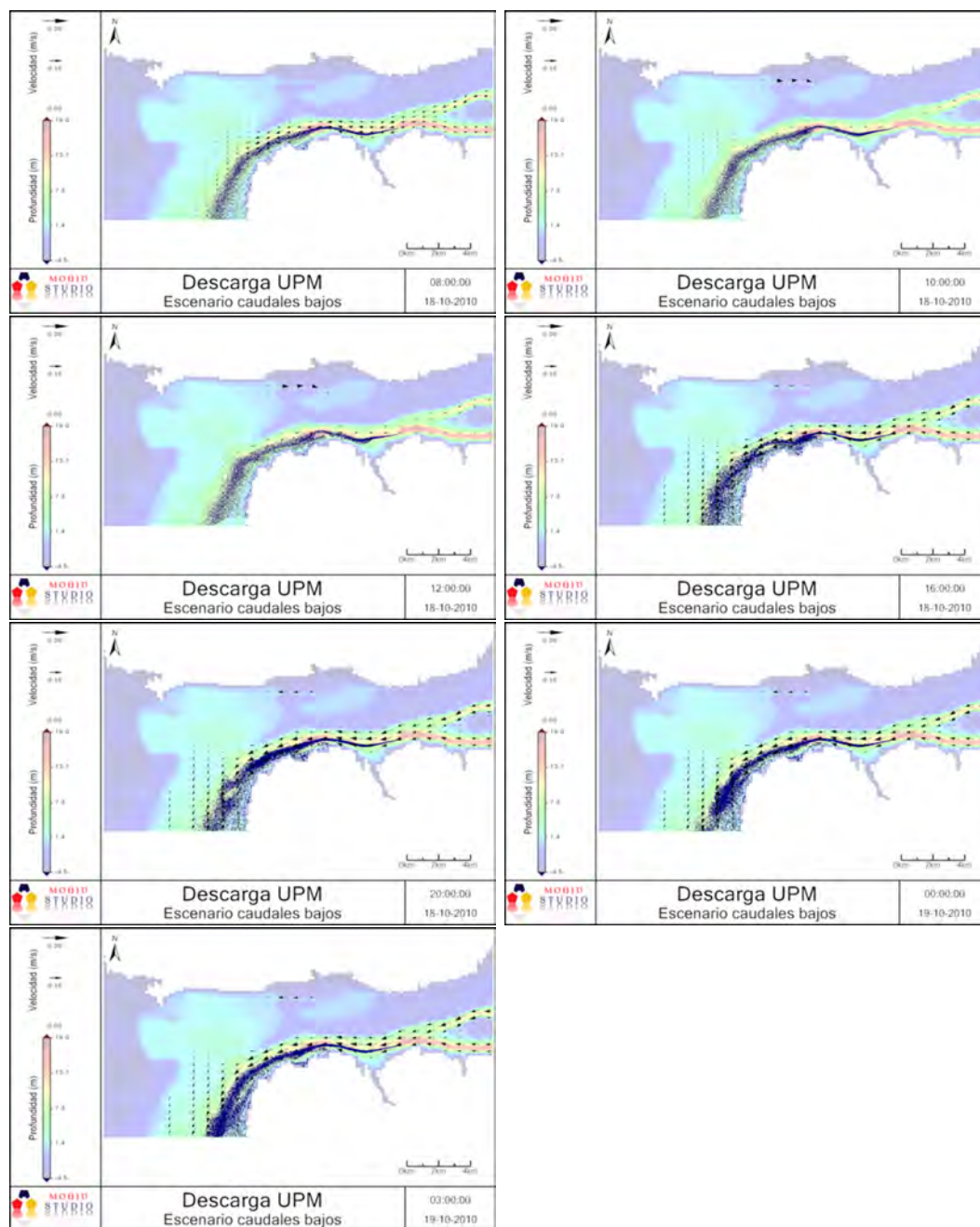
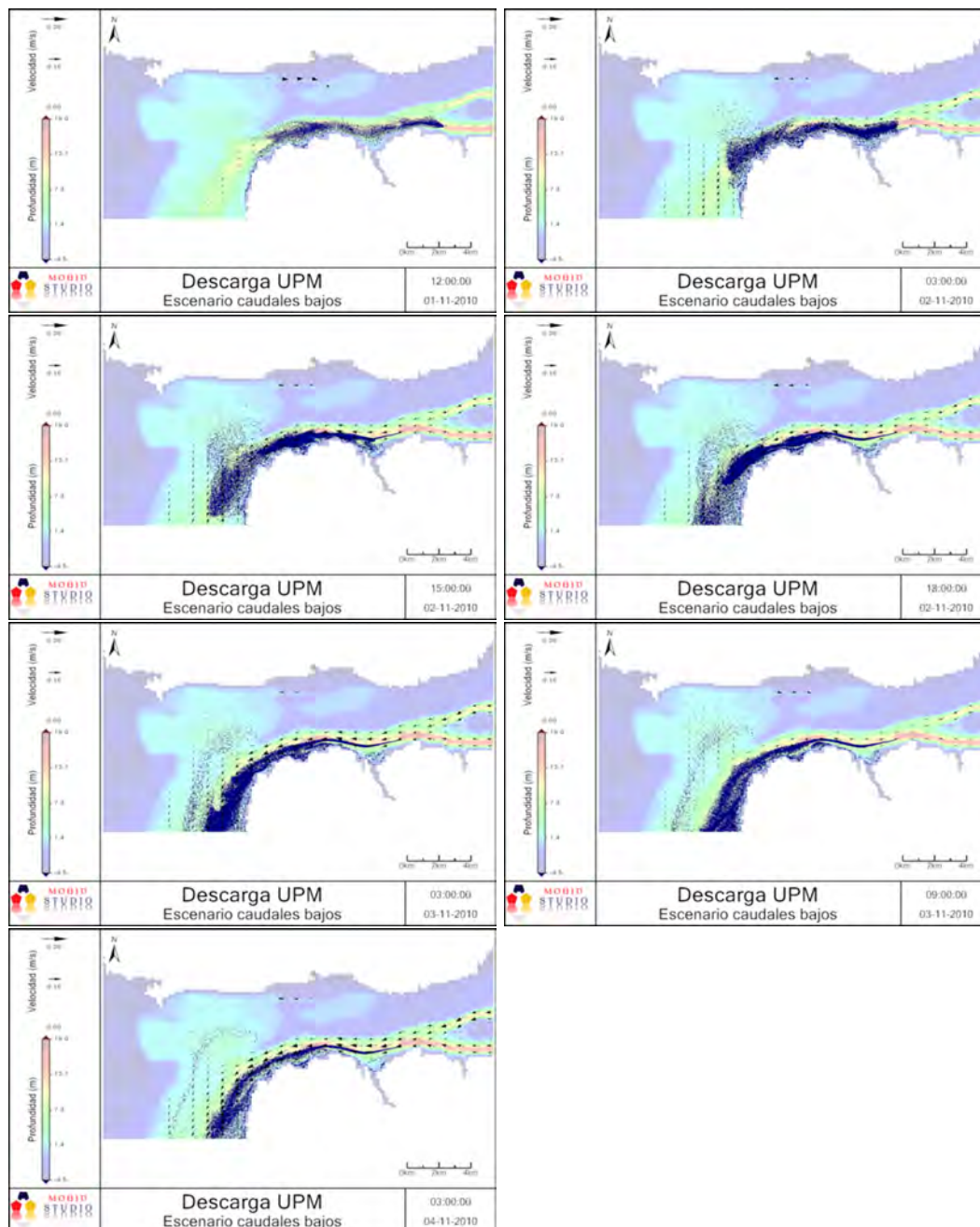


FIGURA 6.27: Comportamiento de la pluma de trazador ante inversión de flujo del 1/11/2010, escenario de caudales bajos



Se observa que en este escenario se requiere un lapso de tiempo menor que el caso anterior para alcanzar el régimen estable. También los valores obtenidos de cantidad de efluente en los boxes es menor que el caso anterior, indicando que mayores velocidades de flujo permiten mayor escurrimiento de partículas. Asimismo, las inversiones que ocurren en este escenario son de menor magnitud que las del escenario antes presentado. Esto conduce a que no ingresen prácticamente partículas a la bahía del arroyo Yaguareté.

En régimen estable, con un caudal de casi $5000\text{m}^3/\text{s}$ en sección Fray Bentos (período entre las 800 y 1000 horas de la serie), el tramo entre Fray Bentos y Las Cañas contiene entre un 1.4 y 1.8 % del efluente descargado, mientras que en el tramo entre Fray Bentos y fin de la bahía del arroyo Yaguareté se llega a un 7‰ y 8‰. El tramo comprendido entre el anterior y la descarga de UPM aloja entre un 5‰ y 6‰ del volumen descargado de efluente.

FIGURA 6.28: Caudales en Fray Bentos, escenario de caudales medios

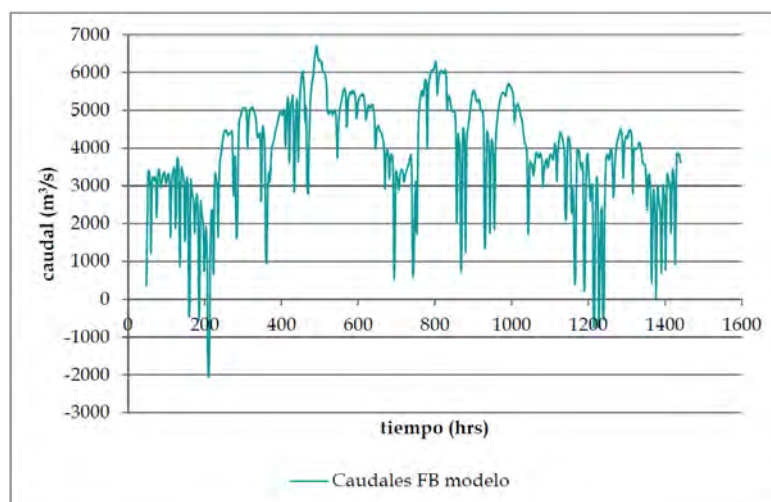
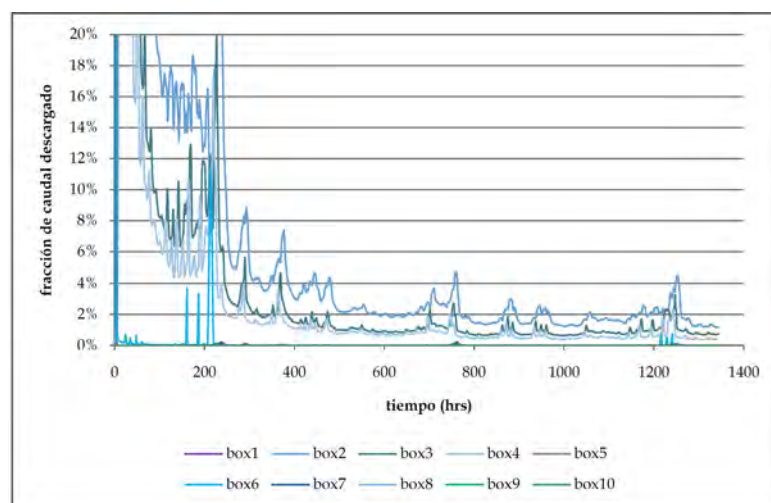


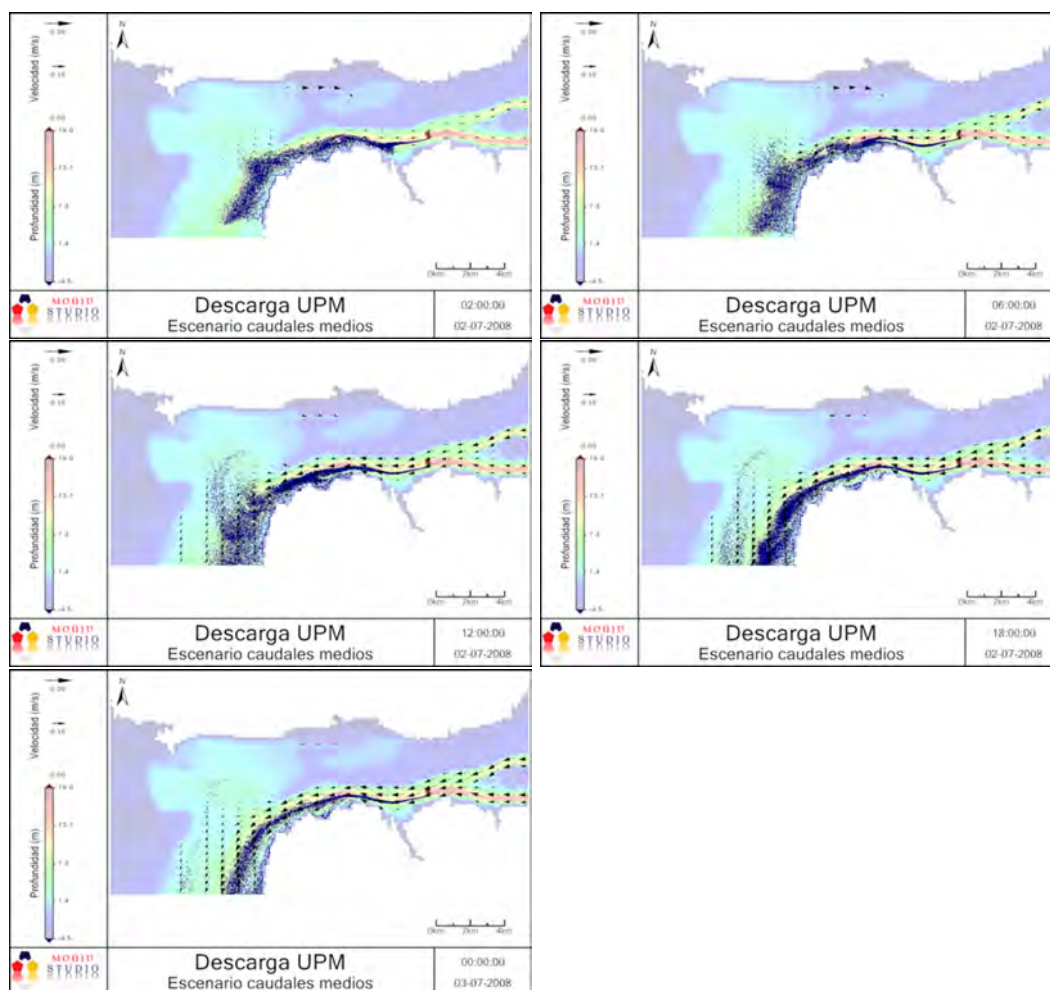
FIGURA 6.29: Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del dominio, escenario de caudales medios



A diferencia del caso anterior, se detecta una mayor presencia de partículas en el box 1, correspondiente a la zona de aguas someras del lado argentino aguas abajo del Martillo. Esto se relaciona con eventos de inversión de flujo, como se esquematiza en la secuencia de figuras presentadas (Figura 6.30). Las mismas presentan la repercusión de la inversión que ocurre alrededor de las 750hrs de la serie: una vez culminada la inversión, la cual no alcanza Fray Bentos, las mayores velocidades del canal principal ocasionan la dispersión de partículas hacia la bahía del Martillo y posteriormente a las zonas someras hacia aguas abajo del mismo.

Como la inversión no se desarrolla hacia aguas arriba de Fray Bentos, no se da una inversión de pluma desde la descarga. Lo que sí se observa es un retroceso del tramo final de la pluma, con un desplazamiento hacia aguas arriba de las partículas extendiéndose por unos 1000m.

FIGURA 6.30: Comportamiento de la pluma de trazador ante inversión de flujo del 2/7/2008, escenario de caudales medios



6.3.4. Análisis de sensibilidad

Aquí se presentan resultados obtenidos para diferentes valores de coeficientes de intensidad de turbulencia: 0.002, 0.02 y 0.2, para ambos escenarios presentados.

En primer lugar, el tamaño de la pluma varía sustancialmente entre las tres configuraciones. En la Figura 6.31 se presenta la pluma para cada una de ellas (hora 576 de la serie correspondiente a caudales bajos), donde se distingue grandes diferencias en la conformación de la pluma, tanto en su ancho, como si se encuentra más o menos definida. Se presentan en orden creciente de coeficiente.

Para el caso de coeficiente mayor, 0.2, prácticamente no se produce una pluma definida de descarga. La pluma, una vez emitida las partículas, permanece conformada una corta distancia para luego dispersarse ampliamente. En el tramo inicial se observa dispersión principalmente del lado uruguayo, recién alcanzando el lado argentino a la altura de Fray Bentos. Se establece mayor acumulación de partículas en zonas estancas, principalmente en la margen uruguaya. También en la bahía el *Martillo* se acumulan, e inclusive logran ingresar en mayor cantidad a la laguna. Por tanto, implica una retención de más partículas en el dominio. Si bien la Figura 6.31 esquematiza una situación luego de eventos de inversión, algunas de las partículas de la bahía abandonan la misma luego de un tiempo prolongado de flujo positivo. Pero nuevas inversiones retardan la salida de las mismas.

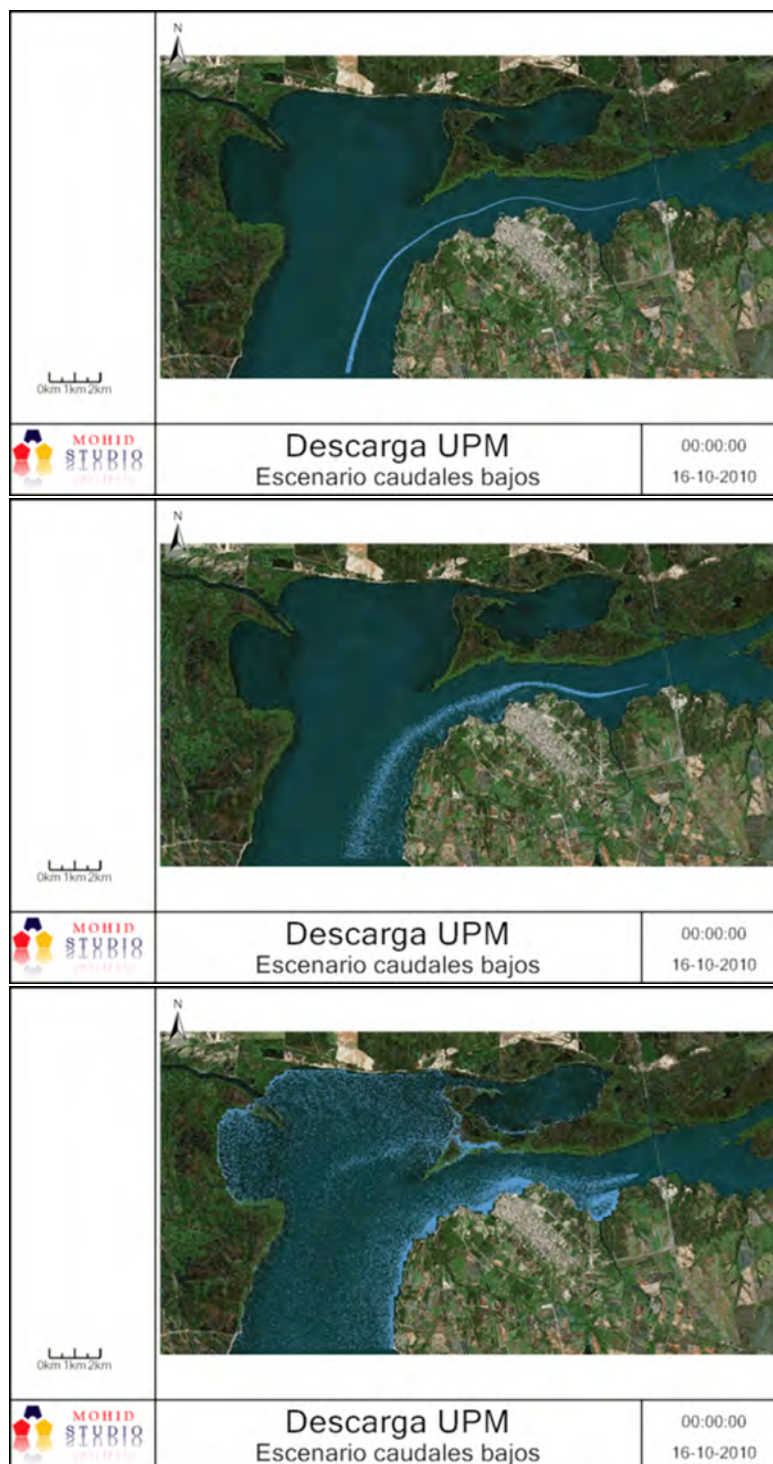
En cambio, la intensidad de turbulencia más baja (de 0.002) produce una pluma nítida y bien conformada, sin que alcance a registrarse la acumulación de partículas en las márgenes del río, a lo largo de los 15km recorridos desde la descarga hasta la frontera inferior.

En cuanto a la fracción de efluente que queda retenido en los boxes, a mayor intensidad de turbulencia mayor cantidad de partículas permanecen en el sistema, afectando una mayor cantidad de boxes. Las Figuras 6.25 (ya presentada), 6.32 y 6.33, presentan las curvas de fracción de caudal descargado retenido en los boxes, para las configuraciones de coeficientes de turbulencia 2‰, 2 % y 20 % respectivamente.

El comportamiento de la curva con coeficiente de 2 % es análogo al de 2‰, aunque presentando mayores valores (aproximadamente el doble). Los boxes afectados son los 2, 3, 4 y 6 en ambos casos. Los boxes 5, 9 y 10 también muestran afectación, pero solamente para la configuración con coeficiente de 2 %, y de menor forma que los anteriores, como fue antes presentado.

En cuanto a la conformación de la pluma, ambas configuraciones presentan características diferentes, según indica la Figura 6.34 para el instante de inversión máxima. La

FIGURA 6.31: Plumas de descarga para las configuraciones con intensidades de turbulencia de 2‰ (superior), 2 % (medio) y 20 % (inferior)



pluma con coeficiente 2‰ se encuentra bien conformada, estrecha pero presentando ondulaciones. En ningún momento las partículas se depreden de la pluma para alcanzar las orillas. Durante la inversión de flujo de magnitud máxima en Fray Bentos, la pluma se mantiene por 1.1 días en dirección negativa y tarda en restablecer su comportamiento en el dominio unos 1.8 días. Ambos valores son menores a los determinados para el coeficiente de 2 ‰.

En cambio, para la configuración con coeficiente de turbulencia del 2 ‰, como fue comentado anteriormente, las inversiones ocasionan dispersión de partículas, alcanzando las orillas uruguayas e ingresando a zonas de mayor retención como las bahías del arroyo Yaguareté, del *Martillo*, arroyos Laureles y Fray Bentos.

Diferente a los casos anteriores es la configuración con coeficiente del 20 ‰. Las partículas se distribuyen en más cantidad de boxes. Si bien la cantidad total de volumen de effluente retenido en el dominio es mayor a los casos anteriores (entre un 11 ‰ y 6 ‰), las concentraciones máximas del dominio son de menor magnitud. Los valores de effluente en el box 9, bahía del Martillo, son comparables con los de los boxes 2 y 3, aunque sus extremos se encuentran en general por debajo de estos últimos. Y los valores del box 5, bahía del arroyo Yaguareté, son similares y levemente superiores a los del box 4. Inclusive concentraciones de effluente en el box 1 son apreciables, aunque de magnitud pequeña.

A partir de la Figura 6.34, asociada al evento de inversión máxima, se observa también un desplazamiento en las partículas hacia aguas arriba. El tramo de la pluma cercano a la descarga es invertido al igual que los casos anteriores y alcanzando aproximadamente el mismo desplazamiento. En cambio, si bien gran parte de las partículas se traslada por el brazo uruguayo, se observa que algunas se ubican sobre el brazo argentino. Por tanto, las partículas se distribuyen todo a lo ancho del río. Para este caso, la pluma se mantiene invertida por 1.6 días y tarda unos 2.8 días en restablecer su comportamiento en el dominio.

El desplazamiento asociado a las partículas cercanas a la frontera inferior es variable. En general, las ubicadas en el box 1 tienden a ingresar a la bahía, y las ubicadas en el box del lado uruguayo son las que sufren mayor desplazamiento por estar ubicadas en el canal principal del río.

6.3.5. Conclusiones

A partir del análisis de estas tres configuraciones presentadas, se obtiene que al variar en un orden de magnitud en más y en menos el coeficiente de intensidad de turbulencia,

FIGURA 6.32: Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del dominio, para intensidad de turbulencia de 2‰, escenario de caudales bajos

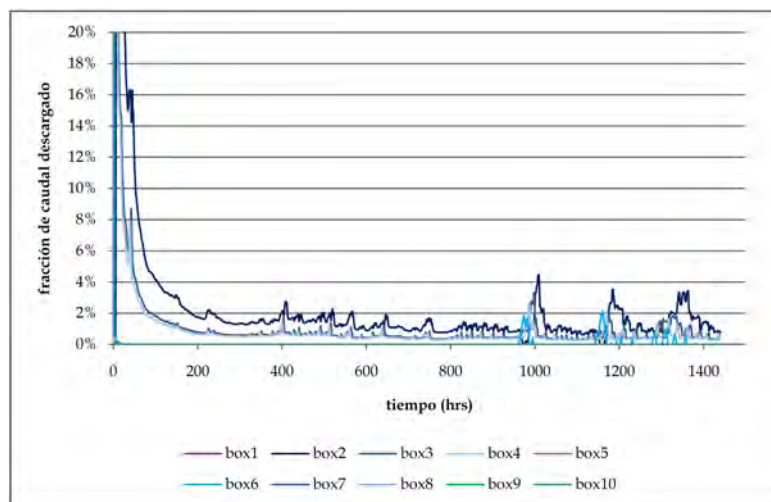
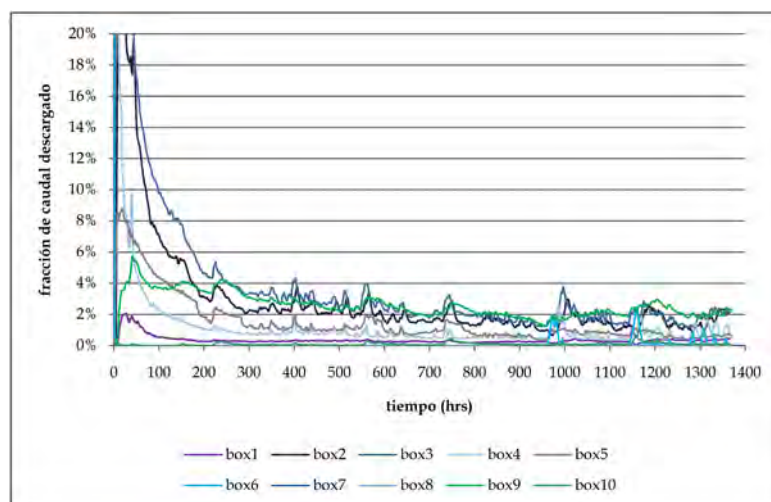


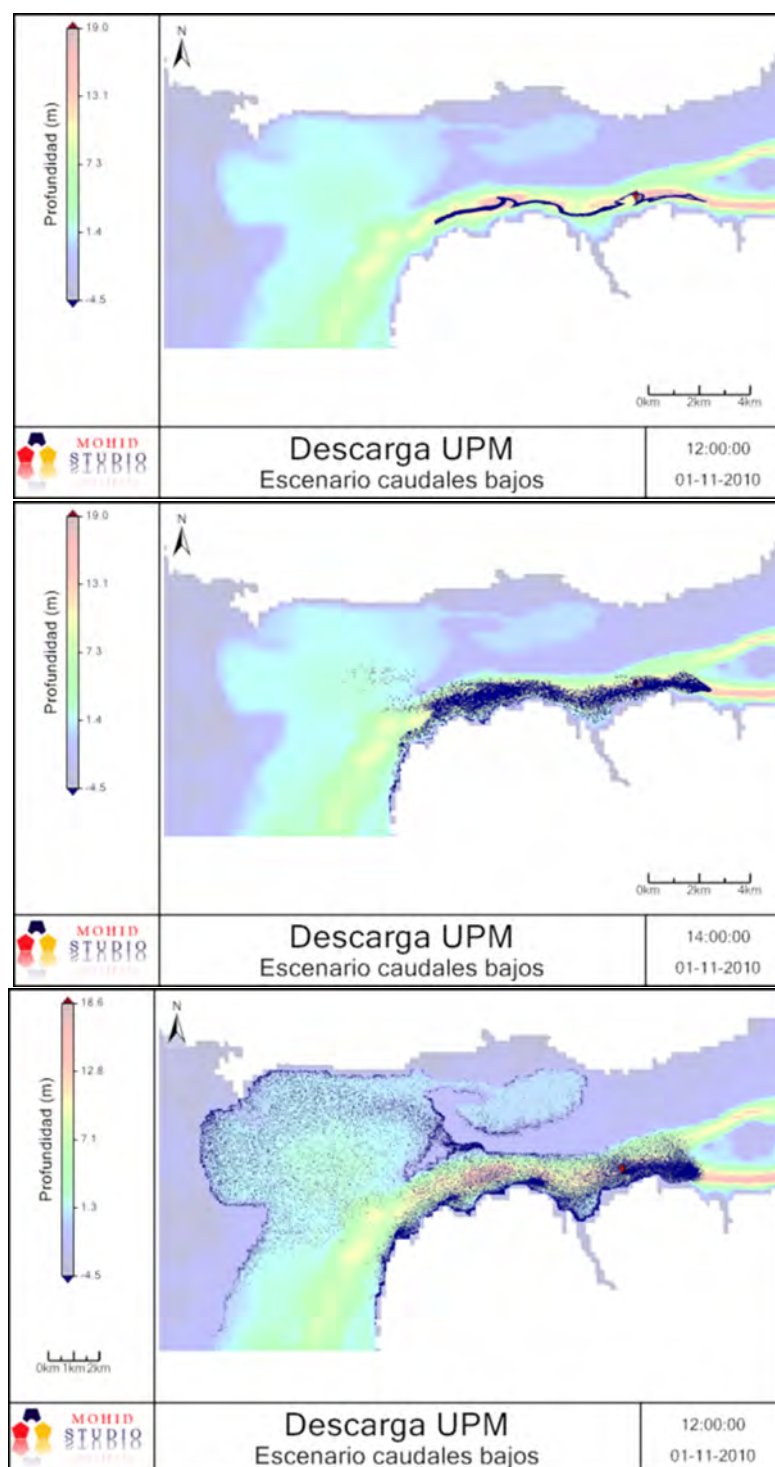
FIGURA 6.33: Resultados de fracción de caudal descargado en los boxes 1 a 10 del dominio, para intensidad de turbulencia de 20 ‰, escenario de caudales bajos



las diferencias en la conformación de la pluma, boxes afectados y fracción de trazador dentro de ellos son sustantivas, principalmente para la configuración de mayor difusión (con coeficiente de turbulencia del 20 ‰).

Si bien no se presentan los resultados obtenidos para el escenario de caudales medios, esos resultados han mostrado mayores valores tanto en la cantidad de efluente presente en los boxes como en las diferencias entre esta última configuración y las otras dos. A pesar que para las dos configuraciones de menor coeficiente se obtiene menor cantidad de trazador respecto al escenario de caudales bajos, en la configuración con coeficiente mayor se obtienen mayores volúmenes de trazador principalmente en los boxes 1, 2, 3 y 5 por la gran acumulación de partículas en la margen uruguaya del río. A partir de esto último se concluye que la configuración con mayor coeficiente de difusión presenta

FIGURA 6.34: Plumas de descarga para las configuraciones con intensidades de turbulencia de 2‰ (superior izquierda), 2 % (superior derecha) y 20 % (inferior), ante inversión de flujo máximo (1/11/2010)



resultados pocos razonables para un cuerpo de tipo fluvial, particularmente considerando las grandes velocidades que presentan. Pues, se espera que a mayor caudal en el sistema se evacúen más partículas del dominio considerado debido a las mayores velocidades (para una misma intensidad de turbulencia). Por lo tanto, se considera que las configuraciones con coeficientes menores (2% y 2%) se sitúan más próximas al comportamiento del río Uruguay, siendo el primero un escenario más exigente.

A diferencia de lo que sucede para mayores caudales, y por lo tanto mayores velocidades de flujo, que colaboran con la evacuación de partículas, los eventos de inversión de flujo que alcancen el *Martillo* o aguas arriba de éste, favorecen el ingreso de partículas a dicha bahía. Asimismo, inversiones intensas ocasionan una inversión en la dirección de la pluma de descarga, extendiéndose ésta para caudales del orden de $2700\text{m}^3/\text{s}$ por casi 5km , transitando por el brazo uruguayo contiguo a la isla Abrigo. Ante este escenario, para una intensidad de turbulencia de un 2% , la inversión de la dirección de la pluma puede mantenerse por 1.5 días y restablece su comportamiento en el dominio considerado luego de unos 3.4 días. Para una intensidad de 2% los efectos de la inversión son algo menores, en tanto la pluma se mantiene por 1.1 días y tarda en restablecer su comportamiento en el dominio unos 1.8 días.

Las diferencias detectadas en la repercusión que tienen diferentes valores del coeficiente de dispersión del modelo remarcan la importancia de calibrarlo con datos de monitoreo adecuados, a los efectos de obtener resultados utilizables para diagnosticar la situación real. A tales efectos podría plantearse la ejecución de una serie de pruebas con algún trazador conservativo y de buen contraste respecto de la concentración de base en el curso, estableciendo una descarga constante desde la ubicación del emisario de UPM y realizando simultáneamente un seguimiento de las condiciones de calidad en el río. Dicha descarga debiera ser mantenida por un tiempo lo suficientemente largo como para alcanzar un régimen establecido bajo la condición hidrodinámica existente, de modo de obtener mediciones de concentración de la sustancia vertida en puntos de monitoreo tanto en el cauce principal como en las bahías del arroyo Yaguareté y del Martillo. La instalación de puntos de control en dichas bahías colaborarían en entender el comportamiento de la pluma de descarga ante eventos de inversión de flujo. A lo largo del cauce principal del río, se podría priorizar la instalación de puntos de control aproximadamente en las siguientes zonas: uno de ellos en el canal principal unos 3km aguas arriba de la descarga de UPM y tres puntos de control ubicados sobre dos transectas situadas no más allá de 5 y 10km aguas abajo de la descarga de UPM respectivamente, cubriendo la margen argentina, la margen uruguaya y el canal principal. Los puntos de monitoreo debieran efectuar las mediciones con una frecuencia de 6 horas o menor (recordar que la frecuencia de marea es de unas 12 horas).

Capítulo 7

Conclusiones Generales

Los capítulos precedentes describen la metodología utilizada para la obtención de un modelo hidrodinámico del río Uruguay y una primera aproximación al transporte de sustancias descargadas por la planta de celulosa de gran porte UPM.

El resultado obtenido es un modelo hidrodinámico bidimensional integrado en la vertical del río Uruguay para el tramo comprendido entre la Represa Salto Grande y Nueva Palmira, con especial énfasis en el ajuste en la zona aledaña a la planta UPM. Dicho modelo, previa identificación y análisis de variables de ajuste, se calibró y validó para escenarios de caudales bajos, medios y altos utilizando principalmente registros de niveles horarios en Fray Bentos, complementados con registros en Paysandú y en algunos casos en Boca Gualeguaychú. El ajuste del modelo para los escenarios de caudales medios y bajos, que son los de mayor relevancia en cuanto a transporte de contaminantes por inducir mayores concentraciones en el medio receptor, resultó adecuado.

Antes de efectuar la calibración del modelo, se buscó identificar cuánto influyen ciertas variables en la configuración del mismo de modo de poder contemplar las más significativas en su configuración final. Se analizó la repercusión de los aportes de caudal del río Negro y Gualeguaychú, la influencia del viento y variaciones en la batimetría. De ello se destaca particularmente el efecto del viento sobre el comportamiento hidrodinámico del río, que puede resultar muy significativo para el tramo inferior (entre Nueva Palmira y 12km aguas arriba de la planta UPM). Para la condición de caudales bajos, un campo uniforme de viento del sudeste (con intensidad extrema de 20m/s) conlleva un incremento notorio en las zonas de recirculación, mayor diferenciación entre el comportamiento del canal principal y las zonas someras y una mayor ocurrencia de eventos de inversión de flujo tanto en duración como en extensión. Estos efectos ocurren en función de la permanencia y magnitud de los vientos, por lo que sería conveniente incorporar en futuros estudios la condición de borde de viento a partir de mediciones en la zona, que

permita analizar en más detalle la repercusión del viento en el campo de velocidades del río.

En este trabajo, el modelo reproduce dos características del sistema previamente advertidas por bibliografía. La primera de ellas refiere a la influencia de la marea proveniente del Río de la Plata en el río Uruguay (Ecometrix, 2006, Ibáñez, 1978, entre otros): la propagación de la marea con inversión de corrientes puede llegar hasta Fray Bentos, e inclusive en algunos casos hasta Paysandú, dependiendo la magnitud de ese efecto (en ocurrencia y duración) del nivel en Nueva Palmira y de los caudales en tránsito. Por ejemplo, niveles en Nueva Palmira de tan solo 1.65m respecto al cero Wharton junto con caudales bajos erogados por la Represa ocasionan inversiones de flujo que alcanzan hasta Paysandú. La segunda característica concierne a la identificación de comportamientos bien diferenciados entre el canal principal del río y las zonas costeras, siendo estas últimas zonas de menor renovación, como se advierte en CARU (1994). Estos comportamientos diferenciados se observan particularmente ante inversiones parciales de flujo, esto es cuando ocurre inversión de flujo en las zonas someras del río (a los laterales del canal principal) mientras que el canal funciona como una pared impermeable que no permite intercambios en la dirección transversal a la dominante.

Si bien se efectuó un análisis hidrológico con el fin de determinar escenarios extremos a contemplar en la calibración y validación del modelo hidrodinámico, con la intención de abarcar un amplio rango de eventos hidrológicos, se advierte que el análisis realizado no ha incluido los registros de niveles de Nueva Palmira, lo que puede implicar que no se estén considerando las situaciones más comprometidas debido al efecto de marea para el transporte de contaminantes. Por ejemplo, BOTNIA (s.f.) consideró para el diseño de su emisario el mes enero del 2000 como el más crítico, que presenta niveles en Fray Bentos entre 1.6 y 4.8m respecto al cero Wharton, en cambio, los períodos seleccionados en este trabajo disponen de valores máximos de nivel en Fray Bentos de 2.62 y 4.38m para los escenarios de caudales bajos y medios respectivamente.

Los resultados de la configuración definitiva del modelo en la sección Fray Bentos son buenos para caudales bajos y medios, pero ante caudales altos se obtienen niveles mayores a los registrados y un desfase temporal de algunos datos de niveles respecto a los datos reales, mostrando aceleramiento del flujo en algunos casos y enlentecimiento en otros. En la sección Paysandú tampoco se observan resultados satisfactorios para caudales altos. Estos apartamientos podrían deberse a errores en la batimetría asociados a las simplificaciones adoptadas para la conformación del modelo, particularmente en el tramo comprendido entre Paysandú y la Represa y/o en el delta aluvial. En tal sentido, se presume que una mejora en la configuración a lo largo del tramo del río en el delta aluvial y sus planicies podría colaborar en la mejora de los resultados, por lo cual para

futuros estudios se recomienda reducir las simplificaciones adoptadas a lo largo del cauce y mejorar la calidad de la información batimétrica a lo largo y ancho de todo el río, que da soporte a la modelación.

Una vez calibrado y validado el modelo, se analizó el transporte de contaminantes y los tiempos de residencia en la zona aledaña a la descarga de la planta UPM. Debido a la heterogeneidad del río a la altura de dicha descarga, se definieron zonas en función de su morfología y profundidades, donde los tiempos de residencia varían según las condiciones hidrodinámicas en el instante en que sucede el vertido y las características de la zona de análisis.

El cauce principal del río es la zona que presentó menores valores y rangos más acotados de tiempos de residencia, aunque es también la que experimenta mayor afectación en ellos debido a las inversiones, pues es donde las velocidades de flujo resultan mayores. Durante condiciones normales las partículas son rápidamente evacuadas, pero durante la inversión de flujo las partículas pueden retroceder mayores distancias y de forma más rápida que en las zonas someras adyacentes, de modo que mayor porcentaje de partículas reingresa a las zonas donde fueron originadas y se incrementa el tiempo de residencia.

La morfología del cauce principal del río incide también en los tiempos de residencia resultantes. Es así que para la zona inmediata a la descarga de UPM se obtienen los menores tiempos de residencia, en tanto para la zona aledaña a Fray Bentos son mayores que en la anterior y menores a los del área comprendida entre ésta y el balneario Las Cañas.

Por el contrario, las zonas no comprendidas en el cauce principal del río Uruguay presentan, por diversas razones, tiempos de residencia más elevados. En el caso de la bahía contigua a la desembocadura del arroyo Yaguareté, el gradiente de velocidades entre la bahía y el canal del río es el que dificulta la salida de partículas de la misma. Para el caso de la bahía del *Martillo* son aún más elevados, debido a su mayor extensión y porque evacúa partículas tanto para la laguna adyacente (particularmente ante eventos de inversión de flujo) como para hacia aguas abajo (recostándose al margen izquierdo del río en situación de flujo normal del río). Por último, la laguna contigua al *Martillo* presenta gran dificultad para la renovación de agua, de modo que si un contaminante ingresa a la misma permanecerá allí por mucho tiempo si no es degradado por ningún mecanismo. No obstante, corresponde acotar que la batimetría de la laguna ha sido asumida a partir de muy escasa información, por lo que el comportamiento allí de las partículas podría no estar del todo bien representado.

Finalmente se analizó el comportamiento de la pluma de descarga de la planta UPM, con la simulación de una descarga puntual continua de un trazador pasivo. Como no

fue posible ajustar el coeficiente de dispersión del modelo a través de mediciones in-situ, se adoptó una intensidad de turbulencia del 2 % y se complementó el estudio con un análisis de sensibilidad del modelo para valores de intensidad del 2 % y 20 %.

Los resultados obtenidos para el caso de intensidad de turbulencia 2 % (entendido como el caso más representativo de las condiciones existentes en la zona) muestran que la pluma de descarga, en general, se desarrolla a lo largo del canal principal desde el punto de descarga hacia aguas abajo y que solamente algunas partículas se desprenden de la pluma y son desplazadas hasta la margen uruguaya. El tramo inicial de la pluma es muy confinado, evitando así el ingreso de partículas en la bahía del arroyo Yaguareté en condiciones normales de flujo, sin perjuicio de lo cual -a medida que las mismas se desplazan hacia aguas abajo- incrementan su dispersión progresivamente ocasionando inclusive que algunas alcancen la orilla uruguaya y se mantengan allí por un largo tiempo.

Para situaciones de caudales medio-bajos, en el tramo del río comprendido entre Fray Bentos y Las Cañas la fracción de effluente retenido se incrementa en un orden respecto a aquella resultante en la zona ubicada inmediatamente aguas abajo de la descarga de UPM. Mayores caudales, y por lo tanto mayores velocidades de flujo, favorecen la evacuación de partículas. Por el contrario, eventos de inversión de flujo que alcancen el *Martillo* o aguas arriba de éste favorecen la permanencia o el reingreso de partículas hacia la zona aledaña a la descarga.

Ante situaciones de inversión de flujo la pluma sufre una compresión con un incremento en su ondulación, llegando a producirse una inversión en la dirección de la pluma de descarga en ocasión de inversiones de flujo intensas. En esos casos el tramo inicial de la pluma se extiende hacia aguas arriba, desarrollándose por el brazo uruguayo contiguo a la isla Abrigo y pudiendo mantenerse la inversión de la dirección por un tiempo de entre 1 y 2 días, tardando aproximadamente el doble de este tiempo en restablecer las condiciones normales de la pluma.

También inversiones intensas pueden ocasionar el ingreso de partículas a las bahías. El ingreso de partículas a la bahía del *Martillo* se sucede ante inversiones de flujo que se desarrollen hasta ella, en tanto las partículas pueden ingresar en la bahía del arroyo Yaguareté cuando las inversiones alcanzan al menos la sección de Fray Bentos. Las partículas que ingresan a dichas bahías pueden ser evacuadas ante períodos suficientes de escurrimientos positivos de flujo, aunque en general los tiempos que demoran en salir son de mayor magnitud que el tiempo que tarda la pluma en restablecerse. Igualmente, los cambios rápidos en el sentido del flujo favorecen el desprendimiento de partículas de la pluma, de forma que éstas pueden ingresar a la bahía del *Martillo* y luego, una vez que el flujo positivo es restablecido, ser evacuadas por las zonas someras del río ubicadas sobre la margen argentina.

Las diferencias detectadas en la incidencia que tienen diferentes valores del coeficiente de dispersión del modelo remarcan la importancia de calibrarlo con datos de monitoreo adecuados. Por ello, a efectos de poder efectuar un diagnóstico preciso de la situación real, debieran ajustarse los coeficientes de difusión con medidas reales y así precisar el comportamiento de la pluma de descarga de UPM y también los tiempos de residencia, particularmente los correspondientes a zonas que no pertenecen al canal principal del río. Para tal propósito sería conveniente disponer de puntos de monitoreo tanto en el cauce principal como en las bahías del arroyo Yaguareté y del *Martillo*, y medir -en todos ellos y bajo una misma condición hidrodinámica- la concentración de un parámetro conservativo.

Bibliografía

- A.J. Abascal, S. Castanedo, V. Fernández, y R. Medina. Backtracking drifting objects using surface currents from high-frequency (HF) radar technology. *Ocean Dynamics*, 62:1073–1089, 2012.
- W. T. Abtew. El Niño–Southern Oscillation link to South Florida hydrology and water management applications. *Water Resources Management*, 24:4255–4271, 2010.
- P. Aceituno. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part 1: surface climate. *Monthly Weather Review*, 116:505–524, 1988.
- P. Aceituno. Anomalías climáticas en la región sudamericana durante los extremos de la Oscilación Austral. *Revista Geofísica*, 32:65–78, 1990.
- P. Aceituno, M. Prieto, M. Solari, A. Martínez, G. Poveda, y M. Falvey. The 1877–1878 El Niño episode: associated impacts in South America. *Climatic Change*, 92:389–416, 2009.
- F. Aikman III y L.W.J. Lanerolle. Report on the National Ocean Service Workshop on residence/flushing times in bays and estuaries. Technical report, Office of Coast Survey, NOAA, 2004. Reporte técnico.
- M. Aitken. Impact of agricultural practices and river catchment characteristics on river and bathing water quality. *Water Science and Technology*, 10(48):217–224, 2003.
- M. Aitken, D.W. Merrilees, y A. Duncan. Impact of agricultural practices and catchment characteristics on Ayrshire bathing waters. Technical report, Scottish Executive Central Research Unit, Environment Division SAC, Auchincruive, 2001.
- R.B. Alexander, R.A. Smith, y G.E. Schwarz. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico. *Nature*, 403:758–761, 2000.
- Algoritmos. Modelación del comportamiento hidrodinámico del río Uruguay y la calidad de agua asociada al funcionamiento de las fábricas de celulosa ENCE y BOTNIA, 2006. Accedido a través de DINAMA.

- M. Ali y T.R. Sreekrishnan. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Advances in Environmental Research*, 5:175–196, 2001.
- J.D. Allan y M.M. Castillo. *Stream Ecology Structure and function of running waters*. Springer, Holanda, 2007.
- C.M. Allen. Numerical simulation of contaminant dispersion in estuary flows. *Proceedings of Royal Society London*, 381:179–194, 1982.
- E.C. Ani, S. Wallis, A. Kraslawski, y P. Serban Agachi. Development, calibration and evaluation of two mathematical models for pollutant transport in a small river. *Environmental Modelling & Software*, 24:1139–1152, 2009.
- R.C. Antweiler, J.H. Writer, y S.F. Murphy. Evaluation of wastewater contaminant transport in surface waters using verified Lagrangian sampling. *Science of the total environment*, 470-471:551–558, 2014.
- I. Ascione Kenov, A.C. García, y R. Neves. Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106:13–22, 2002.
- M.Z. Azrina, C.K. Yap, A. Rahim Ismail, A. Ismail, y S.G. Tan. Anthropogenic impacts on the distribution and biodiversity of benthic macroinvertebrates and water quality of the Langat River, Peninsular Malaysia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 64:337–347, 2006.
- J.O. Backhaus y D. Hainbucher. *A Finite Difference General Circulation Model for Shelf Sea and its Applications to Low Frequency Variability on the North European Shelf*, volume 45, pages 221–244. Elsevier Oceanography Series, 1987.
- C.F. Balseiro, P. Carracedo, B. Gómez, P. Leitão, P. Montero, L. Naranjo, E. Penabad, y V. Pérez-Muñuzuri. Tracking the prestige oil spill: An operational experience in simulation at MeteoGalicia. *Weather*, 58:452–458, 2003.
- I. Barreto, P. Ezzatti, y M. Fossati. Estudio inicial del modelo MOHID. Technical report, PEDECIBA Informática, 2009. Reporte Técnico RT 09-10.
- I. Barreto, P. Ezzatti, y M. Fossati. Inclusión de estrategias de paralelismo al MOHID. Technical report, PEDECIBA Informática, 2011. Reporte Técnico RT 11-10.
- M. Benedini y G. Tsakiris. *Water Quality Modelling for Rivers and Streams*. Springer, 2013. Water Science and Technology Library. Volumen 70.
- B.D.L. Bernardes. Hydrodynamical and ecological modelling of the North Sea. Master's thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2007.

- A. Beyene, T. Addis, D. Kifle, W. Legesse, H. Kloos, y L. Triest. Comparative study of diatoms and macroinvertebrates as indicators of severe water pollution: Case study of the Kebena and Akaki rivers in Addis Ababa, Ethiopia. *Ecological indicators*, 9: 381–392, 2009.
- N. Binsomprasong. Biocatalysis of lignin and COD in pulp and paper mill effluent using immobilized symbiotic fungal *Mycella*. Master's thesis, Universidad del Estado de Pennsylvania, 2007.
- S.H. Blair y J.F. Atkinson. Effect of flow diversions on contaminant transport modeling in the Niagara River. *J. Great Lakes Res*, 19(1):83–95, 1993.
- A.F. Blumberg, D.J. Dunning, L. Honghai, D. Heimbuch, y W.R. Geyer. Use of a particle-tracking model for predicting entrainment at power plants on the Hudson River. *Estuaries*, 27(3):515–526, 2004.
- BOTNIA. Informe Ambiental Resumen, 2004.
- BOTNIA. Capítulo 5: Características del ambiente receptor, s.f. Informe incorporado durante la tramitación de la Autorización Ambiental Previa realizada por DINAMA.
- BOTNIA. Proyecto BOTNIA. Informe adicional del EIA de marzo 2006, s.f.a. Informe incorporado durante la tramitación de la Autorización Ambiental Previa realizada por DINAMA.
- BOTNIA. Proyecto BOTNIA. Estudios de la pluma del emisario y estudios sedimentológicos, s.f.b. Informe incorporado durante la tramitación de la Autorización Ambiental Previa realizada por DINAMA.
- A. Bottacin-Busolin, A. Marion, T. Musner, M. Tregnaghi, y M. Zaramella. Evidence of distinct contaminant transport patterns in rivers using tracer tests and a multiple domain retention model. *Advances in Water Resources*, 34:737–746, 2011.
- M. Bougeard, J.C. Le Saux, N. Pérenne, S.F. Le Guyader, y M. Pommepey. Modeling of faecal contamination in water from catchment to shellfish growing area, 2009. URL <http://archimer.ifremer.fr/doc/00066/17748/15270.pdf>. Consultado: 3 de agosto de 2014.
- F. Braunschweig, F. Martins, P. Chambel, y R. Neves. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*, 53(3): 137–145, 2003.
- F. Braunschweig, P. Chambel, L. Fernandes, P. Pina, y R. Neves. The object-oriented design of the integrated modelling system MOHID, 2004. Computational Methods in Water Resources International Conference, Chapel Hill.

- H. Bu, J. Wan, Y. Zhang, y W. Meng. Spatial characteristics of surface water quality in the Haicheng River (Liao River basin) in Northeast China. *Environ Earth Science*, 70:2865–2872, 2013.
- H. Burchard, K. Bolding, y M.R. Villarreal. GOTM, a General Ocean Turbulence Model. Theory, implementation and test cases. Report EUR18745 EN.
- Bureau of Meteorology. Australian Government. About ENSO monitoring graphs, s.f. URL <http://www.bom.gov.au/climate/enso/indices/about.shtml>. Consultado el 22 de marzo de 2013.
- U. Callies, A. Plüß, J. Kappenberg, y H. Kapitzka. Particle tracking in the vicinity of Helgoland, North Sea: a model comparison. *Ocean Dynamics*, 61:2121–2139, 2011.
- L.A. Camacho y R.A. González. Calibration and predictive ability analysis of longitudinal solute transport models in mountain streams. *Environ Fluid Mech*, 8:597–604, 2008.
- F.J. Campuzano Guillén, J.H. Allen, y T. Scott. The numerical modelling of ecosystem response to nutrients: Application to the Scheldt Estuary and plume, 2004.
- L. Cancino y R. Neves. Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems Part II: Application to the Western Scheldt and Gironde estuaries. *Journal of Marine Systems*, 22(2-3):117–131, 1999.
- T. Caplow, P. Schlosser, y D.T. Ho. Tracer study of mixing and transport in the Upper Hudson River with multiple dams. *Journal of Environmental Engineering*, 130(12), 2004.
- J. Cardini y A. Zabalett. Evaluación del impacto transfronterizo de las descargas cloacales en el Río Uruguay. Tramo Colón – Paysandú – Concepción del Uruguay. *Revista AIDIS Argentina, Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (86):82–90, 2006. Facilitado por J. Cardini.
- J. Cardini, E. Meier, A. Zabalett, y Marsico. D. Pronóstico de corto plazo de niveles del río Uruguay orientado a la mejora de la navegación, 2004a. URL <http://www.utn.edu.ar/secretarias/scyt/publicfrcu.utn>. XVII Congreso Nacional del Agua, II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. 3 al 7 de Agosto de 1998. Consultado el 23 de junio de 2014.
- J. Cardini, E. Meier, A. Zabalett, y Marsico. D. Efecto de los coeficientes de dispersión sobre la modelación bidimensional del transporte de contaminantes. Caso de estudio. *Mecánica Computacional*, XXIII, 2004b. Facilitado por J. Cardini.

- J. Cardini, E. Meier, A. Zabalett, y Marsico. D. Modelación de la contaminación bacteriológica del río Uruguay en el tramo Concordia – Colón, 2007a. CONAGUA 2007, XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán 15 al 19 de Mayo de 2007. Facilitado por J. Cardini.
- J. Cardini, E. Meier, A. Zabalett, y Marsico. D. Modelación de la contaminación bacteriológica en el río Gualaguaychú en condiciones de sudestada, 2007b. CONAGUA 2007, XXI Congreso Nacional del Agua, Tucumán 15 al 19 de Mayo de 2007. Facilitado por J. Cardini.
- Centro de Estudios Limnológicos Aplicados. Establecimiento de una línea de base de las comunidades de fitoplancton, zooplancton y bentos en el Río Uruguay (desde Nuevo Berlín a Las Cañas), depto. Río Negro - Uruguay, 2006.
- P.A. Chambers, A.R. Dale, G. J. Scrimgeour, y M.L. Bothwell. Nutrient enrichment of northern rivers in response to pulp mill and municipal discharges. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 8:53–66, 2000.
- T.S. Cheon, B.A. Younis, y I.W. Seo. Estimation of key parameters in model for solute transport in rivers and streams. *Water Resour Manage*, 21:1165–1186, 2007.
- D.A. Chin. Water-quality engineering in natural systems, 2006.
- V. T. Chow. *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw Hill Inc, Nueva York, 1959.
- H. Ciappesoni y P. Salio. Pronóstico de Sudestadas en el Río de la Plata Meteorologica. *J. Climate*, 22(2):67–81, 1997.
- Climate Prediction Center. Frequently asked questions regarding CPC's current monthly atmospheric and SST index values, s.f. URL <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/Readme.index.shtml>. Consultado el 14 de julio de 2012.
- H. Coelho, R.J. Neves, M. White, P.C. Leitão, y A.J. Santos. A circulation model for western Iberia. *Water Resour Manage*, 2001.
- A.G. Colodey y P. G. Wells. Effects of pulp and paper mill effluents on estuarine and marine ecosystems in Canada: a review. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1: 201—226, 1992.
- Comisión Administradora del Río Uruguay. Carta del Río Uruguay, 1983. URL http://www.saltogrande.org/pdf/Carta_del_Rio_Uruguay_2.pdf.
- Comisión Administradora del Río Uruguay. Tema E Contaminación, 1986. URL http://www.caru.org.uy/web/sub_calidad_aguas/digestotemacontaminacion.pdf. Digesto sobre el uso y aprovechamiento del Río Uruguay.

- Comisión Administradora del Río Uruguay. Siete años de estudios en calidad de aguas en el río Uruguay, Mayo 1994.
- Comisión Administradora del Río Uruguay. Tercer seminario sobre calidad de las aguas y contaminación, 2001. 29 y 30 de Noviembre.
- Comisión Administradora del Río Uruguay. Ábacos de pronóstico de niveles para el río Uruguay. In *Plan de Protección Ambiental del Río Uruguay*, 2003a.
- Comisión Administradora del Río Uruguay. Calidad de las aguas del curso principal y puntos críticos del río Uruguay. Informe Técnico 2003, 2003b.
- Comisión Adminsitradora del Río Uruguay. URL <http://www.caru.org.uy/>. Consultado el 30 de junio de 2014.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. Salto Grande: un símbolo de unión entre dos países, s.f.a. URL <http://www.saltogrande.org/f>. Consultado el 2 de febrero de 2014.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. Informe hidrológico. Valores estadísticos de la serie histórica. "Aportes al embalse". 1898-2000, s.f.b.
- Comisión Técnica Mixta de Salto Grande. Salto Grande: un símbolo de unión entre dos países, s.f.c. URL <http://www.saltogrande.org>. Consultado el 2 de febrero de 2014.
- J.M. Culp, C.L. Podemski, y K.J. Cash. Interactive effects of nutrients and contaminants from pulp mill effluents on riverine benthos. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 8:67—75, 2000.
- J.A. Cunge, F.M. Jr. Holly, y A. Verwey. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman Publishing Limited, Londres, 1980.
- W. Czernuszenko y A. Rylov. Three-dimensional model of flow and mixing processes in open channels, 2005.
- A. de Brauwere, B. de Brye, S. Blaise, y E. Deleersnijder. Residence time, exposure time and connectivity in the Scheldt Estuary, 2010. URL <http://perso.uclouvain.be/sebastien.blaise/pdf/debrauwere2010.pdf>. Consutado: 25 de Julio de 2014.
- M. De Jonge, B. Van de Vijver, R. Blust, y L. Bervoets. Responses of aquatic organisms to metal pollution in a lowland river in Flanders: A comparison of diatoms and macroinvertebrates. *Science of the Total Environment*, 407:615–629, 2008.
- F. De Smedt. Analytical solution and analysis of solute transport in rivers affected by diffusive transfer in the hyporheic zone. *Journal of Hydrology*, 339:29–38, 2007.

Z.Q. Deng y H.S. Jung. Scaling dispersion model for pollutant transport in rivers. *Environmental Modelling & Software*, 24:627–631, 2009.

Diario El Espectador. Documento: Resolución Ministerial 1334/2013 sobre la solicitud de autorización para el aumento de producción de celulosa de la empresa UPM – Uruguay, Febrero 2013. URL <http://www.espectador.com/agro/275202/documento-resolucion-ministerial-1334-2013-sobre-la-solicitud-de-autorizacion-para>. Consultado el 22 de marzo de 2014.

Diario El País. ¿ríos, arroyos o cañadas?, s.f.a. URL <http://viajes.elpais.com.uy/2013/02/20/rios-arroyos-o-canadas/>. Consultado el 30 de junio de 2014.

Diario El País. Informe científico uruguayo dice que planta de UPM no contamina, s.f.b. URL <http://www.elpais.com.uy/informacion/informe-cientifico-uruguayo-dice-que-upm-no-contamina.html>. Consultado el 11 de octubre de 2013.

J.M. Dias, J. Fortes Lopes, y I. Dekeyser. A numerical system to study the transport properties in the Ria de Aveiro lagoon. *Ocean Dynamics*, 53:220–231, 2003.

Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear. Resumen explicativo de campaña de medidas de potencial eólico realizadas en 1990, 1991 por el Ministerio de Industria Energía y Minería, s.f. URL <http://www.energiaeolica.gub.uy/uploads/Reportes%20viento/Campa%C3%B1a%20mediciones%20DNE%201990/Resumen%20explicativo%20mediciones%201990-1991.pdf>. Consultado el 27 de noviembre de 2013.

Dirección Nacional de Medio Ambiente. Resolución Ministerial N° 63/2005 - Autorización Ambiental Previa presentada por las firmas Botnia S.A. y Botnia Fray Bentos S.A., 2005. URL <http://www.mvotma.gub.uy/evaluacion-de-impacto-ambiental/item/10002497.html>. Consultado el 9 de agosto de 2014.

Dirección Nacional de Medio Ambiente. La calidad del agua del Río Uruguay. Technical report, Dirección Nacional de Medio Ambiente, Setiembre 2007. URL <http://www.ici.edu.uy/forestal/dinama.pdf>.

J. Domínguez, J. Borroto, E. Pérez, y A. Hernández. Use of $^{99m}\text{TcO}_4$ and Rhodamine WT as tracers and the mathematical convolution procedure to establish the alarm model in the Almendares River. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 260(2):417–420, 2003.

- C.C. Douglas, M.J. Cole, P. Dostert, Y. Efendiev, Haase G. Ewing, R.E., J. Hatcher, M. Iskandarani, C.R. Johnson, y R.A. Lodder. Dynamically identifying and tracking contaminants in water bodies, 2007. ICCS 2007, Part I, LNCS 4487.
- M. Drago, B. Cescon, y L. Iovenitti. A three-dimensional numerical model for eutrophication and pollutant transport. *Ecological Modelling*, 145:17–34, 2001.
- DRIFTER. HNS, oil and inert pollution: Trajectory modeling and monitoring, Workpackage2: Wind coefficients and model calibration for drifter trajectories simulation with MOHID, 2010. DRIFTER project (ERACCT2005-016165) within the framework of the EU ERA-Net initiative, MeteoGalicia.
- D. Dutta. *Hydrodynamic Dispersion*, pages 793–801. Springer, USA, 2008.
- Ecometrix. Cumulative Impact Study, Uruguay Pulp Mills. Informe preparado para la Corporación Financiera Internacional, Setiembre 2006.
- Ecometrix. Orion Pulp Mill, Uruguay. Monitoreo independiente del desempeño según lo requerido por la Corporación Financiera Internacional. Fase 1: Evaluación previa a la puesta en marcha. Informe preparado para Botnia S.A. , Noviembre 2007.
- Ecometrix. Orion Pulp Mill, Uruguay. Monitoreo independiente del desempeño según lo requerido por la Corporación Financiera Internacional. Fase 2: Evaluación de desempeño ambiental a los seis meses. Informe preparado para Botnia S.A. , Julio 2008.
- Ecometrix. Orion Pulp Mill, Uruguay. Monitoreo independiente del desempeño según lo requerido por la Corporación Financiera Internacional. Fase 3: Evaluación de desempeño ambiental del año de monitoreo 2008. Informe preparado para Botnia S.A. , Marzo 2009.
- Ecometrix. Orion Pulp Mill, Uruguay. Monitoreo independiente del desempeño según lo requerido por la Corporación Financiera Internacional. Fase 4: Evaluación de desempeño ambiental del año de monitoreo 2009. Informe preparado para Botnia S.A., Abril 2010.
- Enciclopedia Británica. Fetch, Junio 2013. URL <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/205479/fetch>.
- ENVIRO Consultores y EBA Estudios Ambientales. Proyecto fábrica de celulosa y energía eléctrica e instalaciones portuarias, Punta Pereira, Colonia, 2007. Accedido a través de DINAMA.
- Environment Canada. National assessment of pulp and paper environmental effects monitoring data: A report synopsis, 2003.

- M. Fernández, P. Santoro, M. Fossati, y I. Piedra-Cueva. Componente hidrodinámica de un modelo pre-operacional para el Río de la Plata, 2009. Primer Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima. Concepción, Chile 30 Septiembre – 02 de Octubre de 2009.
- V.I. Ferronsky y V.A. Polyakov. *Isotopes of the Earth's Hydrosphere*, 2012.
- H.B. Fischer, E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger, y N.H. Brooks. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press, Inc, Londres, 1979.
- M. Fossati y I. Piedra-Cueva. Salinity simulations of the Río de la Plata, 2003.
- M. Fossati y I. Piedra-Cueva. A 3d hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone. *Applied Mathematical Modelling*, 37:1310–1332, 2013.
- M. Fossati, P. Santoro, M. Fernández, P. Ezzatti, y I. Piedra-Cueva. *Development of a Río de la Plata water level height forecasting system based on the mohid water modelling tool*, pages 27–40. IST Press, 2013.
- Fundación Torcuato Di Tella. Argentina: 2a comunicación de cambio climático - Vulnerabilidad de la zona costera, 2005. Informe Final.
- M.M. Gagnon, D. Bussi eres, P.V. Hodson, y J.J. Dodson. Secondary and tertiary stress responses to bkme exposure inthe St. Maurice River fish populations. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 7:247–257, 2000.
- J.F. Garten, C.E. Schemm, y A.R. Croucher. Modeling the transport and dispersion of airborne contaminants: a review of techniques and approaches. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 24(4), 2003.
- M. Gavrilescu, K. Demnerova, J. Aamand, S. Agathos, y F. Fava. Emerging pollutants in the environment: present and future challenges in biomonitoring, ecological risks and bioremediation. *New Biotechnology*, 00(00), 2014.
- M. Gomez-Gesteira, P. Montero, R. Prego, J.J. Taboada, P. Leit ao, M. Ruiz-Villareal, R. Neves, y V. Perez-Villar. A two-dimensional particle tracking model for pollution dispersion in A Corufia and Vigo Rias (NW Spain). *Oceanologica Acta*, 22(2), 2009.
- N.D. Goodhue. Hydrodynamic and water quality modelling of the lower Kaituna river and Maketu estuary. Master's thesis, University of Waikato, 2007. URL <http://waikato.researchgateway.ac.nz/>. Consultado el 3 de marzo de 2013.
- I. Guymer. Longitudinal dispersion in sinuous channel with changes in shape. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(1):33–40, 1998.

- S. Hales, S. Kovats, y A. Woodward. What El Niño can tell us about human health and global climate change. *Global Change & Human Health*, 1(1), 2000.
- B.G. Hankin y K.J. Beven. Modelling dispersion in complex open channel flows: Equifinality of model structure (1). *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 12:377–396, 1998.
- B.D. Hicks y J.W. De Witt. Effects of dissolved oxygen on kraft pulp mill effluent toxicity. *Water Research Pergamon Press*, 5:693–701, 1971.
- F.M. Ibáñez. *Historia de Salto Grande*. Editorial de la Mesopotamia, Santa Fé, Argentina, 1978.
- Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Informe Final PDT SC_O_P_70.01: Modelo pre-operacional del Río de la Plata-Río Uruguay, 2008. Proyecto de Desarrollo Tecnológico. Uruguay.
- Instituto Nacional del Agua. Análisis del régimen hidrológico de los ríos Uruguay y Paraná, 2002. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Ezeiza, Argentina.
- Instituto Superior Técnico. Lagrangian Module. User Guide, 2009. Curso MOHID.
- Integrated Pollution Prevention and Control. Reference document on Best Available Technologies (BREF) in pulp and paper industry, December 2001. URL <http://eippcb.jrc.es>.
- J. Iriondo y H. Kröhling. *Cambios ambientales en la Cuenca del río Uruguay: desde dos millones de años hasta el presente*. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina, primera edición edition, 2008.
- C.K. Jain. A hydro-chemical study of a mountainous watershed: the Ganga, India. *Water Research*, 36:1262–1274, 2002.
- G. Jamett. Evaluación del concepto caudal ecológico para alcanzar la conservación de ecosistemas lóticos. Master's thesis, Universidad de Chile, 2005.
- L.L. Janiot y D.A. Molina. Características fisicoquímicas del Río Uruguay en su curso inferior, 2001. Tercer seminario sobre calidad de aguas y contaminación. 29 y 30 de Noviembre.
- Z.G. Ji. *River Fate and Transport*, page 219–241. Springer, Nueva York, 2012.
- C. Jingsheng, Y. Tao, y E. Ongley. Influence of high levels of total suspended solids on measurement of COD and BOD in the Yellow River, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 116:321–334, 2006.

- G. Jirka y D.R.F. Harleman. The mechanics of submerged multiport diffusers for buoyant discharges in shallow water, 1973.
- G.H. Jirka y V. Weitbrecht. *Mixing models for water quality management in rivers: continuous and instantaneous pollutant releases*, page 1–34. Springer New York, 2005.
- H.E. Jobson. Prediction of traveltime and longitudinal dispersion in rivers and streams: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96–4013, 1996. URL <http://pubs.usgs.gov/of/1996/4013>.
- P.Y. Julien. *River Mechanics*. Cambridge University Press, 2002.
- K. Kachiashvili, D. Gordeziani, R. Lazarov, y D. Melikdzhanian. Modeling and simulation of pollutants transport in rivers. *Applied Mathematical Modelling*, 31:1371–1396, 2007.
- M.B. Kalinowska, P.M. Rowiński, J. Kubrak, y D. Mirosław. Scenarios of the spread of a waste heat discharge in a river – Vistula River case study. *Acta Geophysica*, 60(1): 214–231, 2012.
- P.R. Kannel, S. Lee, Y.S. Lee, S.R. Kanel, y S.P. Khan. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132:93–110, 2007.
- G. Kim, E. Choi, y D. Lee. Diffuse and point pollution impacts on the pathogen indicator organism level in the Geum River, Korea. *Science of the Total Environment*, 350: 94–105, 2005.
- T. Kim, C. Yoo, y J.B. Valdés. Nonparametric approach for estimating effects of ENSO on return periods of droughts. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7(5):629–636, 2003.
- N.T. Kim Oanh. A comparative study of effluent toxicity for three chlorine-bleached pulp and paper mills in Southeast Asia. *Resources, Conservation and Recycling*, 18: 87–105, 1996.
- N.T. Kim Oanh, B.E. Bengtsson, L. Reuterghrdh, P.A. Bergqvist, P.A. Hynning, y M. Remberger. Levels of contaminants in effluent, sediment, and biota from Bai Bang, a bleached kraft pulp and paper mill in Vietnam. *Arch. Environ. Contam. Toxicol*, 29:506–516, 1995.
- N.T. Kim Oanh, B.E. Bengtsson, L. Bætz Reutergårdh, D.T. Hoa, P.A. Bergqvist, D. Broman, y Y. Zebühr. Persistent organochlorines in the effluents from a chlorine-bleached kraft integrated pulp and paper mill in Southeast Asia. *Arch. Environ. Contam. Toxicol*, 39:303–309, 1999.

- M.V. Kind. Desplazamiento del frente de salinidad del Río de la Plata debido al aumento del nivel del mar, 2004. Engineering degree's thesis.
- W.K.H. Kinzelbach. Methods for the simulation of pollutant transport in ground water, a model comparison. In *Proc. solving ground water problems with models*, 1987.
- P.K. Kitanidis. Particle-tracking equations for the solution of the advection-dispersion equation with variable coefficients. *Water Resources Research*, 30(11):3225–3227, 1994.
- H. Kobori, Y.S. Ham, y T. Saito. Influence of treated sewage effluent on organic pollution assessment in the Sakai River basin in Central Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151:243–249, 2009.
- D.L. Kramer. Dissolved oxygen and fish behavior. *Environmental Biology of Fishes*, 18(2):81–92, 2009.
- J. Krohn y K.C. Duwe. Mathematical modelling of hydrodynamics in the Elbe Estuary. *Coastal and Estuarine Studies*, 36, 1992.
- I. Kuhnel y L. Coates. El Niño-Southern Oscillation: related probabilities of fatalities from natural perils in Australia. *Natural Hazards*, 22:117–138, 2000.
- A.Y. Kumar y M.V. Reddy. Assessment of seasonal effects of municipal sewage pollution on the water quality of an urban canal—a case study of the Buckingham canal at Kalpakkam (India): NO₃, PO₄, SO₄, BOD, COD and DO. *Environmental Monitoring and Assessment*, 157:223–234, 2009.
- U. Kunkel y M. Radke. Fate of pharmaceuticals in rivers: Deriving a benchmark dataset at favorable attenuation conditions. *water research*, 46:5551–5565, 2012.
- Laboratorio Tecnológico del Uruguay. Estudio de las comunidades de fitoplancton, zooplancton y macrozoobentos en el tramo inferior del Río Uruguay (Nuevo Berlín, Fray Bentos y Las Cañas), 2007. Informe de Asesoramiento.
- G. Larenze, C.S. Loschacoff, J.D. Brea, A. Arcelus, y E. Lorenzo. Modelación matemática del río Uruguay, 1998. XII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe, Argentina.
- W.G. Large y S. Pond. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Ocean.*, 11:324–336, 1981.
- A. Latorre, A. Malmqvist, S. Lacorte, Welanders T., y D. Barceló. Evaluation of the treatment efficiencies of paper mill whitewaters in terms of organic composition and toxicity. *Environmental Pollution*, 147:648–655, 2007.

- M.E. Lee y I.W. Seo. Analysis of pollutant transport in the han river with tidal current using a 2D finite element model. *Journal of Hydro-Environment Research*, 1:30–42, 2007.
- J. Leendertse y S. Liu. *A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems*, pages 387–405. Elsevier, Amsterdam, 1978.
- P. Leitão. Modelo de dispersão lagrangeano tridimensional. Master's thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 1996.
- P. Leitão. *Integração de Escalas e Processos na Modelação do Ambiente Marinho*. PhD thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2002.
- P. Leitão, H. Coelho, Santos A., y R. Neves. Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: a downscaling approach. *Journal of Atmospheric & Ocean Science*, 10(4):421–462, 2005.
- E. Lorenzo, M. Mena, y L. Teixeira. Modelo matemático del río Uruguay. Primer Informe de avance, 1998a. Proyecto CSIC-DNH de vinculación con el sector productivo.
- E. Lorenzo, L. Teixeira, y M. Mena. Modelación hidrosedimentológica del río Uruguay, 1998b. XII Congreso Nacional del Agua.
- F. Maciel, Á. Díaz, y R. Terra. Variabilidad multi-anual de caudales en ríos de la Cuenca del Plata, 2010. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- N. Madden, A. Lewis, y M. Davis. Thermal effluent from the power sector: an analysis of once-through cooling system impacts on surface water temperature, 2013.
- M.S. Malhadas. Modelação do impacte de emissários submarinos em zonas costeiras: caso da Foz do Arelho. Master's thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2008.
- M.S. Malhadas, P.C. Leitão, y R. Neves. Effect of the bathymetric changes on the hydrodynamics and residence time of the Obidos lagoon (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI56:549–553, 2009a.
- M.S. Malhadas, P.C. Leitão, A. Silva, y R. Neves. Effect of coastalwaves on sea level in Obidos lagoon, Portugal, 2009b.
- M.S. Malhadas, P.C. Leitão, y A. Silva. Influence of tide and waves on water renewal in Obidos lagoon, Portugal. *Ocean Dynamics*, 60(1):41–55, 2010.
- MARETEC. MOHID Description, 2003. URL <http://www.mohid.com/>. Consultado el 25 de junio de 2013.

- V.H. Marin y F.J. Campuzano. Un modelo hidrodinámico-barotrópico para los fiordos australes de Chile entre los 41 s y los 46 s. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 31 (1), 2008.
- F.A. Martins. *Modelação Matemática Tridimensional de Escoamentos Costeiros e Estuarinos usando uma abordagem de Coordenada Vertical Genérica*. PhD thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2000.
- M. Mateus y R. Neves. Evaluating light and nutrient limitation in the Tagus estuary using a process-oriented ecological model. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 12A:41–55, 2008.
- M.E. McMaster, J.L. Parrott, y L.M. Hewitt. A decade of research on the environmental impact of pulp and paper mill effluent in Canada (1992-2002). *NWRI Scientific Assessment Report Series*, (4):84, 2003.
- C. R. Mechoso y G. Perez Iribarren. Streamflow in Southeastern South America and the Southern Oscillation. *Notes and Correspondence*, 5:1535–1539, 1992.
- F. J. Meza. Use of ENSO-Driven climatic information for optimum irrigation under drought conditions: preliminary assessment based on model results for the Maipo River Basin, Chile, 2007. En V. H. Mannava, Climate prediction and agriculture.
- Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto República Argentina. Informe sobre UPM Botnia, 2013. URL <http://www.mrecic.gov.ar/informe-sobre-upm-botnia>. Consultado el 22 de enero de 2014.
- R. Miranda. Nitrogen biogeochemical cycle modeling in the North Atlantic Ocean. Master's thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 1999.
- MOHID Wiki. MOHID Wiki. URL <http://wiki.mohid.com/>. Consultado en reiteradas ocasiones.
- N.E. Monsen, J.E. Cloern, L.V. Lucas, y S.G. Monismith. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, 45(5):1545–1553, 2002.
- P. Montero. *Estudio de la hidrodinámica de la Ría de Vigo mediante un modelo de volúmenes finitos*. PhD thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 1999.
- Y. Montoya y J.J. Ramírez. Variación estructural de la comunidad perifítica colonizadora de sustratos artificiales en la zona de ritral del río Medellín, Colombia. *Rev. biol. trop.*, (2), 2007.

- L. Moxey. A remote sensing class exercise to study the effects of El Niño in South America. *Journal of Science Education and Technology*, 11(4), 2002.
- P.J. Mulholland, A.M. Helton, G.C. Poole, R.O. Hall, S K. Hamilton, y B.J. Peterson. Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading. *Nature*, 452:202–205, 2000.
- K.R. Munkittrick, M.R. Servos, J.H. Carey, y G.J. Van Der Kraak. Environmental impacts of pulp and paper wastewater: Evidence for a reduction in environmental effects at North American pulp mills since 1992. *WaterSci. Technol*, 35:329–338, 1997.
- V. Nassehi y S. Passone. Testing accuracy of finite element and random walk schemes in prediction of pollutant dispersion in coastal waters. *Environmental Fluid Mechanics*, 5:199–214, 2005.
- N. Nicolls. Atmospheric and climatic hazards: improved monitoring and prediction for disaster mitigation. *Natural Hazards*, 23:137–155, 2001.
- J.C.J. Nihoul. A three-dimensional general marine circulation model in a remote sensing perspective. *Annales Geophysicae*, 2(4):433–442, 1984.
- Y. Noma, S. Yamane, y A. Kida. Adsorbable organic halides (AOX), AOX formation potential, and PCDDs/DFs in landfill leachate and their removal in water treatment processes. *J Mater Cycles Waste Manag*, 3:126–134, 2001.
- C.F. Nordin y B.M. Troutman. Longitudinal dispersion in rivers: the persistence of skewness in observed data. *Water Resour. Res*, 16(1):123–128, 1980.
- Organización Mundial de la Salud. Nota descriptiva N 225: Las dioxinas y sus efectos en la salud humana, 2010. URL <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs225/es/>. Consultado el 23 de junio de 2014.
- A.A. Osadchiv y P.O. Zavialov. Lagrangian model of a surface-advected river plume. *Continental Shelf Research*, 58:96–106, 2013.
- V. Osorio, L. Proia, M. Ricart, S. Pérez, A. Ginebreda, J.L. Cortina, S. Sabater, y D. Barceló. Hydrological variation modulates pharmaceutical levels and biofilm responses in a mediterranean river. *Science of the Total Environment*, 472:1052–1061, 2014.
- J.W. Owens. The hazard assessment of pulp and paper effluents in the aquatic environment: a review. *Environ. Toxicol.Chem.*, 10:1511–1540, 1991.

- R.C. Pacanowski y S.G.H. Philander. Parametrization of vertical mixing in numerical models of Tropical Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 11:1443–1451, 1981.
- Pan American Union. Natural Resources Unit. *Cuenca del Río de la Plata: estudio para su planificación y desarrollo; inventario de datos hidrológicos y climatológicos. Informe del estudio llevado a cabo por la Unidad de Recursos Naturales del Departamento de Asuntos Económicos durante el periodo 1967-1968*, volume 1. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Washington D.C., 1969.
- C. Paoli, M. Iriondo, y N. García. Características de las cuencas de aporte. In C. Paoli y M. Schreider, editors, *El río Paraná en su tramo medio: contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*, chapter 1, pages 27–68. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina, 2000.
- Paper Task Force. Environmental comparison of bleached kraft pulp manufacturing technologies. White paper no. 5, 1995.
- M. Paradiso y G. Chalar. Influencia de las condiciones ambientales de la Represa Salto Grande aguas abajo. Resultados Preliminares, 2001. Tercer seminario sobre calidad de aguas y contaminación. 29 y 30 de Noviembre.
- R.R. Parker y J. Sibert. Effects of pulp mill effluent on dissolved oxygen supply in Alberni Inlet. *Fish. Res. Board Can. Tech. Rep*, 10:316, 1971.
- S.C. Paulsen y E.J. List. A study of transport and mixing in natural waters using ICP-MS: water-particle interactions. *Water, Air and Soil Pollution*, 99:149–156, 1997.
- R. Periañez. A particle-tracking model for simulating pollutant dispersion in the Strait of Gibraltar. *Marine Pollution Bulletin*, 49:613–623, 2004.
- E. Perona, I. Bonilla, y P. Mateo. Spatial and temporal changes in water quality in a Spanish river. *The Science of the Total Environment*, 241:75–90, 1999.
- M. Personen y T. Anderson. Toxic effects of bleached and unbleached paper mill effluents in primary cultures of rainbow trout hepatocytes. *Ecotoxicol Environ Safety*, 24:63–71, 1992.
- S.G. Philander. *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, Estado Unidos, 1990.
- I. Piedra Cueva y M. Fossati. Residual currents and corridor of flow in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 31(3):564–577, 2007.
- P.M.N. Pina. An integrated approach to study the Tagus Estuary water quality. Master's thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2001.

- W. Pintos, D. Conde, y W. Norbis. Contaminación orgánica en el río Uruguay (Pay-sandú, Uruguay). *Asociación De Ciencias Naturales Del Litoral*, 1y2:21–29, 1992.
- G. Pisciotano, A. Díaz, G. Cazes, y C.R. Mechoso. El Niño-Southern Oscillation Impact of Rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, 7:1286–1301, 1994.
- L. Portela. *Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade da água no Estuário do Tejo*. PhD thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 1996.
- N. Possia, S.B. Ceme, y C. Campetella. A diagnostic analysis of the Río de la Plata Superstorm, May 2000. *Meteorol. Appl.*, 10:87–99, 2003.
- S. Postel y B. Richter. *Rivers for life: Managing water for people and nature*. Island Press, Washington, 2003.
- B.E. Prario, W. Dragani, D.G. Mediavilla, y E. D’Onofrio. Hydrodynamic numerical simulation at the mouths of the Parana and Uruguay rivers and the upper Rio de la Plata estuary: A realistic boundary condition. *Applied Mathematical Modelling*, 35: 5265–527, 2011.
- Pérez Rodino, R. Parámetros de Transformación entre el Sistema SIRGAS 95 y los Sistemas Locales CDM y ROU-USAMS (Yacaré). URL <http://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2012/5923/parametros.pdf>. Consultado el 15 de febrero de 2013.
- P. Prodanovic. Hydrodynamic and thermal plume modeling for waste heat discharges into coastal waters, 2013. 4th Specialty Conference on Coastal, Estuary and Offshore Engineering. 29 de Mayo a 1 de Junio.
- Programa de Energía Eólica del Uruguay. Reporte acumulado. Puesto: Egaña. Período: 01/04/2011-31/03/2012, s.f. URL <http://www.energieolica.gub.uy/uploads/Reportes%20viento/Acumulados/Acumulado%20EGA%20201203.pdf>. Consutlado el 31 de enero de 2013.
- Programa de Recursos Naturales y Energía, CEPAL. Los recursos hidráulicos de América Latina. Informe preliminar, 1970. Volumen I.
- W. Puls, T. Pohlmann, y J. Sondermann. Suspended particulate matter in the Southern North Sea: application of a numerical model to extend NERC North Sea project data interpretation. *German Journal of Hydrography*, 49(2/3), 1997.
- M. Ré y A.N. Menéndez. Modelo hidrodinámico del Río de la Plata y su frente marítimo, 2003. Proyecto “Protección ambiental del Río de la Plata y su frente marítimo: prevención y control de la contaminación y restauración de hábitats”.

- M. Ré, P. García, A. Sarubbi, y A.N. Menéndez. Modelación tridimensional de corrientes secundarias en curvas, 2009.
- P.C. Resende, P. Resende, M. Pardal, S. Almeida, y U. Azeiteiro. Use of biological indicators to assess water quality of the Ul River (Portugal). *Environmental Monitoring and Assessment*, 170:535–544, 2010.
- G. Riflet. *Downscaling large-scale Ocean basin solutions in regional three-dimensional hydrodynamic models*. PhD thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2010.
- J. Rodríguez. La responsabilidad internacional del Estado: el caso de las plantas de celulosa y los bloqueos en el río Uruguay. *International Law: Revista Colombiana de Derecho Internacional*, 10:43–74, 2007.
- R.J. Romanowicz, M. Osuch, y S. Wallis. Modelling of solute transport in rivers under different flow rates: A case study without transient storage. *Acta Geophysica*, 61(1): 98–125, 2012.
- C.F. Ropelewski y M. Halpert. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115:1606–1626, 1987.
- C.F. Ropelewski y M. Halpert. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2:268–284, 1989.
- P.M. Rowiński, I. Guymer, A. Bielonko, J.J. Napiórkowski, J. Pearson, y A. Piotrowski. Large scale tracer study of mixing in a natural lowland river, 2005.
- J.S. Ryu. Potential extents for ENSO-driven hydrologic drought forecasts in the United States. *Climate Change*, 101:575–597, 2010.
- P. Salomon, D. Fernández-García, y J.J. Gómez-Hernández. A review and numerical assessment of the randomwalk particle tracking method. *Journal of Contaminant Hydrology*, 87:277–305, 2006.
- P. Santoro. Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata. Master's thesis, Universidad de la República, 2013.
- P. Santoro, M. Fernández, M. Fossati, G. Cazes, R. Terra, y I. Piedra Cueva. Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 35:2462–2478, 2011.
- S. Saraiva, P. Pina, F. Martins, M. Santos, F. Braunschweig, y R. Neves. Modelling the influence of nutrient loads on Portuguese estuaries. *Hydrobiologia*, 587(1):5–18, 2007.

- B.H. Schmid. Persistence of skewness in longitudinal dispersion data: Can the dead zone model explain it after all? *Hydraul Eng*, 128(9):848–854, 2002.
- B.H. Schmid, I. Innocenti, y U. Sanfilippo. Characterizing solute transport with transient storage across a range of flow rates: The evidence of repeated tracer experiments in Austrian and Italian streams. *Advances in Water Resources*, 33:1340–1346, 2010.
- M. Schulz, H.P. Kozerski, T. Pluntke, y K. Rinke. The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany). *Water Research*, 37:569–578, 2003.
- J. Schwarzbauer. *Organic Contaminants in Riverine and Groundwater Systems. Aspects of the Anthropogenic Contribution*. Springer, Holanda, 2006.
- Secretaría General de la Organización de Estados Americanos. El transporte en la Cuenca del Plata, 1985. URL <http://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea18s/oea18s.pdf>.
- Serman & Asociados S.A. Estudio de impacto ambiental dragado para la extensión del canal de acceso hasta Puerto Cuatrerros, Provincia de Buenos Aires. Capítulo 5 – Estudios Especiales, 2011.
- Servicio de Hidrografía Naval de Ministerio de Defensa Argentina. Croquis de los ríos: río Uruguay, 2009.
- G.M. Shook, S.L. Ansley, y A. Wylie. Tracers and tracer testing: Design, implementation, and interpretation methods, 2004.
- P.K. Sibley, D.G. Dixon, y D.R. Barton. Impact of bleached kraft pulp mill effluent on benthic community structure in relation to environmental factors. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 7:229–24, 2000.
- C.P. Silva, C.L. Marti, y J. Imberger. Horizontal transport, mixing and retention in a large, shallow estuary: Río de la Plata. *Environ Fluid Mech*, 2013.
- I. Simmonds y K. Keay. Mean southern hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP/NCAR reanalysis. *J. Climate*, 13(5):873–885, 2000.
- S.A. Socolofsky y G.H. Jirka. Special topics in mixing and transport processes in the environment, 2005.
- D. Steinhoff, A. Monaghan, y M. Clark. Projected impact of twenty first century ENSO changes on rainfall over Central America and northwest South America from CMIP5 AOGCMs. *Climatic Dynamics*, 2014.

- Subsecretaría de Recursos Hídricos. Sistema Nacional de Información Hídrica. Base de Datos Hidrológica Integrada – BDHI. URL http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.php. Consultado el 20 de febrero de 2013.
- P. J. Sullivan. Longitudinal dispersion within a 2-D turbulent shear flow. *J. Fluid Mech*, 49:551–576, 1971.
- J.K. Summers, P.F. Kazyak, y S.B. Weisberg. A water quality model for a river receiving mill effluents and conventional sewage. *Ecological Modelling*, 58:5–54, 1991.
- S. Talento. Bases para un sistema de predicción de caudales de aporte a Rincón del Bonete y Salto Grande. Master’s thesis, Universidad de la República, 2011.
- L. Teixeira, E. Lorenzo, N. Baccardatz, y P. Fitermann. Estudio de dragado en Paso Almirón Chico. modelación hidrosedimentológica, 1999a. Convenio Facultad de Ingeniería-Dirección Nacional de Hidrografía.
- L. Teixeira, E. Lorenzo, y P. Fitermann. Estudio de dragado en Paso Filomena. modelación hidrosedimentológica, 1999b. Convenio Facultad de Ingeniería-Dirección Nacional de Hidrografía.
- Tiempo Argentino. Uruguay autorizó a la pastera UPM a ampliar la producción, 2014. URL <http://tiempo.infonews.com/edicion/1476/argentina>. Consultado el 30 de junio de 2014.
- A.R. Trancoso, S. Saraiva, L. Fernandes, P. Pina, P. Leitão, y R. Neves. Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary. *Ecological Modelling*, 187(2-3):232–246, 2005.
- UNESCO. Tenth report on the joint panel on oceanographic tables and standards. Technical Report 36, 1981. Technical papers in marine science.
- Unión Europea. Council Directive of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment (91/271/EEC), 1991.
- Unión Europea. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, 2000.
- Unión Europea. Decision No 2455/2001/EC of the European Parliament and of the Council of 20 November 2001 establishing the list of priority substances in the field of water policy and amending Directive 2000/60/EC, 2001.
- UPM Fray Bentos. Environmental performance in 2012, Junio 2013. URL http://www.upm.com/uy/planta/medio-ambiente/desempeno-ambiental/Documents/Fray_Bentos_EMAS_2012.pdf. Consultado el 9 de agosto de 2014.

- U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100, 2002. 6 volúmenes.
- U.S. Environmental Protection Agency. Effectiveness of effluent guidelines program for reducing pollutant discharges uncertain, 2004. URL <http://www.epa.gov/oig/reports/2004/20040824-2004-P-00025.pdf>. Evaluation Report. Report No. 2004-P-00025.
- U.S. Environmental Protection Agency. Clean Water Act, Section 502 General Definitions, Junio 2013. URL <http://water.epa.gov/lawsregs/guidance/wetlands/sec502.cfm>.
- A. Van Mazik y E.J.M. Veling. *Persistence of Skewness of Concentration Distribution*, page 143–169. Springer, Nueva York, 2005.
- N. Vaz, J. Miguel Dias, P. Chambel Leitão, y R. Nolasco. Application of the Mohid-2D model to a mesotidal temperate coastal lagoon. *Computers and Geosciences*, 33(9): 1204–1209, 2007.
- N. Vaz, J. Miguel Dias, y P. Chambel Leitão. Three-dimensional modelling of a tidal channel: The Espinheiro Channel (Portugal). *Continental Shelf Research*, 29(1):29–41, 2009.
- M. Villareal. *Parameterization of turbulence in the ocean and application of a 3D model to the ria de Pontevedra*. PhD thesis, Universidad Técnica de Lisboa, 2000.
- C.R. Wagner y D.S. Mueller. Use of velocity data to calibrate and validate two-dimensional hydrodynamic models, 2002.
- S. Wallis. *Experimental study of travel times in a small stream*, page 109–121. Springer, Nueva York, 2005.
- S. Wallis y R. Manson. On the theoretical prediction of longitudinal dispersion coefficients in a compound channel, 2005.
- Y. Wan, Ch. Qiu, P. Doering, M. Ashton, D. Sun, y T. Coley. Modeling residence time with a three-dimensional hydrodynamic model: Linkage with chlorophyll a in a subtropical estuary. *Ecological Modelling*, 268:93–102, 2013.
- S.D. Wang, Y.M. Shen, y Y.H. Zheng. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. *Ocean Engineering*, 32:1556–1571, 2005.
- S.D. Wang, Y.M. Shen, y Y. Guo. Seasonal circulation and influence factors of the Bohai Sea: a numerical study based on Lagrangian particle tracking method. *Ocean Dynamics*, 60:1581–1596, 2010.

- Wikipedia. Conflicto entre Argentina y Uruguay por plantas de celulosa. URL www.wikipedia.com. Consultado el 22 de enero de 2014.
- S.L. Wong, B. Clark, y R.F. Kosciuw. An examination of the effects of nutrients on the water quality of shallow rivers. *Hydrobiologia*, 63(3):231–239, 1979.
- World Wild Fund for Nature. Toxic chemicals, s.f. URL http://wwf.panda.org/about_our_earth/teacher_resources/webfieldtrips/toxics/. Consultado el 2 de agosto de 2014.
- S.K. Yoon, J.S. Kim, J.H. Lee, y Y. Moon. Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Niño phases. *Stochastic Environmental Resources Risk Assessment*, 27:1465–1477, 2013.
- A. Zabalett, J. Cardini, D. Mársico, y N. Oliver. Impacto de las descargas cloacales de Concordia y Salto en el río Uruguay, 2009a. CONAGUA 2009, XXIIº Congreso Nacional del Agua 2009, Trelew, 11 al 14 de Noviembre de 2009.
- A. Zabalett, J. Cardini, N. Oliver, y C. Cardini. Impacto bacteriológico de descargas cloacales e industriales en el río Uruguay entre Pueblo Liebig y Concepción del Uruguay, 2009b. CONAGUA 2009, XXIIº Congreso Nacional del Agua 2009, Trelew, 11 al 14 de Noviembre de 2009.
- G. Zhang, L. Guo, G. Liu, J. Li, Z. Jin, S. Qi, y X. Li. Sediment records of persistent organic pollutants (POPs) in relation to regional economic development: A comparison study in both Pearl River Delta and Yangtze River Delta, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25 (Supl.):231–239, 2006.
- G. Zhang, Y. Zhao, Y. Xu, y Y. Wang. 2-D numerical simulation of radionuclide transport in the lower Yangtze River. *Journal of Hydrodynamics*, 24(5):702–710, 2012.
- M. Zilberbrand, E. Rosenthal, y E. Shachnai. Impact of urbanization on hydrochemical evolution of groundwater and on unsaturated-zone gas composition in the coastal city of Tel Aviv, Israel. *Journal of Contaminant Hydrology*, 50:175–208, 2001.

Apéndice A

Análisis Información Hidrológica

En este anexo se presenta en mayor detalle los análisis efectuados a la información hidrológica disponible, presentados brevemente en el Capítulo 3 Análisis Hidrológico.

A.1. Datos hidrológicos de base

La información hidrológica obtenida a partir de la DNH, consistió en datos de escalas limnimétricas de las estaciones en Salto, Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, junto con datos de caudales también en Salto. La ubicación geográfica de las fuentes de información de las cuatro escalas corresponde a los puertos respectivos de cada ciudad, y su relación con la escala Wharton es la presentada en la Tabla A.1.

TABLA A.1: Relación entre ceros locales y cero Wharton

Escala de DNH	Ubicación del puerto	Elevación de ceros de escala en metros (respecto a Wharton)
Salto	(407103.00 m E, 6527134.00 m S)	2.01
Paysandú	(396025.00 m E, 6424181.00 m S)	1.02
Fray Bentos	(377445.00 m E, 6335655.00 m S)	0.55
Nueva Palmira	(368608.00 m E, 6250633.00 m S)	0.72

Los datos de niveles son diarios, obtenidos a partir de 3 o 4 lecturas diarias, o una lectura por hora, en función de la época y la estación. Dicha serie histórica solicitada a la DNH se encuentra delimitada por los años 1983 y 2011, período iniciado a partir de la puesta en operación de la Represa Salto Grande. Se entiende, como menciona la CTM (s.f.b) en un informe hidrológico para el período 1898-2000, que a partir de la operación de la Represa (1983) las alturas de niveles aguas abajo de la misma pierden representatividad del flujo

natural del río Uruguay, reflejando variaciones respecto a valores de caudal y niveles previo a la construcción de la Represa por la operación de las turbinas y vertederos.

Los datos de caudal diarios son determinados a partir de una ecuación empírica de aforo que surge de correlacionar registros de caudales y registros de niveles en la escala del puerto de Concordia. Estos últimos son extrapolados al puerto de Salto utilizando la relación de ambas escalas, obteniéndose las Ecuaciones de aforo A.1 y A.2 (conversación personal de R. Chao, 13 de agosto de 2012).

$$Q = 0,156(H + 8,11)^{3,391} \text{ para } -0,99 \leq H \leq -0,38 \quad (\text{A.1})$$

$$Q = 229,83501(H + 1,19)^{1,717} \text{ para } -0,38 \leq H \leq 11,81 \quad (\text{A.2})$$

El máximo valor de registro de nivel de la curva calibrada es el valor 11.81 metros respecto al cero local del puerto de Salto, lo que corresponde según la ecuación antes presentada a un caudal de $18796 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto quiere decir que para caudales superiores, esta ecuación podría no ser representativa.

Cabe aclararse que los registros utilizados para la calibración de estas ecuaciones datan de tiempos previos a la construcción de la Represa Salto Grande. Pues, el objetivo de la obtención de estas ecuaciones era precisamente disponer de una herramienta al momento de realizar el proyecto ejecutivo de la Represa.

A partir de la serie de datos diarios de niveles registrados suministrada por la DNH se analiza en primer lugar la densidad de puntos en la misma. Esto arroja los siguientes valores de cantidad de datos que se disponen de la serie temporal comprendida desde 1983 hasta mediados o fines del 2011, según se muestra en la Tabla A.2.

TABLA A.2: Densidad de registros en serie de niveles brindados por DNH

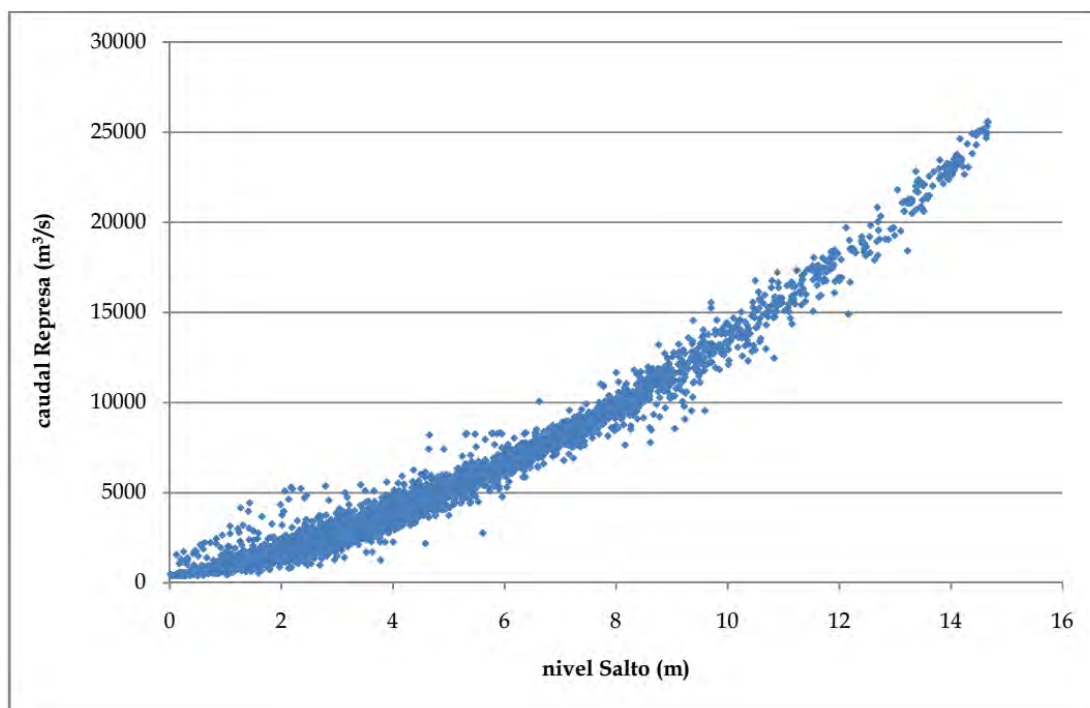
	Período	Densidad
Salto	01/01/1983 26/07/2011	96 %
Paysandú	01/01/1983 31/12/2011	93 %
Fray Bentos	01/01/1983 31/12/2011	98 %
Nueva Palmira	01/01/1983 31/12/2011	89 %

A modo de analizar la validez de la información de DNH, se la compara con los datos de caudales brindados por CTM. Debido a que los datos de CTM disponen de frecuencia horaria, se determina el promedio diario a ser comparados con los de la DNH. La ventana temporal se define como la intersección de ambas series, resultando desde 1/1/1995 hasta

26/7/2011, presentando una densidad de datos de 100 % y de 96 % para los datos de CTM y DNH respectivamente.

La correlación entre las series de nivel en Salto (DNH) y caudal de la Represa (CTM) resulta en 0.957, mostrando una muy buena correlación entre ambas. Se detecta que la mayoría de las desviaciones suceden en el año 2011, por lo que extrayendo los datos correspondientes a este año se mejora la correlación a 0.974, como lo esquematiza la Figura A.1. Esto significa que existe una muy buena correlación entre los datos de niveles registrados en Salto y los datos de caudales erogados por la Represa.

FIGURA A.1: Relación entre caudales Represa (CTM) y niveles en Salto (DNH)



Sin perjuicio de lo anterior, es posible observar en la Figura A.1 cierta dispersión de puntos entorno a una zona más densa representando una mayor concentración de la información en la que puede inferirse una relación entre ambas series.

Análogamente se efectúa la comparación entre los caudales brindados por DNH, determinados por las Ecuaciones A.1 y A.2 de Salto, y los datos de caudales brindados por CTM correspondientes a los caudales erogados por la Represa. La correlación entre ambas series de datos resulta en 0.993, excluyendo los datos del año 2011, por lo que los caudales determinados en Salto resultan equivalentes a los erogados por la Represa, a pesar de una distancia de unos 10km que separa ambos puntos.

Si aún, se excluye los datos de caudales superiores a $18796 \text{ m}^3/\text{s}$, debido a que por no estar incluidos en las ecuaciones respectivas podrían estar induciendo mayores errores,

la correlación disminuye a 0.990, por lo que se podría asumir que las dichas ecuaciones podrían ser aplicables también a mayores alturas que la máxima mencionada de 11.81 metros respecto al cero local del puerto de Salto.

A partir de esto último, podría asumirse que en la sección del río a la altura de Salto existe una relación biunívoca entre los niveles y los caudales erogados por la Represa, a pesar que en la Figura A.1 es posible observar cierto grado de ruido ocasionado por dispersión de algunos datos.

Por lo tanto, la información de caudales y niveles en el puerto de Salto brindada por DNH se considera válida para usos posteriores.

A.2. Análisis preliminar de tirantes y caudales

De forma de efectuar una análisis preliminar de la relación entre el tirante en la sección en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira y el caudal erogado por la Represa, es interesante conocer lo que sucede durante las crecientes, situación en las cuales el flujo circula en condiciones no estacionarias, la velocidad varía ampliamente y las pendientes de energía, de la superficie del agua y de fondo difieren significativamente.

La propagación de flujo en ríos es compleja debido a varios factores: uniones y tributarios, variaciones en la sección transversal, variaciones en la rugosidad tanto en profundidad como a lo largo del río, inundaciones y meandros, así como la eventual influencia de marea. Asimismo, la interacción entre el canal principal y planicies de inundación es uno de los factores más importantes que afectan la propagación de crecientes. Durante el período en que aumenta el caudal, el agua fluye hacia las planicies de inundación, y durante la disminución de la creciente, el agua fluye de las planicies al canal principal. En estas situaciones, al suceder la avenida se incrementan las velocidades, y en la recesión de la misma las velocidades disminuyen debido al efecto de almacenamiento de las planicies de inundación.

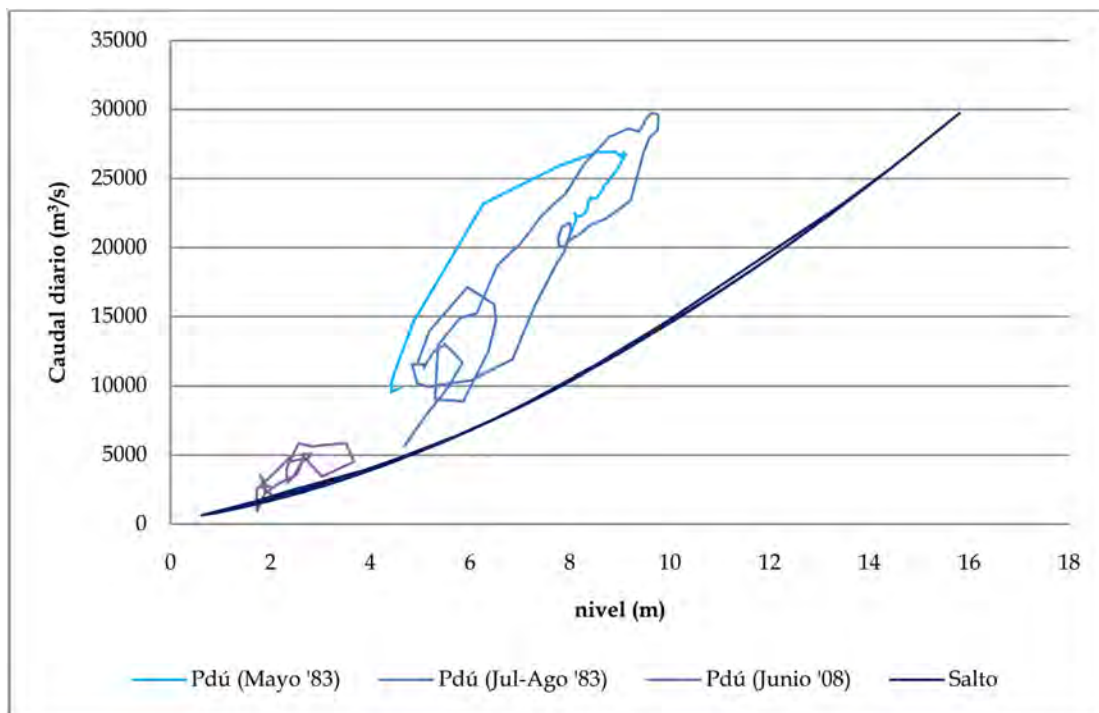
Diferencias en el comportamiento entre el aumento y la disminución de caudales reproduce una curva antihoraria tirante-caudal en cada una de las secciones transversales del río, la cual se denomina *bucle*, como fue mencionado en el Capítulo 2- Revisión Bibliográfica, sección Procesos hidrodinámico en ríos.

A modo de clarificar ideas, en la Figura A.2 se presenta un esquema de bucles seleccionados de la serie histórica de niveles registrados en Paysandú para caudales extremos y para caudales medios (con datos diarios). Ellos representan la relación entre los caudales erogados por la Represa y los niveles registrados en Paysandú para tres períodos de

tiempo: en mayo de 1983, julio y agosto de 1983 y junio 2008. Es posible diferenciar el tamaño y conformación de los bucles en función de los caudales representados.

En dicha figura también se representa la curva de aforo determinada en Salto, por lo que al comparar ésta con los bucles antes mencionados, se observa claramente que la sección del río a la altura de la ciudad de Salto es más encajonada, ya que para un incremento de caudal se incrementa en mayor medida en Salto que en Paysandú.

FIGURA A.2: Bucles en la serie de histórica de Paysandú

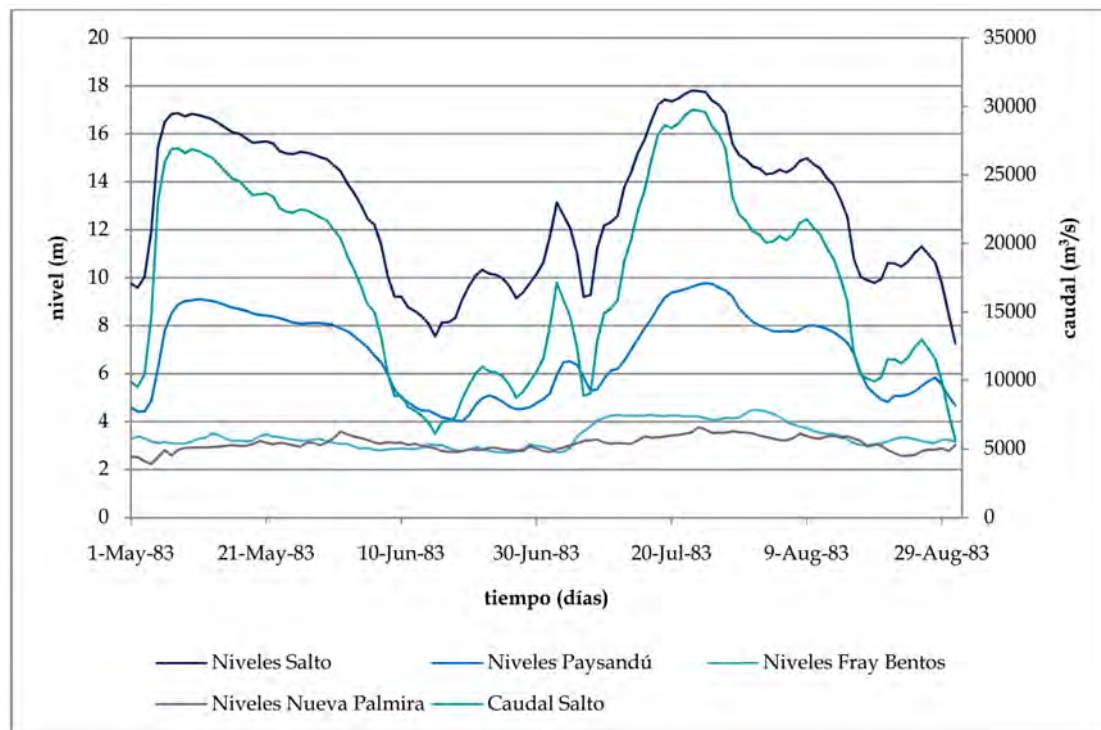


La diferencia entre las características de la relación de niveles y caudales de Paysandú y Salto, exponen que no hay una relación biunívoca entre el tirante de Paysandú y los caudales erogados por la Represa. Explicaciones físicas asociadas a este fenómeno han sido presentadas en el Capítulo 2- Revisión Bibliográfica.

Un tercer elemento a mencionar es la deformación y desfase de la onda de crecida en Paysandú. En la Figura A.3 es posible observar ambos elementos al comparar ambas curvas de niveles de Salto y Paysandú para el período de mayo a agosto de 1983. Asimismo, se detecta en Paysandú un comportamiento diferente que en Salto respecto a la curva de caudales erogados: el aumento y disminución de niveles en Paysandú es de menor magnitud que en la sección de Salto, y la velocidad de crecimiento y disminución de los niveles en Paysandú es menor a las mismas variables en Salto. A modo de ejemplo, en las proximidades de la fecha 27 de julio, luego que se alcanza un valor máximo de

nivel en Paysandú, se refleja una demora en la disminución de los niveles respecto a los niveles de Salto.

FIGURA A.3: Hidrograma en Salto, y limnigramas en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira (Mayo-Agosto 1983)



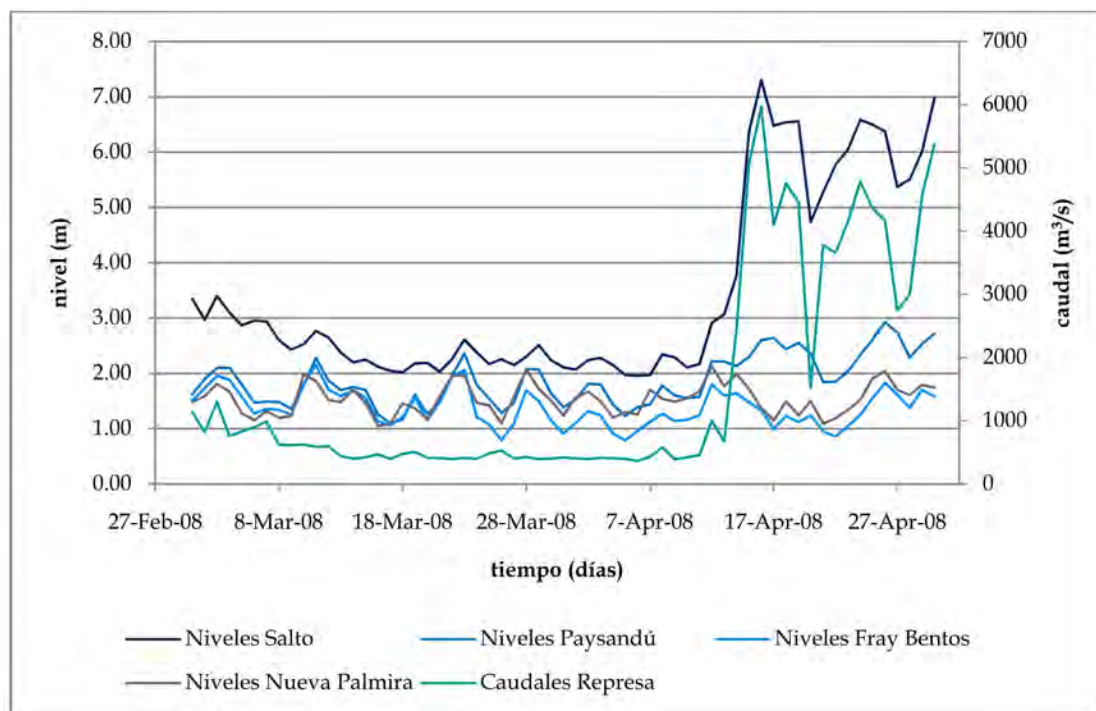
Análogamente a Paysandú, en la sección de Fray Bentos se observa un comportamiento que refleja, aunque en menor grado, la tendencia observada en Salto. Asimismo, a esta altura del río, se representa una situación intermedia entre lo observado en Paysandú y Nueva Palmira.

Por último, y mostrando una gran apartamiento respecto a lo antes mencionado, es el caso de Nueva Palmira en que el reflejo de lo que sucede en Salto es sensiblemente minimizado e inclusive pudiendo ser prácticamente nulo en sus niveles.

Esto último, puede ser acentuado por acción de la marea del Río de la Plata en los niveles de Nueva Palmira. Dicha influencia en algunos casos puede extenderse hacia aguas arriba, inclusive hasta Paysandú. En tales casos, la variabilidad de niveles observada en Nueva Palmira es reproducida en Fray Bentos y Paysandú. La Figura A.4 esquematiza que ante caudales bajos los niveles en Nueva Palmira se copian en las curvas de niveles de los otros dos puntos. Si bien se está utilizando datos diarios, es posible apreciar la influencia de los niveles de Nueva Palmira particularmente en el primer tramo de la serie esquematizada. Por lo tanto, según domine uno u otro factor (aguas abajo o

arriba), predominará uno forzante u otro, tanto del caudal erogado por la Represa como el efecto de marea proveniente del Río de la Plata.

FIGURA A.4: Hidrograma en Salto, y limnigramas en Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira (Mayo-Abril 2008)



Es por lo anterior, que se considera importante efectuar una breve descripción de los factores involucrados en el Río de la Plata, y por lo tanto, traducidos a Nueva Palmira. A continuación se presentan las características más importantes del Río de la Plata, a efectos del presente trabajo.

A.2.1. Influencia del Río de la Plata

La influencia del Río de la Plata puede afectar la hidrodinámica del río Uruguay, ocasionando eventualmente eventos de inversión de flujo que inclusive pueden alcanzar la ciudad de Paysandú (CARU, 2003b, Ecometrix, 2006).

La dinámica del Río de la Plata está determinada, en orden decreciente de importancia, por la onda de marea oceánica que ingresa desde el Océano Atlántico (incluyendo el nivel medio del mar), los vientos que actúan sobre toda la superficie del río, y la descarga de los tributarios principales (ríos Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay) que penetra en el nacimiento del río. Estos forzantes actúan sobre escalas de tiempo diferentes: la oscilación astronómica mareal influye sobre la escala horaria, los vientos

sobre la escala diaria, los caudales sobre la escala mensual y el nivel medio del mar sobre la escala anual (Fundación Torcuato Di Tella, 2005).

En cuanto al régimen astronómico, la marea del Río de la Plata dispone de una oscilación del nivel de agua de tipo micromareal, con pocas decenas de centímetros de amplitud. Se aprecian las oscilaciones semidiurnas con desigualdades diurnas que caracteriza el régimen de marea astronómica en el Río de la Plata (Santoro, 2013).

Modificación de estos niveles pueden ser ocasionados por la acción de vientos locales sobre la superficie del río. Cuando son lo suficientemente intensos, puede dar lugar a variaciones significativas del nivel de agua. Particularmente, se destacan los vientos provenientes del sureste que producen un apilamiento significativo debido a que la onda de tormenta se superpone sobre la marea astronómica, dado que actúan a lo largo del eje del río. Por el contrario, los vientos provenientes del norte y del oeste pueden conducir a un efecto opuesto, es decir, una depresión significativa.

En este sentido, los mayores picos de crecida del Río de la Plata se producen por la penetración de ondas de tormenta desde el océano, asociadas al fenómeno meteorológico conocido como Sudestada con cambios rápidos en la presión y vientos del sector este-sudeste en el Río de la Plata. Asimismo, los niveles máximos del Río de la Plata asociados a eventos de sudestada tienen valores variables, dependiendo de la intensidad y persistencia del viento y de la ocurrencia simultánea del máximo de altura de onda de tormenta y de altura de onda de marea astronómica.

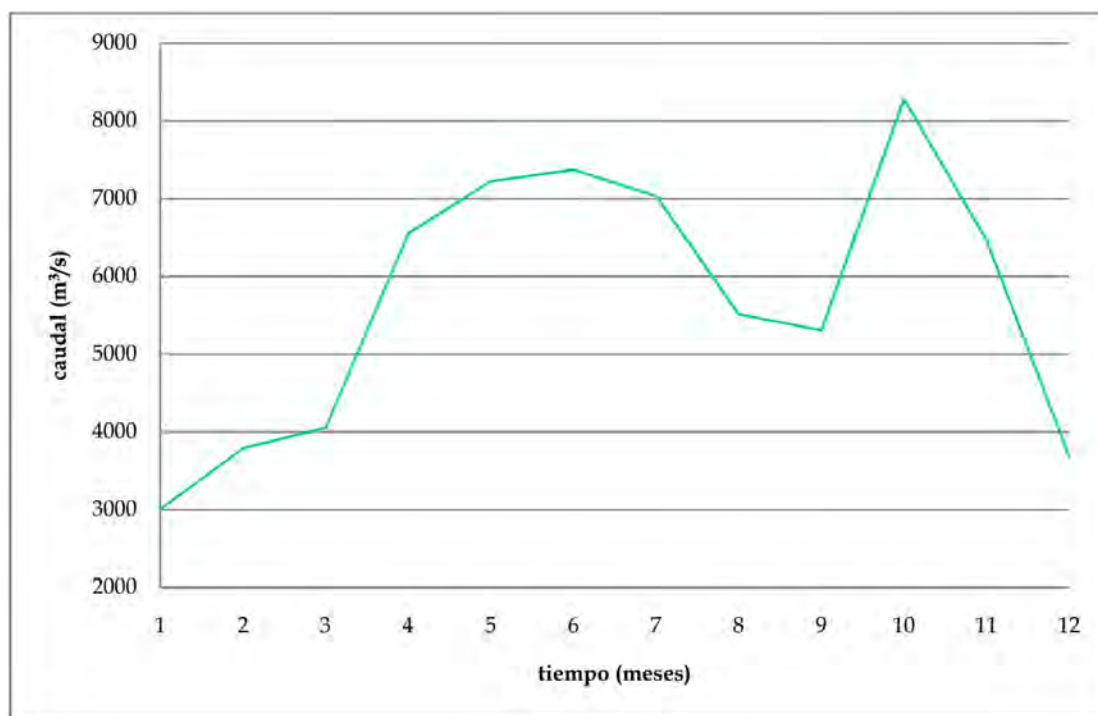
A.3. Ciclo Anual

A partir de los datos diarios de caudal datos de DNH se determinan los caudales medios mensuales de cada mes de la serie histórica, y a partir de éstos el caudal promedio mensual interanual, con el objetivo de determinar la variación estacional de la serie y los meses en donde suceden caudales máximos o mínimos. La Figura A.5 esquematiza los valores obtenidos para cada mes.

Se obtiene que el ciclo anual dispone mínimos en verano ($3008\text{m}^3/\text{s}$ en enero), y valores máximos en junio y octubre, siendo 7374 y $8285\text{m}^3/\text{s}$ respectivamente. Los meses de mayo y julio disponen de valores muy cercanos al mes de junio, siendo ligeramente inferiores: $7227\text{m}^3/\text{s}$ para el primer caso y $7034\text{m}^3/\text{s}$ para el segundo.

Las características del ciclo anual obtenido son similares al presentado en Talento (2011), a pesar que este último es deducido para caudales de aporte del río Uruguay con un punto de cierre en la Represa Salto Grande. En este último caso la serie histórica utilizada

FIGURA A.5: Variación anual de los caudales mensuales medios



comprende de enero 1979 hasta diciembre 2008. A pesar que el comportamiento de los caudales del río en ambos ciclos anuales es muy semejante, difieren en que (Talento, 2011) indica que el segundo (en magnitud) pico de valor extremo sucede en el mes de mayo y no en el mes de junio.

En menor grado que el caso anterior, el ciclo anual deducido a partir de los datos de DNH se asemeja al comportamiento estacional anual del período 1971-2001 del estudio “Análisis del régimen hidrológico de los ríos Uruguay y Paraná” (INA) (2002), mostrando un mínimo anual en enero y dos extremos máximos en julio y octubre, con un período de aguas bajas intermedio que alcanza el mínimo en setiembre. Ambos extremos máximos en este estudio son prácticamente iguales (unos 6800 y $7000\text{m}^3/\text{s}$, julio y octubre respectivamente), lo que no es así en la Figura A.5 en donde sus máximos son mayores a éstos (presentando unos casi 7400 y $8300\text{m}^3/\text{s}$ para junio y octubre respectivamente). Otra diferencia detectada es el mes de febrero, en el que con los datos de DNH dicho mes presenta un valor mensual medio ($3800\text{m}^3/\text{s}$) inferior al de marzo, cuando no es así en INA (2002) en que se detecta un valor superior al de marzo (aproximadamente $4400\text{m}^3/\text{s}$).

Los valores menores indicados por INA (2002) respecto a los datos aquí presentados pueden deberse a que en el primer caso los datos diarios se obtienen de registros efectuados

a las 6 de la mañana de cada día en la estación del puerto de Concordia, Argentina. En dicho momento del día la Represa podría no estar operando en condiciones medias.

A.4. Caudales característicos

A partir de los datos diarios de la serie histórica comprendida entre enero de 1983 y diciembre de 2010 (se excluyen los datos de 2011 por lo advertido antes) brindada por DNH, se obtienen valores de caudales mensuales, obteniendo los caudales característicos diarios y mensuales como lo presenta la Tabla A.3. En dicha tabla se observa que el caudal diario mínimo absoluto es el cual presenta la mayor desviación respecto a su homólogo valor mensual.

TABLA A.3: Caudales mensuales y diarios característicos

	Valores diarios (m ³ /s)	Valores mensuales (m ³ /s)
Caudal Mínimo Absoluto	193	500
Caudal Mínimo Característico (95 %)	729	908
Caudal Semipermanente (50 %)	4106	4489
Caudal Máximo Característico (5 %)	15911	15201
Caudal Máximo Absoluto	29750	22510

Se compara los valores de caudales característicos mensuales entre los presentados por INA (2002) y el presente estudio. La Tabla A.4 presenta valores de caudales bajo (percentil 75 de superación), medio y alto (percentil 25 de superación) de períodos comparables (1971-2001 para el caso del INA y 1983-2010 para la DNH).

TABLA A.4: Comparación de caudales mensuales característicos

	INA (1971-2001)	DNH (1983-2010)
Caudal Bajo	2300	2276
Caudal Medio	5300	5699
Caudal Alto	6900	7682

Se detecta que se incrementa la diferencia a medida que se incrementa el valor del caudal de referencia. Los caudales bajos de DNH y de INA son prácticamente iguales, los medios tienen una mayor diferencia que éstos, y a su vez, los caudales altos tienen mayor diferencia que estos últimos. En estos dos últimos casos, los valores obtenidos a partir de los datos de la DNH son superiores a los obtenidos por el INA. Estas diferencias significativas podrían estar justificadas por las características de los registros de base considerados en INA (2002) en que se dispone de datos diarios medidos a las 6 a.m. de cada día, por lo que podría estar representando un valor menor al diario. La medición de

dichos valores es efectuada en la estación del puerto de Concordia, Argentina. A pesar que el puerto se ubica 3.1km aguas abajo del puerto de la ciudad de Salto, se considera que el caudal es el mismo, ya que no hay ningún aporte significativo en ese tramo.

De estas comparativas, sumado a la consistencia demostrada ante los registros brindados por CTM, se concluye que la serie suministrada por la DNH es consistente y confiable, considerándose como buen pilar de base para realizar los estudios posteriores desarrollados en el Capítulo 3.

A.5. Análisis Estadístico

Para analizar las estadísticas descriptivas junto con análisis de correlación de las series de datos, se utiliza el software estadístico XLSTAT.

En la Tabla A.5 se presentan los resultados obtenidos de las estadísticas descriptivas de los datos diarios, junto con los diagramas de caja para todas las variables. Se aclara que los valores de niveles están referidos al cero Wharton.

TABLA A.5: Estadísticas descriptivas de datos diarios

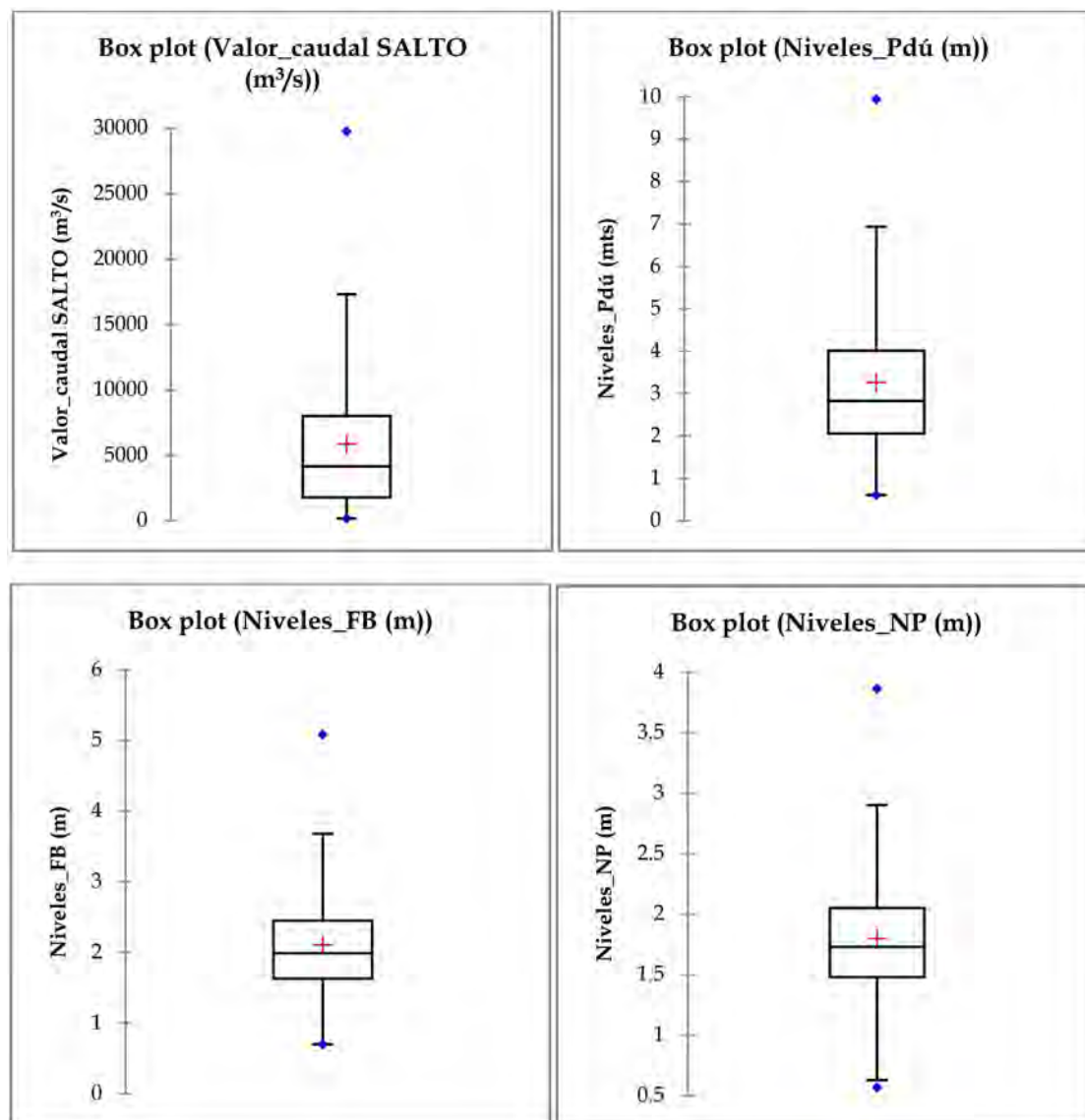
Estadística	Caudal Salto (m ³ /s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
No. de observaciones	10592	10592	10592	10592
Mínimo	193	0.61	0.70	0.57
Máximo	29750	9.94	5.08	3.86
1° Cuartil	1795	2.06	1.63	1.48
Mediana	4159	2.83	1.99	1.73
3° Cuartil	8014	4.01	2.45	2.05
Media	5875	3.26	2.11	1.80
Varianza (n-1)	29734901	2.61	0.44	0.20
Desviación típica (n-1)	5453	1.62	0.66	0.45
Asimetría (Pearson)	1.60	1.33	1.02	0.82
Curtosis (Fisher)	2.51	1.80	1.28	0.87

Claramente para todas las variables suceden valores de curtosis y asimetrías de Pearson positivas, siendo esto equivalente a un apuntamiento mayor que la distribución normal y una asimetría hacia la derecha.

Estas propiedades se pueden visualizar en los diagramas de caja (Figura A.6), en donde la caja contiene tres líneas: la línea superior representando el tercer cuartil (se supera en un 25 %), la línea central corresponde a la mediana, y la línea inferior corresponde al primer cuartil (se supera en un 75 %); la cruz central corresponde a la media, las

prolongaciones de la caja central representan la dispersión de los datos, a ambos lados, y los puntos aislados equivalen los valores extremos, tanto máximo como mínimo.

FIGURA A.6: Diagramas en caja de caudales, y niveles en Pdú, FB y NP



Se observa una clara asimetría hacia los valores mayores a la media, principalmente en los valores de Paysandú, en donde se presenta una diferencia de extremos superior a 9 metros, lo que se va atenuando a medida que se recorre el río hacia aguas abajo.

Para el caso de Nueva Palmira, la diferencia entre los valores extremos resulta en unos 3.2m en términos diarios, lo que podría resultar un tanto mayor si se hiciera el mismo análisis con datos horarios debido a la frecuencia de marea del Río de la Plata.

Con el objetivo de anticipar la influencia de los caudales de la Represa respecto a los niveles a lo largo del río, representados por Paysandú, Fray Bentos y Nueva Palmira, se

determina la correlación entre la serie de caudales y las correspondientes series de niveles registrados en dichas ciudades. La Tabla A.6 presenta la disminución de correlación a medida que se incrementa la distancia hacia aguas abajo del río.

TABLA A.6: Matriz de correlación (Pearson)

Variabes	Caudal Salto (m ³ /s)	Niveles Pdú (m)	Niveles FB (m)	Niveles NP (m)
Caudal Salto (m ³ /s)	1	0.919	0.782	0.568
Niveles Pdú (m)	0.919	1	0.905	0.691
Niveles FB (m)	0.782	0.905	1	0.897
Niveles NP (m)	0.568	0.691	0.897	1

Una vez calculado el valor del coeficiente de correlación interesa determinar si tal valor obtenido muestra que las variables están relacionadas en realidad o tan solo presentan dicha relación como consecuencia del azar. Para ello se utiliza el test de Student, determinando el número de desviaciones tipo que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, el estadígrafo t según la Ecuación A.3.

$$t = \frac{r_{xy}}{\sqrt{\frac{1-r_{xy}^2}{N-2}}} \quad (\text{A.3})$$

Siendo r_{xy} el valor de correlación entre las variables distintas x e y , éstas cualquiera de las antes mencionadas. Se compara el valor obtenido con el existente en las tablas para un cierto nivel de significación del 95 % y $N-2$ grados de libertad, siendo N la cantidad de registros que se dispone de los cuatro puntos de medida para la misma fecha. Al ser todos los estadígrafos mayores a los tabulados, se rechaza la hipótesis nula, aceptando que efectivamente los datos están correlacionados. Se observa claramente que los caudales presentan correlación positiva con los datos de niveles de las restantes estaciones limnimétricas, como era de suponerse. Como conclusión, a medida que aumenta la distancia entre Salto y la estación de registro, se observa una disminución en el valor de correlación de niveles y caudales erogados por la Represa. En el caso de Nueva Palmira, solamente se tiene una correlación de casi un 57 %, ocasionado por la influencia del río de la Plata y del río Paraná. También interesante resulta que los datos de Fray Bentos presentan una mejor correlación con los registros de Nueva Palmira que con los caudales de la Represa.

Apéndice B

Resultados de la configuración seleccionada en Paysandú

En este anexo se presenta los resultados obtenidos para la sección del río correspondiente a Paysandú. Primero se desarrolla lo correspondientes a la etapa de calibración y seguidamente la etapa de validación.

Debido a las características de la sección configurada en Paysandú, la misma no presenta inversión parcial. Si sucede un evento de inversión, éste sucede de forma completa en toda la sección.

B.1. Resultados para períodos seleccionados, etapa de calibración

B.1.1. Situación caudales bajos

En el caso de Paysandú, la correlación entre los datos de nivel del modelo y los registrados es menor respecto a la obtenida en Fray Bentos. También las diferencias promediales y máximas son mayores. Los valores se indican en la Tabla B.1.

Esto se debe a que cuando sucede la onda de caudal (entre las horas 300 y 400 de la serie aproximadamente, Figura B.2) los niveles obtenidos tienden a acompañar dicha onda, mientras que los registros reales no. Sin embargo, luego de transcurrida esta onda de aporte de caudales los niveles obtenidos por el modelo acompañan adecuadamente a los reales, aunque los picos máximos no logran alcanzar valores tan altos como los reales, habiendo diferencias de hasta 30cms. En la Figura B.1 se esquematizan los resultados

obtenidos y los registros de medida. A partir de la misma es posible inferir que inclusive con un caudal bajos de $2000\text{m}^3/\text{s}$ existen diferencias entre ambas curvas.

Lo antes descripto podría estar indicando que las profundidades de la sección de Paysandú en el modelo se encuentran más elevadas que en la realidad, por lo que el efecto de marea no trasciende de la forma que muestran los registros.

TABLA B.1: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales bajos, etapa de calibración

Coefficiente de Correlación	0.87
Diferencia Promedio	0.12
Diferencia Máxima	0.60

FIGURA B.1: Niveles en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de calibración

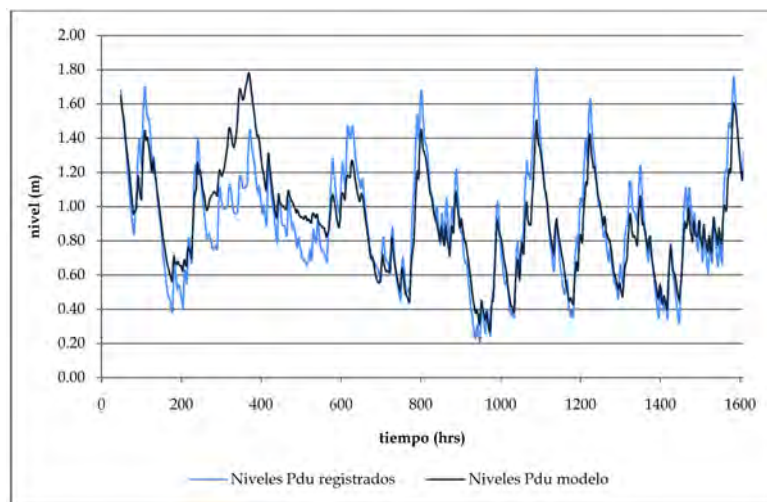
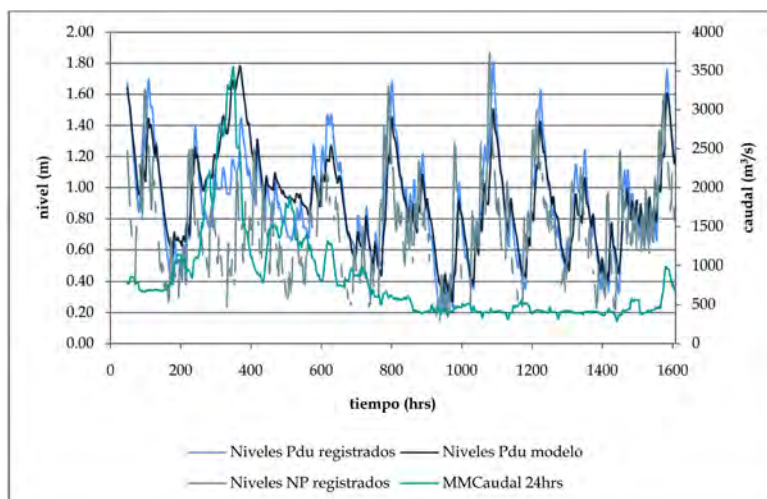
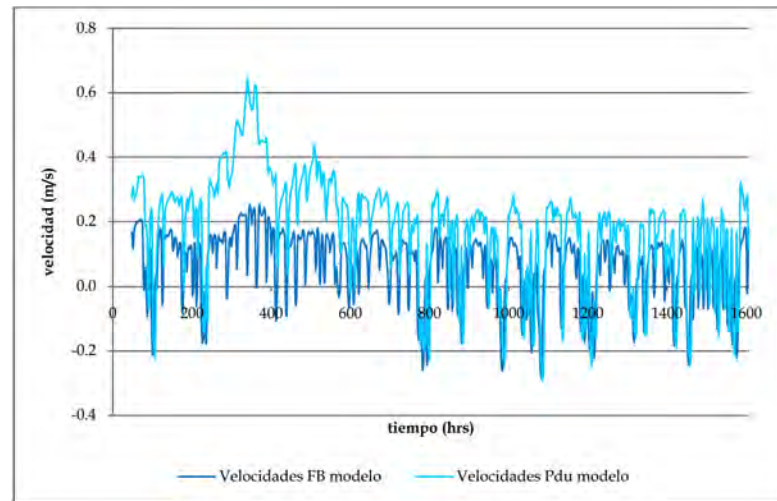


FIGURA B.2: Niveles en Paysandú y caudales de aporte para condiciones de caudales bajos, etapa de calibración



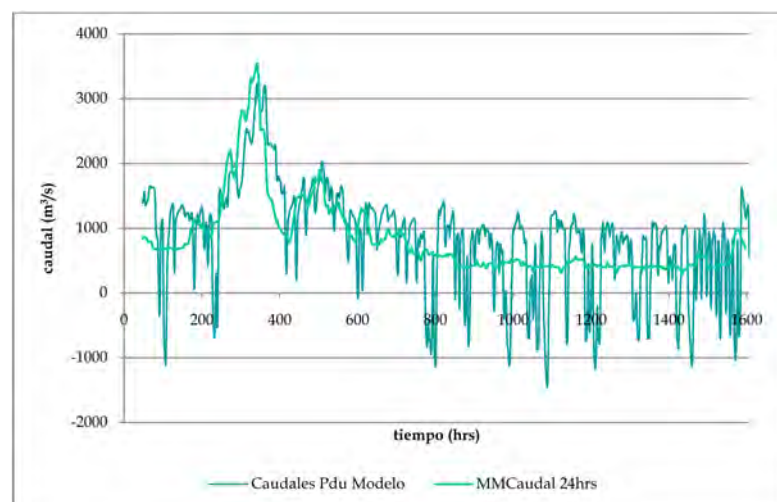
En la Figura B.3 se presenta la serie temporal de velocidades instantáneas determinadas en Paysandú junto con las obtenidas en Fray Bentos. Se observa que en general las inversiones en Paysandú coinciden con las de Fray Bentos, exceptuando el período temporal en que el caudal erogado por la Represa domina por sobre la marea (aproximadamente entre las horas 200 y 400 de la serie).

FIGURA B.3: Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de calibración



Por último, en la Figura B.4 se esquematizan los caudales instantáneos en la sección de Paysandú, los cuales reproducen lo indicado por las velocidades. Si bien en la sección de Fray Bentos se detecta un caudal de inversión máximo de casi $4000\text{m}^3/\text{s}$ (indicado anteriormente en el Capítulo 5), en este caso el máximo valor alcanza los $1400\text{m}^3/\text{s}$.

FIGURA B.4: Caudales en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de calibración



B.1.2. Situación caudales medios

La presente situación es la que presenta mayores desviaciones respecto a los registros de mediciones, aunque la correlación entre la curva de resultados del modelo y la de los registros es relativamente buena.

A diferencia de los resultados presentados para Fray Bentos, en Paysandú las diferencias máximas entre las curvas de registros y resultados del modelo suceden para el escenario de caudales medios. En el caso de Fray Bentos sucedían para el escenario de caudales altos.

Se observa a partir de la Figura B.5 que cuando domina el forzante de marea (entre las horas 500 y 600 de la serie) las diferencias son mínimas. En cambio, se incrementa la diferencia entre ambas curvas cuanto mayor sea el caudal de aporte del sistema.

No obstante, en el resto de la serie el comportamiento de la curva de resultados es similar a la de registros, a excepción del tramo temporal inmediatamente posterior a la influencia de marea, comprendido entre las horas 600 y 700 aproximadamente. Esto significa que los registros muestran una continuación de la influencia de marea, mientras que los resultados del modelo no.

En cuanto a las velocidades representadas en la Figura B.7, también son mayores que en Fray Bentos y permanecen siempre positivas. Por tanto, las inversiones detectadas en Fray Bentos no se extienden hasta Paysandú. En general, las velocidades en Paysandú duplican las velocidades de Fray Bentos. En algunos instantes pueden ser aún mayores al doble.

Al igual que el caso anterior, las diferencias entre ambas curvas podrían estar mostrando que si bien la sección de Paysandú podría estar bien representada, las profundidades de la misma no lo estarían. Otra razón podría ser que el tramo entre la Represa y Paysandú en la realidad dispondría de mayor ancho o profundidad, lo que atenuaría los niveles en Paysandú.

TABLA B.2: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales medios, etapa de calibración

Coefficiente de Correlación	0.91
Diferencia Promedio	0.95
Diferencia Máxima	2.27

Por último, se presenta en la Figura B.8 la serie de caudales instantáneos obtenidos en la sección de Paysandú, la cual condice con lo mencionado anteriormente. Es posible inferir que los caudales en Paysandú reproducen prácticamente la curva de caudales erogados por la Represa en gran medida.

FIGURA B.5: Niveles en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de calibración

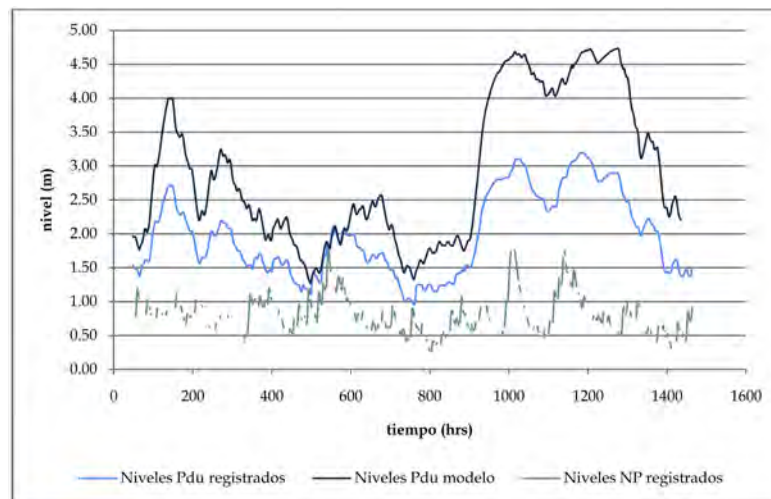


FIGURA B.6: Niveles en Paysandú y caudales de aporte para condiciones de caudales medios, etapa de calibración

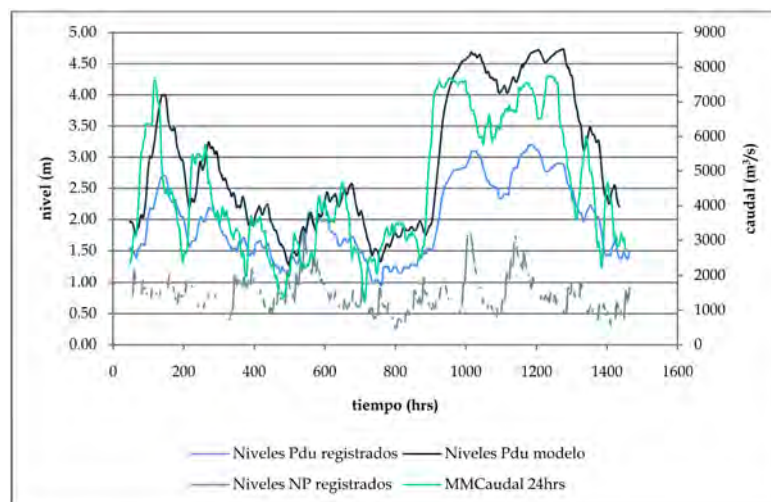


FIGURA B.7: Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de calibración

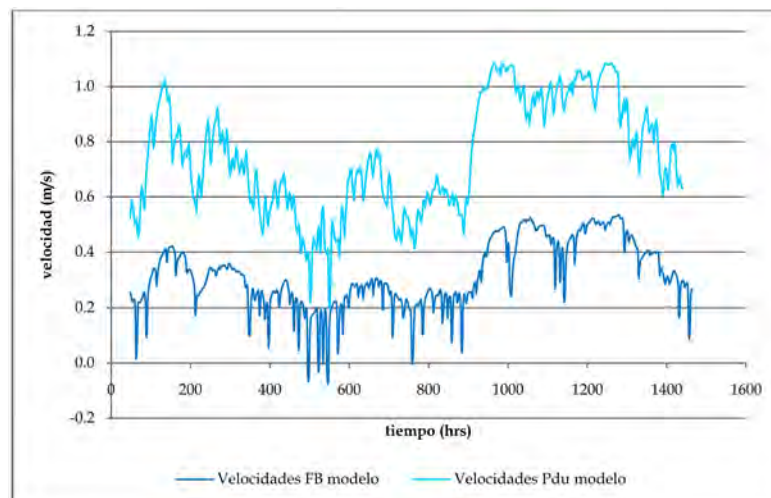
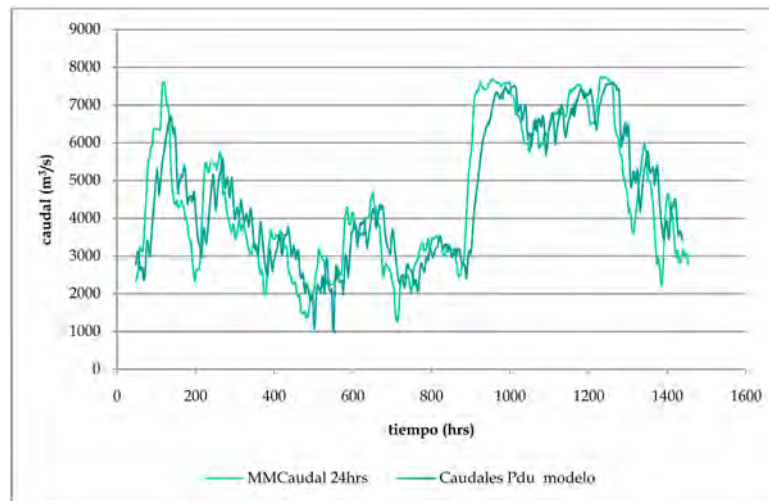


FIGURA B.8: Caudales en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de calibración



B.1.3. Situación caudales altos

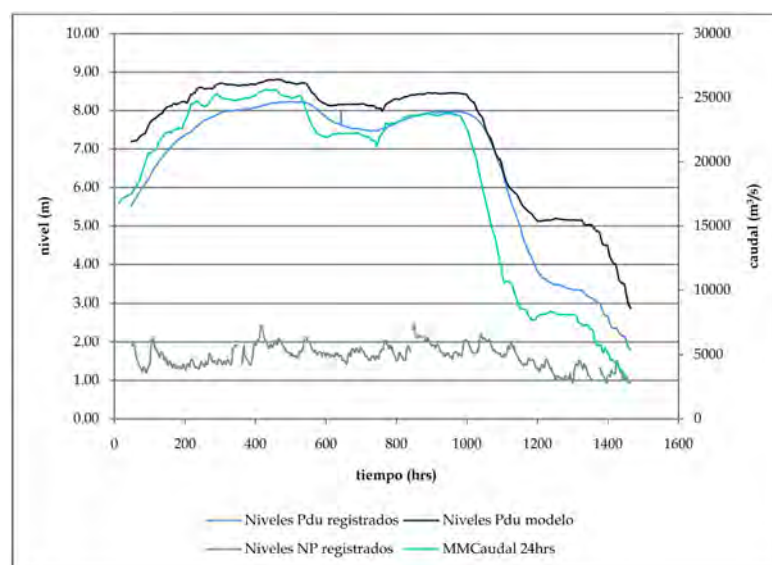
Como fue anticipado en la sección anterior, este escenario presenta en general menores diferencias que el de caudales medios en la sección de Paysandú. En la Tabla B.3 se presenta el coeficiente de correlación entre las curvas de registros y resultados, así como diferencias promedial y máxima entre ambas.

Cuando los caudales son extremadamente elevados, pueden identificarse diferencias más pequeñas que para el tramo final de la serie en donde escurren caudales del entorno de $8000\text{m}^3/\text{s}$. En la Figura B.9 se muestran las series de caudales y las de resultados del modelo en Paysandú, así como valores reales tanto en este último como en Nueva Palmira.

TABLA B.3: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales altos, etapa de calibración

Coeficiente de Correlación	0.98
Diferencia Promedio	0.83
Diferencia Máxima	1.92

FIGURA B.9: Niveles en Paysandú y caudales de aporte para condiciones de caudales altos, etapa de calibración



B.2. Resultados para períodos seleccionados, etapa de validación

B.2.1. Situación caudales bajos

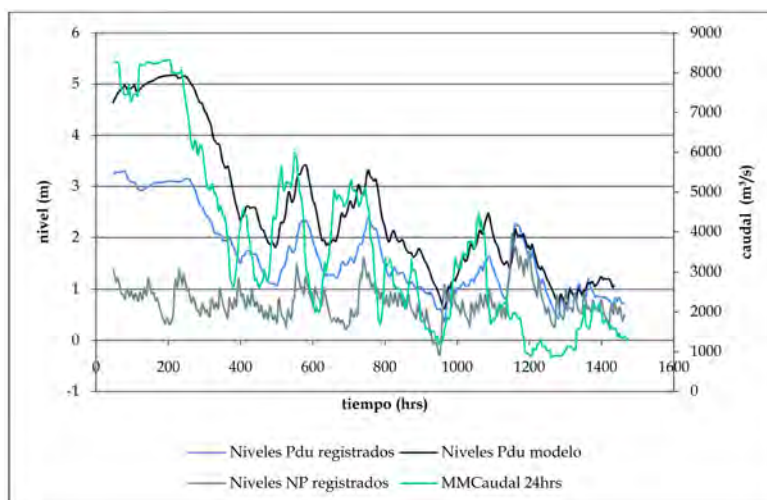
Este caso replica lo comentado antes en cuanto a la diferencia del comportamiento de los resultados frente a los registros. Si bien en general la curva de resultados reproduce el mismo comportamiento que la de registros, existen diferencias en sus valores, incluso del orden de 2m para caudales en los 8000m³/s (Tabla B.4). Por el contrario, en los momentos en que domina la marea, esto es, desde la hora 1150 hasta casi las 1400hrs de la serie, la curva de resultados presenta valores muy cercanos a los reales. También esto sucede unas horas antes de la hora 1000 de la serie, aunque de forma menos prolongada. Esto se expone en la Figura B.10.

TABLA B.4: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales bajos, etapa de validación

Coefficiente de Correlación	0.97
Diferencia Promedio	0.87
Diferencia Máxima	2.09

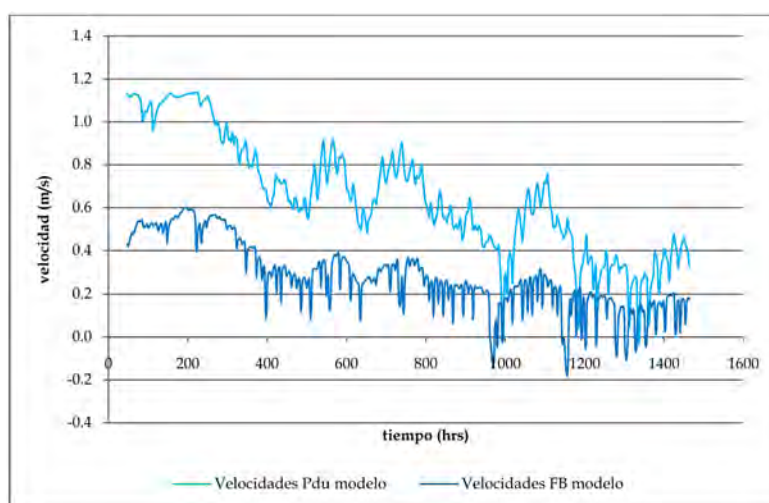
En dichas ventanas temporales (desde las 900 y 1000 horas y entre las 1150 y 1400 horas) se hallan eventos de inversión también en la sección de Paysandú, aunque breves y con pequeñas velocidades negativas. La primera se mantiene por un lapso de 2 horas con velocidades de 0.017m/s y la segunda por 3 horas con velocidades 0.033m/s. Estas velocidades son sensiblemente menores a las que adquiere Fray Bentos en dichos momentos,

FIGURA B.10: Niveles en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de validación



las cuales son ambas en el entorno de 0.15m/s. En la Figura B.11 se presenta la serie de velocidades en Paysandú y en la Figura B.12 los caudales, cuyos valores de inversión son prácticamente despreciables, rondando los 100m³/s.

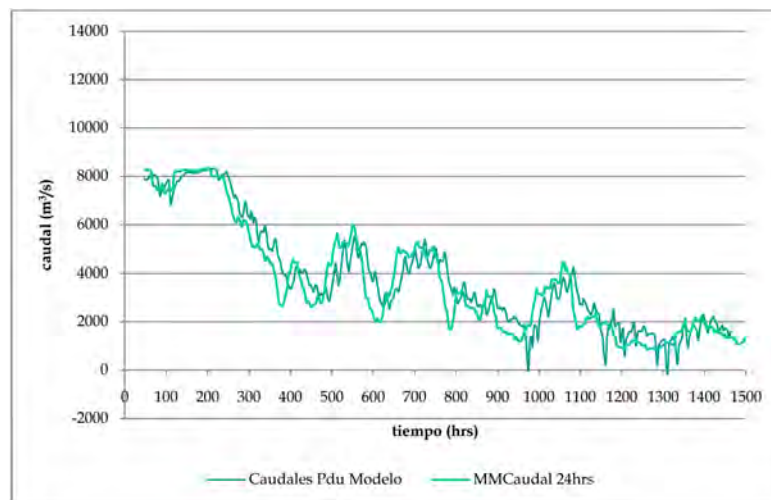
FIGURA B.11: Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de validación



B.2.2. Situación caudales medios

En este escenario disminuye la correlación entre los resultados obtenidos y los datos reales respecto al escenario recién presentado, aunque es prácticamente igual al escenario homólogo de la etapa de calibración. Las diferencias entre ambas curvas se incrementan a mayor caudal. En la Tabla B.5 se presenta el coeficiente de correlación entre las curvas de registros y resultados, así como también las diferencias promedial y máxima entre

FIGURA B.12: Caudales en Paysandú para condiciones de caudales bajos, etapa de validación

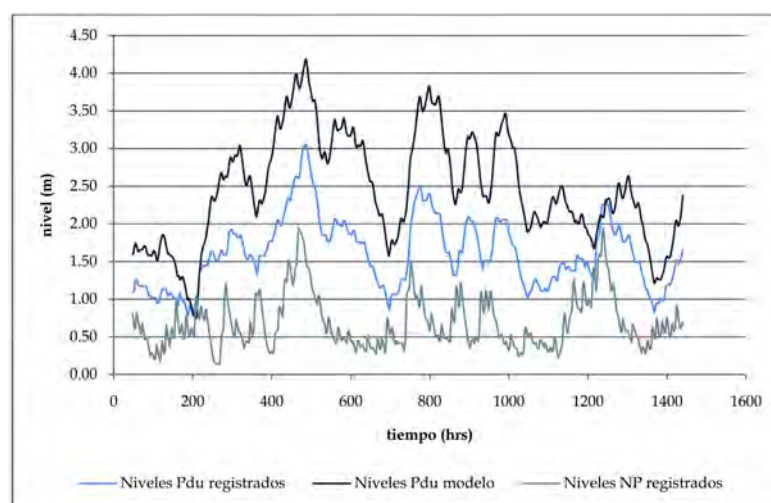


ambas. En la Figura B.13 se esquematizan los niveles obtenidos por el modelo, junto con los datos reales en Paysandú y en Nueva Palmira.

TABLA B.5: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales medios, etapa de validación

Coefficiente de Correlación	0.90
Diferencia Promedio	0.85
Diferencia Máxima	1.56

FIGURA B.13: Niveles en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de validación



En la Figura B.14 se presentan las velocidades obtenidas en Paysandú, siendo en su totalidad positivas y de mayor orden que las alcanzadas en Fray Bentos. La Figura B.15 expone los caudales obtenidos en la sección de Paysandú, los cuales responden al comportamiento de los caudales erogados por la Represa.

FIGURA B.14: Velocidades en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de validación

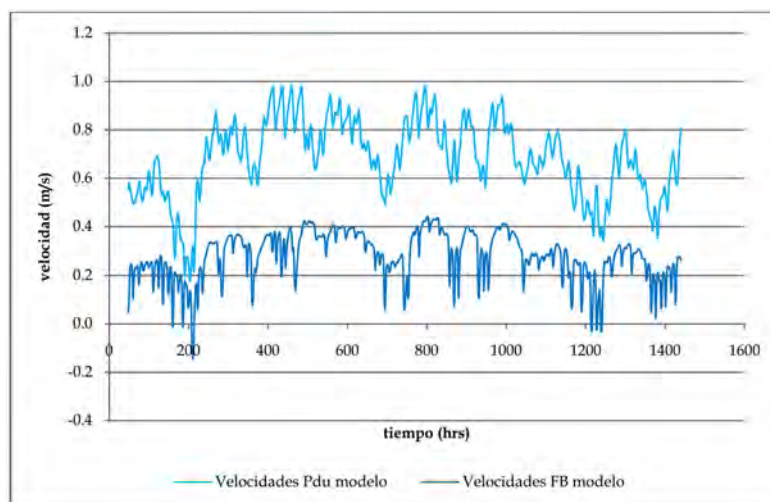
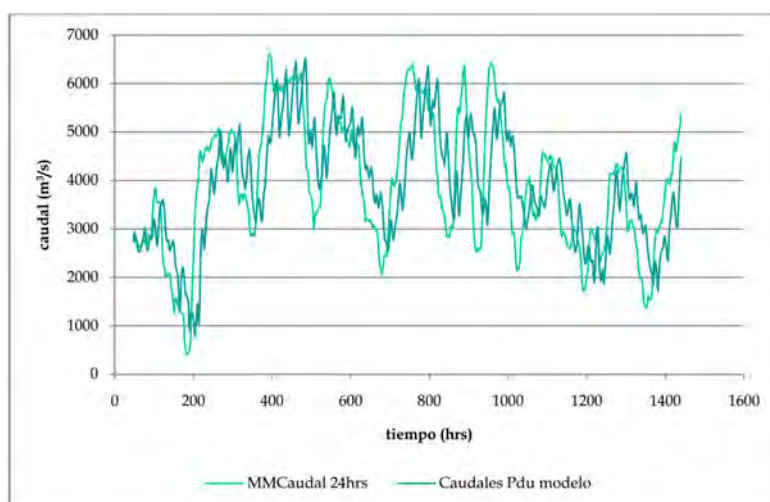


FIGURA B.15: Caudales en Paysandú para condiciones de caudales medios, etapa de validación



B.2.3. Situación caudales altos

El escenario de caudales altos de la etapa de validación reproduce un comportamiento en los niveles de Paysandú coherente con el obtenido para el mismo escenario en la etapa de calibración. Esto es, a medida que incrementa los caudales a valores extremos, las diferencias entre las curvas de resultados y registros disminuyen (Figura B.16).

En la Tabla B.6 se presenta el coeficiente de correlación entre las curvas de registros y resultados y las diferencias promedial y máxima entre ambas, al igual que los casos anteriores.

TABLA B.6: Relación entre niveles obtenidos por el modelo y registros en sección Paysandú para caudales altos, etapa de validación

Coefficiente de Correlación	0.99
Diferencia Promedio	0.91
Diferencia Máxima	1.87

FIGURA B.16: Niveles en Paysandú para condiciones de caudales altos, etapa de validación

