

INICIATIVA PRIVADA PARA LA AMPLIACIÓN Y MEJORA DE LA CAPACIDAD DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE AL ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO

PROYECTO ARAZATÍ



ESTUDIO DE FACTIBILIDAD (RD N°195/21)

VOLUMEN N°1:
ESTUDIOS BÁSICOS Y DE CONCEPCIÓN DEL PROYECTO



SAN JOSÉ/MONTEVIDEO – URUGUAY
MARZO 2022

3 PROYECCIÓN DE DEMANDA

3.1 Alcance y objetivos

El alcance del presente capítulo incluye la presentación de los antecedentes más recientes, relativos a la proyección de la demanda de agua potable del sistema de producción y distribución de agua potable del área metropolitana de Montevideo, las principales consideraciones que involucraron dichos trabajos, para finalmente fundamentar la selección del escenario más apropiado y su adecuación a las necesidades del Proyecto.

El objetivo principal del mismo es el de establecer la proyección de la demanda para el horizonte del proyecto fijado al año 2045, y a su vez determinar los requisitos de agua bruta para satisfacer esta demanda.

3.2 Introducción

En este capítulo, se analiza la demanda de agua que permita asegurar el abastecimiento de agua potable de la ciudad de Montevideo y su área metropolitana (Sistema Metropolitano), en cantidad suficiente con horizonte de Proyecto 2045.

La información de base, parte de las conclusiones de los estudios de factibilidad realizados por AGUASUR en 2013 (citado como "AGUASUR 2013"), consistentes en la elaboración de un Estudio que analizó la situación, seleccionó y propuso la alternativa más conveniente para el aseguramiento del abastecimiento de agua potable al Sistema Metropolitano hasta el año 2045, basándose en metodologías que contemplaron el análisis técnico-económico de funcionalidad y eficiencia, así como las posibles situaciones de vulnerabilidad para los distintos componentes del Sistema.

Adicionalmente, en los últimos 15 años, se han efectuado varios estudios asociados a este propósito, donde se destacan: "Plan Director de Abastecimiento de Agua Potable a Montevideo" (citado como "PDAPM 2000"), Consorcio Sogreah-Safege-CSI, 2000; "Transferencia de agua del Río de la Plata a Montevideo y reforzamiento institucional de OSE", Sogreah, 2003; "Estudios básicos para el recrecimiento del embalse de Paso Severino", IMFIA-UDELAR, 2010; etc.

Posteriormente, SEINCO - HAZEN & SAWYER durante 2017 (citado como "SEINCO H&S 2017"), desarrollaron trabajos contratados por CAF-OSE, realizados específicamente con el propósito de atender a las nuevas demandas de crecimiento proyectado del sistema, y particularmente para dotar a la Planta Potabilizadora de Aguas Corrientes, de las herramientas tecnológicas necesarias para atender episodios de presencia de metabolitos generadores de olor y sabor y/o tóxicos en el agua bruta del río Santa Lucía.

El presente capítulo constituye una síntesis que resume el conocimiento del tema y pretende dar satisfacción al objetivo inicial mencionado, determinando la "demanda necesaria para asegurar el abastecimiento de agua potable para el Sistema Metropolitano de Montevideo".

3.3 Recopilación de antecedentes

3.3.1 Proyección PDAPM 2000

Del PDAPM 2000 (FASE A, Capítulo 3. “Prospectiva del Desarrollo Futuro”, TEXTO PRINCIPAL, Apartado 3.2.1), se reproducen las tres hipótesis que definían la demanda en el año 2000.

- La hipótesis 0 representa la evolución de la demanda si no se emprende ninguna acción de reducción de las pérdidas. Se hizo la hipótesis que estas pérdidas seguían aumentando un 1% cada 5 años y que el consumo per cápita (cpc) se mantenía constante.
- La hipótesis 1 (baja) representa la evolución de la demanda suponiendo una reducción de las pérdidas de un 5% entre los años 2000 y 2005, y una baja del cpc del 5% entre los años 2000 y 2010.
- La hipótesis 2 (alta) representa la evolución de la demanda suponiendo una reducción de las pérdidas del 5% entre los años 2000 y 2010, y un cpc constante.

Se reproduce la figura 3.2.1-10 del PDAPM 2000 “Sistema Metropolitano + expansiones. Histórico de los volúmenes producidos y facturados. Proyección de la demanda”, en la que se aprecia la comparación de las distintas hipótesis.

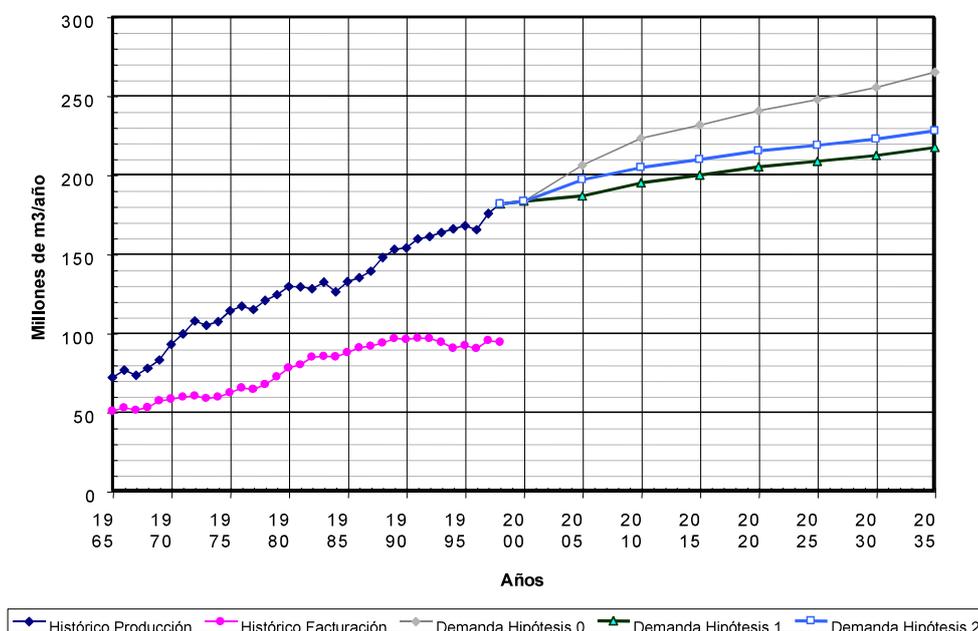


Figura 3-1: Volúmenes producidos y facturados, y proyección de demanda (PDAPM)

3.3.2 Proyección estudio AGUASUR 2013

Este estudio de proyección utilizó las siguientes fuentes de información:

- Información del censo del año 2011.
- Escenarios socioeconómicos desarrollados en el año 2009 por la Oficina de Planeamiento y Presupuesto – Presidencia de la República, “Estrategia Uruguay III Siglo” para el período 2006-2030.
- Estudio realizado por la Universidad de la República para OSE en los años 2000/2001, donde se estimaron las elasticidades producto y precio de la demanda de agua para residencias e industrias.

A partir de estos supuestos y de la información manejada, el presente estudio consideró los siguientes tres escenarios para la demanda:

1. Escenario de máxima demanda (se mantiene el indicador agua facturada / agua elevada)
2. Escenario con pérdidas mantenidas hasta el año horizonte de 2045 (se mantiene el volumen total de pérdidas en todo el horizonte de proyecto)
3. Escenario con agua facturada más asentamientos igual al 70% del agua elevada.

Los escenarios antes indicados se traducen en una tasa de crecimiento anual de la demanda de 0,70, 0,51 y 0,03 %, para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.

Bajo las condiciones antes expuestas se presenta a continuación el consumo medio anual y máximo diario de agua tratada para el año 2012, así como también el resultado de la proyección para los distintos escenarios considerados.

Tabla 3-1: Proyección demanda de agua potable (AGUASUR).

Escenario / Condición	Medio Diario (m ³ /d)	Máximo Diario (m ³ /d)
Año 2012	604.852	670.000
Proyección 2045 - Escenario 1	757.999	839.642
Proyección 2045 - Escenario 2	715.707	792.794
Proyección 2045 - Escenario 3	610.487	676.242

3.3.3 Proyección SEINCO H&S 2017

El estudio antecedente de SEINCO - H&S 2017 actualizó lo hecho a instancias del estudio de AGUASUR 2013, tomando como base la información de demanda del año 2016.

Tabla 3-2: Proyección demanda de agua potable (SEINCO - H&S 2017).

Escenario / Condición	Medio Diario (m ³ /d)	Máximo Diario (m ³ /d)
Año 2016	610.076	684.483
Proyección 2045 - Escenario 1	745.339	836.243
Proyección 2045 - Escenario 2	708.969	795.737
Proyección 2045 - Escenario 3	612.479	687.179

3.4 **Proyección de la demanda de agua potable del sistema Metropolitano para 2035-2045**

Para el análisis incluido en el presente documento se descarta el Escenario 3 del estudio antecedente SEINCO H&S 2017 debido a la baja posibilidad de ocurrencia del mismo.

Considerando válidas las proyecciones al 2045, se realiza la proyección al año 2035 tomando como base la información de agua elevada al sistema al año 2016 y considerando las tasas de crecimiento de demanda inicialmente consideradas en el estudio de AGUASUR 2013.

Tabla 3-3: Síntesis proyección demanda de agua potable.

Escenario / Condición	Medio Diario (m ³ /d)	Máximo Diario (m ³ /d)
Año 2016	610.076	684.483
Proyección 2035 - Escenario 1	646.600 ⁽¹⁾	776.046⁽²⁾
Proyección 2035 - Escenario 2	646.600 ⁽¹⁾	750.018 ⁽³⁾
Proyección 2045 - Escenario 1	745.339	836.243
Proyección 2045 - Escenario 2	708.969	795.437

- (1): según proyección PDAPM
- (2): según antecedente AGUASUR, tasa 0,7%
- (3): según antecedente AGUASUR, tasa 0,51%

Aplicando entonces, de acuerdo a lo indicado por la contraparte de OSE, un consumo propio de Planta de 50.000 m³/d (incluye consumos de lavado de filtros, generación de lodos, etc.), se determina el consumo de agua bruta proyectado de la Planta:

Tabla 3-4: Síntesis proyección consumo de agua bruta en PTAP Aguas Corrientes.

Escenario / Condición	Medio Diario (m ³ /d)	Máximo Diario (m ³ /d)
Año 2016	660.076	734.483
Proyección 2035 - Escenario 1	696.600	826.046
Proyección 2045 - Escenario 1	795.339	886.243

En resumen, el sistema de producción y distribución de agua potable del área metropolitana de Montevideo requerirá de una **demanda de agua potable de 840.000 m³/d** y de una **demanda asociada de agua bruta de 890.000 m³/d** para el horizonte del proyecto del 2045.

3.5 Otras localidades de San José a ser abastecidas por el proyecto

Las localidades Ecilda Paullier, Rafael Perazza, Radial, Puntas de Valdez, Kiyú-Ordeig, Rodríguez, Libertad, Playa Pascual y Ciudad del Plata del Departamento de San José se encuentran en las cercanías de la tubería aductora al sistema Metropolitano y por tanto serán factibles de ser abastecidas por el Proyecto. Actualmente las mismas se abastecen de agua subterránea, en algunos casos contando con problemas de presencia de Arsénico y representan aproximadamente un 55% de la población total del departamento.



Figura 3-2: Localidades de San José que posiblemente serán abastecidas por el proyecto.

La siguiente tabla presenta la población de las localidades para los censos 1996, 2004 y 2011, así como la proyección lineal para el horizonte de 2045.

Tabla 3-5: Datos censales y proyección de población para las localidades de San José.

Localidad	Datos Censales			Proyección
	1996	2004	2011	2045
Ecilda Pauller	1.976	2.351	2.585	3.990
Rafael Perazza	931	1.235	1.277	2.116
Radial	145	187	250	481
Puntas de Valdez	1.036	1.267	1.491	2.517
Kiyú-Ordeig	414	332		332
Rodríguez	2.354	2.561	2.604	3.205
Libertad	8.353	9.196	10.166	14.219
Playa Pascual	4.584	5.653	6.870	11.992
Ciudad del Plata	20.712	26.582	31.146	54.929

Considerando una dotación con pérdidas de 250 l/hab/día, se requerirá de una demanda de agua potable de 23.500 m³/d al horizonte de 2045. Esta demanda representa aproximadamente el 10% de la capacidad máxima de producción de la PTAP, por lo que desde el punto de vista de la capacidad de producción del nuevo sistema (y sin considerar las obras conexas que sean necesarias) es perfectamente factible de abastecer desde esta fuente.

Tabla 3-6: Demanda estimada para las localidades de San José.

Localidad	Demanda c/ pérdidas (m3/d)
Ecilda Pauller	997
Rafael Perazza	529
Radial	120
Puntas de Valdez	629
Kiyú-Ordeig	83
Rodríguez	801
Libertad	3.555
Playa Pascual	2.998
Ciudad del Plata	13.732
Total	23.445

3.6 Demanda de seguridad

Un criterio fundamental para la justificación del nuevo Proyecto, está asociado al aumento de la seguridad operacional reduciendo la vulnerabilidad del abastecimiento de agua potable al sistema metropolitano de Montevideo. A esos efectos es esencial disponer de un segundo centro de producción y aducción, a partir de una nueva fuente de agua bruta independiente de la actualmente utilizada y capaz de satisfacer hasta un 25% de la demanda máxima a fin de período. Ante un escenario de emergencia, con pérdida transitoria de la capacidad de abastecimiento a partir del sistema principal actualmente en operación de Aguas Corrientes, el nuevo sistema de producción Arzatí estará en condiciones de proveer dicha capacidad (207.000 m3/d), equivalente a una dotación disponible de 100 l/hab/día.

De este modo, la capacidad de producción de la PTAP RDLP de 229.000 m3/d, asegura dicha capacidad de emergencia así como el abastecimiento a las localidades de San José.

4 ESTUDIO DE CALIDAD DE AGUA BRUTA EN LA ZONA DE CAPTACIÓN

4.1 Alcance y objetivos específicos del capítulo

El presente capítulo tiene por objetivo específico realizar una descripción física del cuerpo Río de la Plata, fuente complementaria de agua bruta propuesta para la ampliación del sistema metropolitano de abastecimiento de agua potable a Montevideo. Incluye una caracterización desde el punto de vista físico-químico e hidrobiológico de tal fuente con preferencia al área de potencial captación entre Pto. Arazatí y Bocas del Arroyo Cufre. De esta forma se procura tener un conocimiento acabado de las características de la fuente a fin de confirmar su capacidad potencial como fuente y resumir las condiciones de la misma, a través de sus parámetros relevantes, a los efectos de seleccionar adecuadamente el proceso de tratamiento en la nueva PTAP Río de la Plata.

El alcance del capítulo incluye un primer cuerpo de información y análisis relevante en el propio capítulo, complementado en el Anexo 11.2 por información y estudios complementarios de calidad.

4.2 El Río de la Plata

El Río de la Plata es un cuerpo de agua de 250 km de longitud y 38.800 km² de superficie, se extiende hacia el sudeste presentando un ancho de 32 km en su origen, entre Colonia (Uruguay) y La Plata (Argentina), 100 km en su zona media entre Montevideo y Punta Piedras, y hasta 230 km en su desembocadura en el mar, entre Punta del Este y Cabo San Antonio.

A lo largo de la costa uruguaya y a partir del gradiente salino generado por la interacción de aguas del Río de la Plata con el océano Atlántico, y las características batimétricas, es posible diferenciar cinco grandes ambientes, con una relativa homogeneidad física interna, ubicados como bandas con dirección SW-NE:

- Ambiente Continental: se caracteriza por una salinidad < 0,5 psu (unidades prácticas de salinidad o g/l)
- Ambiente de Mezcla: con salinidades entre 0,5 y 25 psu.
La Plataforma Costera: con salinidades mayores a 25 psu, ubicada al SE de la isobata de 50 m.
- Plataforma Profunda: con rango batimétrico 50 – 220 m.
- Talud Continental: con rango batimétrico mayor a 200 m.



Figura 4-1: Ambientes presentes en el Río de la Plata y su Frente Marítimo

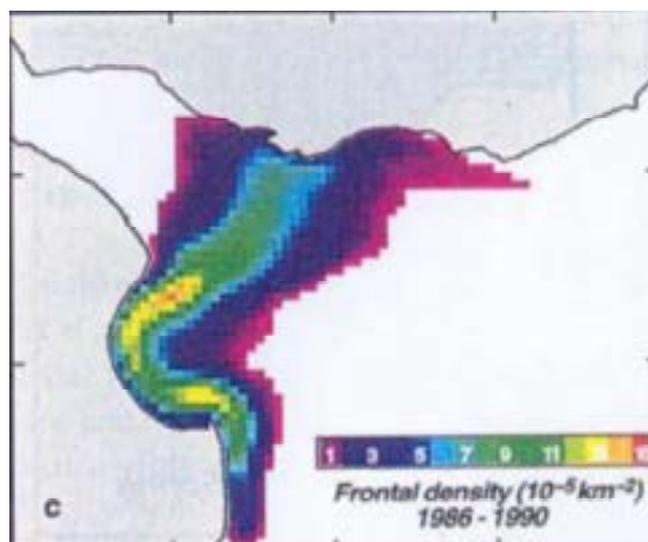
La interacción entre masas de agua de diferente origen, continentales y marinas, definen al Río de la Plata como un sistema estuarial. La principal característica fisicoquímica de estos ambientes es la gran variabilidad en la salinidad y turbidez, que varían a escala espacial y temporal, dependiendo de las descargas de sus principales tributarios, los ríos Paraná y Uruguay, y de la intrusión de aguas marinas desde el Océano Atlántico.

El Río de la Plata tiene una descarga promedio de $23.000 \text{ m}^3/\text{s}$, que genera un Frente Salino al encontrarse con el océano abierto. La intrusión de aguas de plataforma más densas sobre una topografía de fondo en pendiente toma la forma de una cuña salina la cual genera un sistema de borde con un frente de salinidad superficial y otro de fondo. Este frente, importante para las pesquerías, modifica la circulación costera y la estratificación vertical. El Río de la Plata, a su vez, genera una extensa pluma de baja salinidad, rica en nutrientes, sobre la plataforma continental sudamericana.

Sobre la costa Norte, Uruguay, del Río de la Plata el Frente Salino tiene su límite Este a la altura de la desembocadura del río Santa Lucía, siendo escasas las ocasiones en que se haya desplazado hacia el Oeste de este sector, únicamente en condiciones de sequía extrema con muy baja descarga del río. Las descargas fluviales de ríos como el Santa Lucía y otros cursos menores solo tienen incidencia a nivel local, dado el escaso volumen que aportan en comparación con el cuerpo de agua principal.

Este límite cambia dadas las condiciones de descarga y la estacionalidad. En temporadas cálidas cuando ocurren sequías y disminuye el aporte de la descarga fluvial de los ríos Paraná y Uruguay, es posible encontrar en la costa de Montevideo aguas salinas provenientes desde el Océano Atlántico. Mientras que en condiciones de precipitaciones abundantes en la cuenca de aporte, la descarga fluvial desplaza el agua marina, notándose hasta las costas de Maldonado las aguas de origen fluvial del Oeste.

La floculación de material en suspensión en el borde de la cuña salina y la re-suspensión de sedimentos debido a la fricción de la corriente de marea en el fondo forma un Frente de Turbidez que se extiende a lo largo de la isobata de 5 m, entre Montevideo y Bahía Samborombón. El Frente de Turbidez corresponde a la zona en la cual se registra el máximo de sedimentos en suspensión y es el resultado de procesos fisicoquímicos y mecánicos asociados con la interacción entre las aguas fluviales del Río de la Plata, aguas oceánicas de plataforma y la mezcla producida por la marea.



Fuente: Giordano & Lasta (2004).

Figura 4-2: Distribución media de densidad del frente de turbidez

La distribución media del Frente de Turbidez presenta una mayor variabilidad en la costa uruguaya, donde el rango de variación alcanza a los 200 km. Los mayores valores de densidad del frente forman una línea entre Montevideo y las cercanías de Punta Piedras y un arco paralelo a la costa en Bahía Samborombón, registrándose los máximos en la mitad Norte y el extremo Sur de la bahía.

La región costera de Uruguay comprendida entre la desembocadura del río Santa Lucía y la localidad de Juan Lacaze, departamentos de San José y Colonia, se ubica una parte en el ambiente de mezcla con condiciones estuariales, desde el río Santa Lucía hasta Punta del Tigre aproximadamente, y desde aquí hasta la localidad de Juan Lacaze en el ambiente fluvial.

Análisis hidrodinámicos realizados sobre las características de los flujos de agua en el Río de la Plata, indican que existe una escasa capacidad de mezcla de las aguas de los tributarios. Jaime & Menéndez (1999) y más tarde Jaime & Menéndez (2001), a través de modelación numérica establecieron que el flujo del Río de la Plata se distribuye en tres corredores de flujo, cada uno asociado a su correspondiente tributario, el Paraná de las Palmas, el Paraná Guazú y el río Uruguay, sin mezcla significativa de las aguas de cada tributario.



Fuente: <https://www.dinamo.gub.uy/visualizador>

Figura 4-3: Distribución media de densidad del frente de turbidez

La conclusión más significativa de este estudio es acerca de la calidad de agua del Río de la Plata, la influencia de estos corredores de flujo sobre el estatus ambiental del Río de la Plata es que la calidad del agua en cada una de las dos costas del Río de la Plata Interior (Argentina y Uruguay) es responsabilidad directa del manejo de las descargas antrópicas efectuadas por cada país.

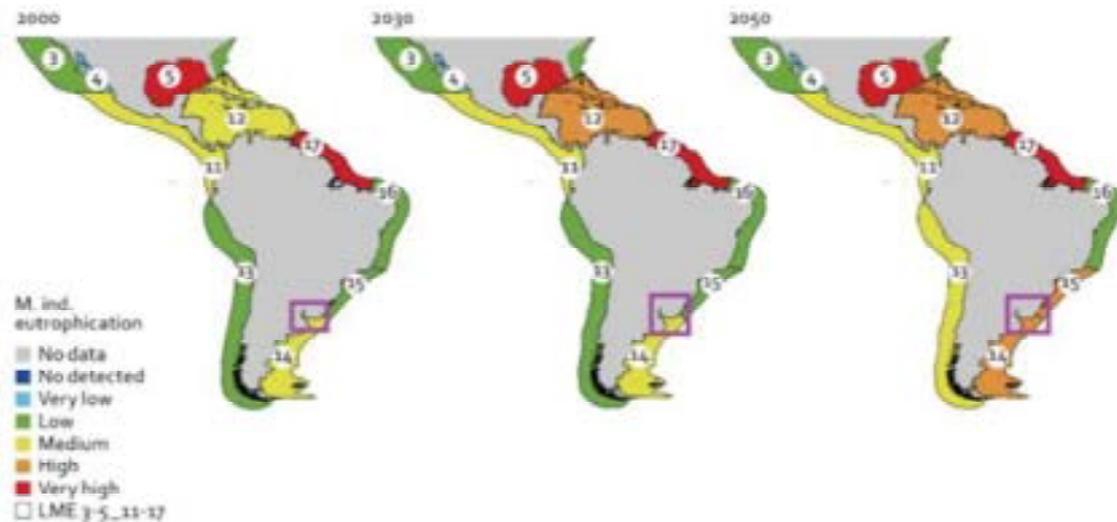
4.3 Caracterización físico-química e hidrobiológica

A continuación, se presenta un resumen conteniendo los aspectos principales de la caracterización físico-química e hidrobiológica del Río de la Plata, en capítulo Anexo 11.2, se encuentra un detalle de los diferentes parámetros considerados.

Históricamente, la costa Sur del Uruguay, región costera de los departamentos de Colonia, San José, Montevideo, Canelones, Maldonado y Rocha, por sus características ambientales pueden encontrarse tres regiones claramente diferenciales: el Río de la Plata, la costa Atlántica y la Bahía de Montevideo.

El Río de la Plata tiene su límite en Punta del Este, extendiéndose desde aquí y hacia el Este el Océano Atlántico. Los límites son difusos, varían temporal y geográficamente regulados por la descarga del río Paraná y en menor grado, el río Uruguay. En la costa uruguaya, la Bahía de Montevideo representa un punto focal de contaminación, siendo considerada la región de la costa con uno de los mayores grados de deterioro ambiental, debido a más de 150 años de afectaciones y modificaciones antrópicas, sin embargo, este gradiente se diluye hacia la región costera cercana presentando el Río de la Plata una mejor calidad ambiental en la mayoría de las variables físicoquímicas (Gautreau 2006; Muniz et al. 2006).

Trabajos recientes, indican que el Río de la Plata es un cuerpo con características eutróficas a mesotróficas, mientras que modelaciones realizadas sobre la carga de nutrientes indican que el escenario futuro regional presenta el aporte de grandes cantidades de nutrientes que ingresarán a las aguas costeras generando un aumento en el nivel trófico.



Fuente: Tambuti & Gómez (eds.) (2020). El recuadro marca la ubicación del Río de la Plata

Figura 4-4: Indicador de nutrientes para Latinoamérica y el Caribe modelado entre 2000 y 2050

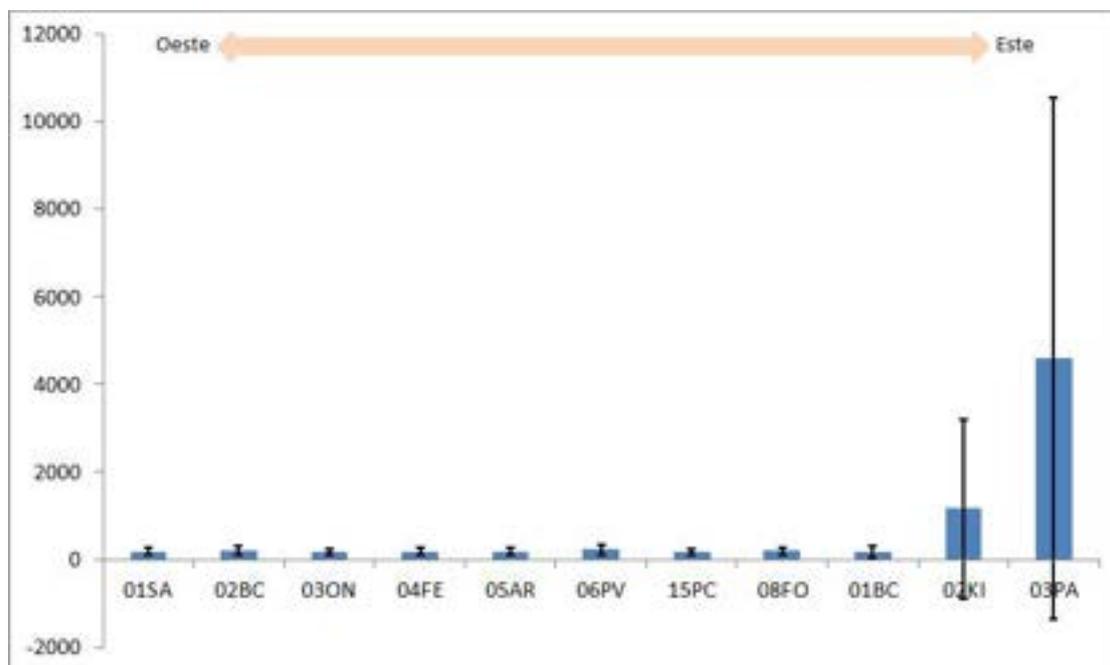
Las condiciones actuales, en tanto, muestran un Río de la Plata con un buen estatus sanitario en función de la mayoría de los parámetros de calidad analizados, que responden de la manera esperada según las condiciones hidrodinámicas imperantes al momento de la medición, como son las variables de temperatura, conductividad, concentración de oxígeno disuelto y pH, pero con señales que indican la actuación de forzantes, que de manera temporal o cuasi-permanente, condicionan el estatus ambiental del sistema, como son eventos de floraciones cianobacterianas.

La conductividad y salinidad son parámetros recíprocos, es decir, son directamente proporcionales, la salinidad se usa con mayor frecuencia para describir aguas oceánicas, y la conductividad es empleada en mayor medida en aguas fluviales.

El parámetro de conductividad determinada por la red de monitoreo de DINAMA, muestra el típico comportamiento creciente desde el Oeste, aguas dulces de baja conductividad, hacia el Este, aguas con mayor incidencia de aguas atlánticas. Como se observa en la figura siguiente hasta la estación de muestreo 01BC, ubicada en Bocas del Cufre, San José, los valores promedio de conductividad indica el ambiente continental, donde predominan aguas de origen fluvial, y cuyos desvíos estándar muestra una muy baja variación.

Ya en la estación 02KI, en Kiyú, y de manera más visible en Playa Pascual (03PA), es notorio el efecto de las aguas provenientes desde el Este, más salinas. En el período entre fines de 2016 y marzo de 2021 que considera el estudio, los valores medios en estas dos estaciones de muestreo, junto a sus desvíos estándares correspondientes, se

incrementan de manera significativa en comparación con las estaciones hacia el Oeste de O2KI, siendo la zona de Playa Pascual el límite máximo aproximado de intrusión de las aguas marinas.

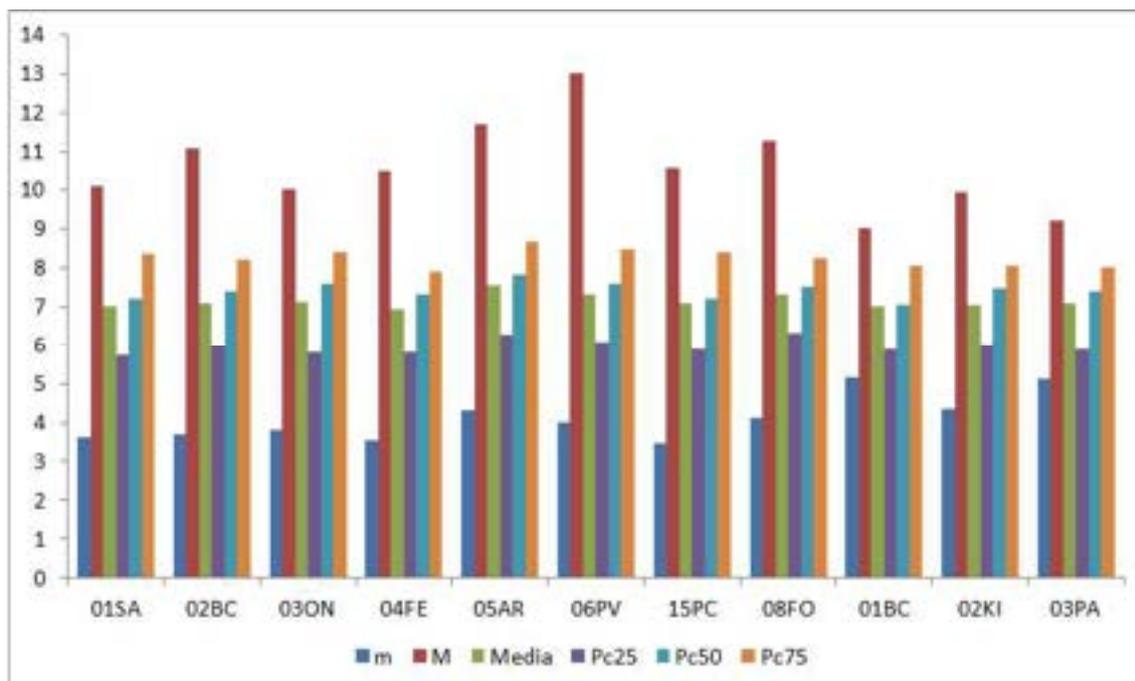


Fuente: elaborado en base a DINAMA

Figura 4-5: Conductividad media ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y desvío estándar por estación de muestreo .

Uno de los parámetros de calidad determinados en las estaciones costeras de DINAMA de mayor relevancia para el cumplimiento del objetivo de uso del Río de la Plata aplicado al presente estudio, como cuerpo de agua Clase 1 Aguas destinadas o que puedan ser destinadas al abastecimiento de agua potable, es la concentración de oxígeno disuelto. Como se menciona en el Anexo 11.2.2.3 sobre la concentración de oxígeno disuelto, la mayor parte de los resultados de este parámetro en las estaciones de monitoreo costero son aceptables para el valor de referencia de 5 mg/L; los valores que fueron menores a este límite tuvieron lugar principalmente durante la temporada estival.

Si bien, como se observa en la Figura 4-6, en todas las estaciones de monitoreo entre Colonia y San José se han registrado concentraciones de OD menores a 5 mg/L, existe muy baja variación en los valores medios y en los percentiles 25, 50 y 75. Para el área en general los valores medios de OD oscilaron entre $6,93 \pm 1,38$ mg/L y $7,54 \pm 1,70$ mg/L, el Pc25 tuvo valores entre 5,75 y 6,30 mg/L, la mediana entre 7,03 y 7,80 mg/L y el Pc75 entre 7,90 y 8,65 mg/L. Valores de OD determinados muestran un comportamiento homogéneo a lo largo de la zona costera del Río de la Plata entre Colonia y San José.



Fuente: elaborado en base a DINAMA. m mínimo; M máximo; Pc percentil

Figura 4-6: Estadísticos descriptivos de OD (mg/L).

Para el caso del parámetro de pH, como se describe en su apartado correspondiente (ver Anexo 11.2.2.4), los valores registrados de este parámetro cumplieron mayoritariamente con su estándar normativo para aguas Clase 1 de 6,5 a 8,5. Los valores medios estuvieron comprendidos entre $7,28 \pm 0,63$ en 08FO y $7,56 \pm 0,40$ en 03ON, la varianza del conjunto de datos estuvo entre 0,04 y 0,49. Los resultados de este parámetro muestran para el período de medición entre 2015 y marzo 2021 un comportamiento homogéneo, con escasa variación espacial a lo largo de la costa platense de Colonia y San José.

Camiolo et al. (2018) analizó la concentración de material particulado en suspensión en aguas del Río de la Plata en el período 2002-2014 a través de imágenes satelitales Aqua-MODIS de 1 km de resolución espacial.

Las mayores concentraciones de material particulado ocurrieron en otoño ($59,20 \pm 22,01$ mg/L) y verano ($47,62 \pm 15,43$ mg/L), mientras que la situación inversa se observó en invierno y primavera ($40,02 \pm 9,82$ mg/L y $39,45 \pm 6,17$ mg/L, respectivamente). El valor máximo de concentración de material particulado fue en otoño (125,80 mg/L) y el mínimo en primavera (27,52 mg/L) (Tabla 4-1).

La distribución del material particulado en suspensión reflejó un marcado patrón espacial, donde durante otoño e invierno ocurrió la máxima expansión a lo largo del eje principal del Río de la Plata, como así también a lo largo de la costa uruguaya. Las concentraciones superaron 1000 mg/L en Punta Piedras (Argentina) y estuvo cerca de los 90 mg/L sobre la costa de Montevideo. Durante la temporada de verano, se observó un retroceso a lo largo de la costa uruguaya.

escala	n	media	desvio	mínimo	Q1	mediana	Q3	máximo	
MENSUAL	enero	12	36.24	4.79	31.43	32.94	35.91	36.76	47.79
	febrero	12	46.26	9.96	32.54	41.37	44.23	49.89	70.96
	marzo	12	60.36	17.78	30.81	45.66	61.37	73.33	90.57
	abril	12	67.97	25.49	35.25	52.16	64.05	74.87	125.80
	mayo	12	62.21	21.38	31.18	47.85	56.32	72.18	104.20
	junio	12	47.44	13.82	32.23	35.60	42.09	59.91	68.30
	julio	13	41.34	11.82	29.77	33.15	37.75	43.82	72.81
	agosto	13	39.33	10.96	29.76	33.02	33.77	40.93	62.64
	septiembre	13	39.42	6.55	29.88	35.16	39.21	42.96	54.34
	octubre	13	38.02	8.35	27.52	33.10	36.03	41.09	59.43
	noviembre	13	41.65	5.16	34.27	38.94	40.67	43.00	53.33
	diciembre	13	38.37	3.96	30.61	37.25	38.95	39.04	45.42
ESTACIONAL	invierno	39	40.03	9.82	29.76	33.09	37.75	43.42	72.81
	otoño	36	59.21	22.01	31.18	42.23	56.32	68.25	125.8
	primavera	39	39.35	6.17	27.52	36.29	38.95	41.64	59.43
ANUAL	verano	36	47.62	15.44	30.81	35.92	42.67	54.03	90.57
	2003	12	40.05	7.83	30.29	33.56	39.49	45.77	52
	2004	12	49.18	13.52	33.77	39.95	43.15	56.58	74.41
	2005	12	43.23	9.34	33.19	38.54	41.31	43.23	67.69
	2006	12	52.74	15.10	34.49	38.07	52.57	63.66	76.85
	2007	12	38.03	6.23	29.88	32.72	39.19	42.27	47.79
	2008	12	51.25	17.15	31.59	36.48	47.88	63.35	78.92
	2009	12	65.56	27.31	36.25	43.24	64.62	72.35	125.8
	2010	12	36.28	4.27	30.81	32.45	36.8	39.67	42.29
	2011	12	43.29	7.86	34.27	36.23	40.79	49.41	55.65
	2012	12	59.00	24.46	33.6	42.06	48.43	73.87	102.2
	2013	12	39.92	11.11	27.52	32.06	36.25	43.18	60.63
2014	12	40.95	11.32	30.61	32.96	36.12	43.67	63.5	

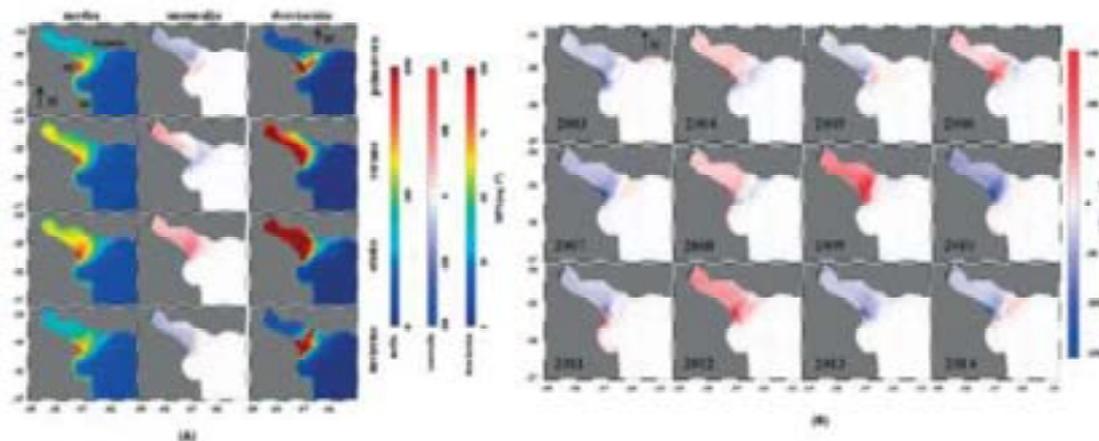
Fuente: Camiolo et al. (2018).

Tabla 4-1: Valores estadísticos de la concentración del material particulado en suspensión (mg/L).

En primavera, la distribución espacial del material particulado muestra un comportamiento intermedio entre el invierno y el verano, con una reducción a lo largo de la costa uruguaya y un aumento sobre la costa Argentina.

La distribución espacial de las anomalías permite identificar tres regiones a lo largo del Río de la Plata, una región interior, central y exterior, con diferencias temporales en el comportamiento del material en suspensión. Las regiones interior y exterior, fueron identificadas respectivamente aguas arriba y aguas abajo de la Barra del Indio, mientras que la región central se localiza sobre la Barra del Indio y el agua costera muy poco profunda localizada a lo largo de la costa de Argentina y Uruguay.

La desviación estándar del MPS, puso de manifiesto la ubicación con mayor variabilidad dentro de cada estación, la cual coincidió con el área de mayor concentración del parámetro (ver: Figura 4-7). En la región interior, la mayor cobertura espacial ocurrió durante el otoño, y las mayores desviaciones fueron registradas para esta estación, seguida por el verano. Por su parte, en la región central las mayores desviaciones, fueron registradas para el invierno y la primavera, con una mayor cobertura espacial en el transcurso del invierno.



Fuente: Camiolo et al. (2018). (A) media, anomalía y desviación para de arriba abajo, primavera, verano, otoño e invierno. (B) Distribución espacial de anomalías de material en suspensión 2003-2014.

Figura 4-7: Variabilidad espacial y temporal del material particulado en suspensión (mg/L).

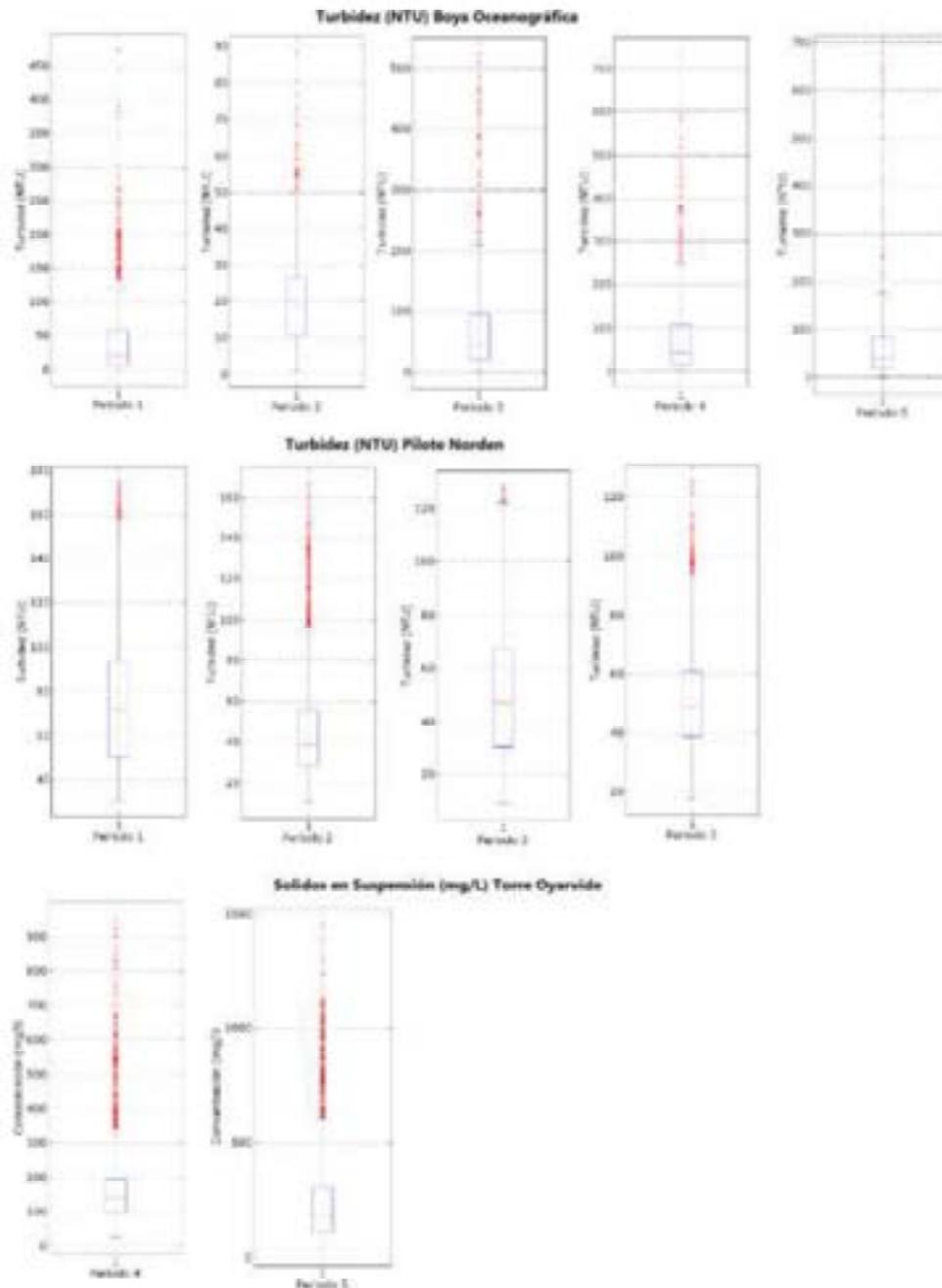
La turbidez, un parámetro estrechamente relacionado a la carga de sólidos en suspensión, fue analizada por Fossati (2013) en mediciones continuas realizadas en el marco del Proyecto Freplata. En su análisis consideró los datos de las boyas oceanográficas y estaciones fijas Pilote Norden y Torre Oyarvide, así como registros in situ de campañas oceanográficas. La ubicación de estas estaciones de monitoreo se presentan en la Figura 11-13. Los datos corresponden al período 2009-2010.

La serie de turbidez registrada en la Boya durante el Período 1 muestra el 50% de los valores menores a 20 NTU y el 17% de los valores entre 20 y 40 NTU, con un valor medio de turbidez igual a 42 NTU y el valor máximo 472 NTU. En el período 2 el 52% aproximadamente de los datos son menores a 20 NTU y el 96% de los valores son menores a 40 NTU, la media fue 20 NTU y el valor máximo 88 NTU. En el período 3 el 55% del tiempo la turbidez es menor a 50 NTU, y que aproximadamente el 24% del tiempo se supera el valor de 100 NTU, la media fue 84 NTU y el valor máximo igual a 524 NTU. En período 4 el 56% del tiempo la turbidez es menor a 50 NTU, y que aproximadamente el 26% del tiempo se supera el valor de 100 NTU, el valor medio fue a 96 NTU y el máximo 735 NTU. En el período 5 la media fue igual a 88 NTU y el valor máximo igual a 680 NTU.

En Pilote Norden en el Período 1 el 100% de los valores superan el umbral de 40 NTU, mientras que su media fue igual a 75 NTU y el valor máximo 174 NTU. En el período 2, el 99% de los datos excede el valor de 20 NTU y el 63% es menor a 50 NTU. La media de turbidez fue igual a 45 NTU y el valor máximo 167 NTU. En el Período 3 el 93% de los valores excede los 20 NTU, y la media fue igual a 51 NTU y el valor máximo 128 NTU. En el Período 5, 99% de los datos superan el valor de 20 NTU y el 52% no supera los 50 NTU. El valor medio de la serie de valores de turbidez es igual a 50 NTU y el valor máximo 128 NTU.

En Torre Oyarvide, se determinó la concentración de sedimento en suspensión a partir de la relación lineal obtenida entre los datos de turbidez y concentración de sedimento. En el Período 3, la mayor cantidad de datos corresponden a concentraciones entre 60 y

80 mg/L, donde el 100% de los datos excede los 30 mg/L, el máximo corresponde a 271 mg/L y el valor medio a 77 mg/L. En el Período 4 se observó un máximo de 536 mg/l y el valor medio a 102 mg/L. En el Período 5, en tanto, el 100% de los datos superó 60 m/L, el máximo de este período corresponde a 812 mg/L y el valor medio a 151 mg/L.

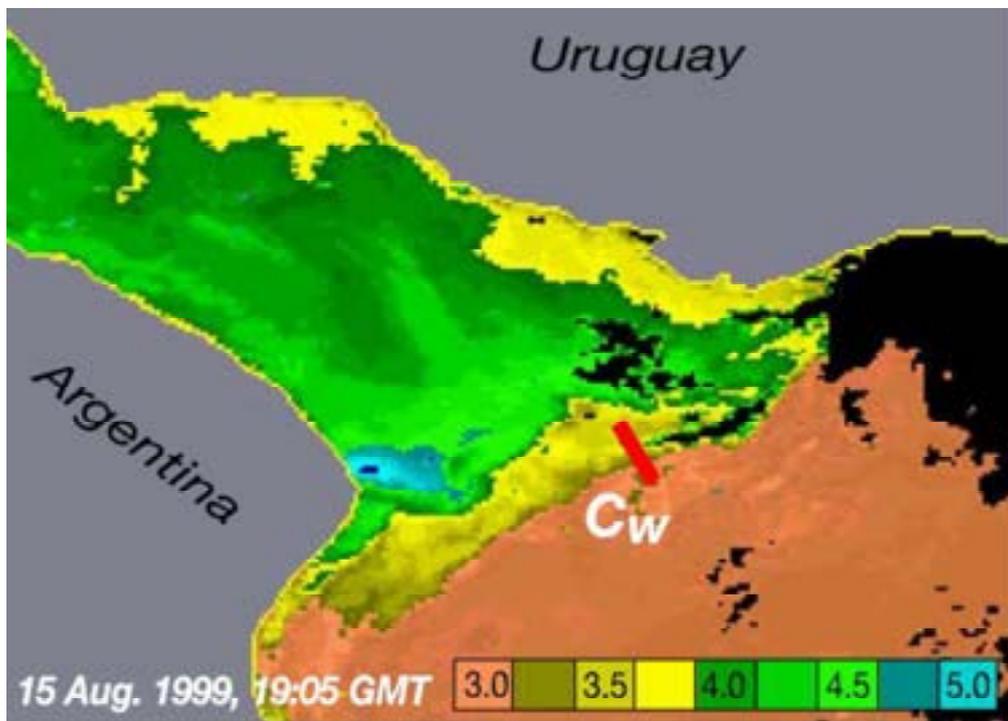


Fuente: Fossati (2013)

Figura 4-8: Medición continua de turbidez (NTU) y solidos suspendidos (mg/L) en el Río de la Plata.

El comportamiento descrito por Fossati (2013) y Camiolo et al. (2018), es el esperado para el Río de la Plata, que dan cuenta de la amplia variabilidad espacial y temporal de la turbidez y la concentración de sedimentos en suspensión en sus aguas. En función de

estos parámetros se define el frente de turbidez como una zona de transición entre la salida de agua dulce, rica en sedimentos en suspensión, y el agua salobre, constituyendo el límite dinámico entre el estuario superior e inferior.



Fuente: Framiñan et al. (2008)

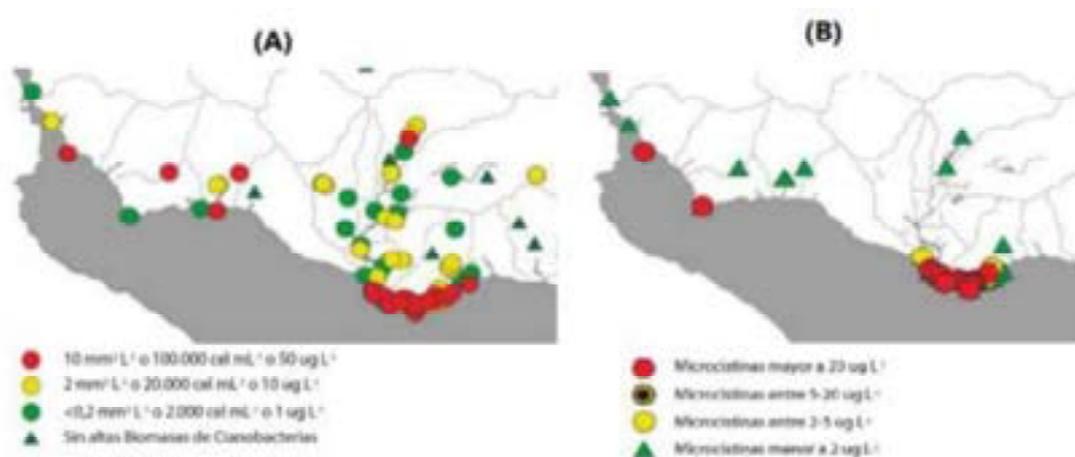
Figura 4-9: Imagen satelital con el Frente de Máxima Turbidez.

Una de las principales preocupaciones en los cuerpos de agua como el Río de la Plata, es la ocurrencia de floraciones de miembros del fitoplancton. En agua dulce estas floraciones o blooms, están representadas casi exclusivamente por cianobacterias. Las floraciones disminuyen la calidad del agua y la biodiversidad, y la situación es más adversa aun cuando producen toxinas. Se ha postulado que el aumento de actividades agropecuarias con uso intensivo de fertilizantes y el vertido de desechos no procesados al agua son una de las principales causas del aumento de la frecuencia e intensidad de las floraciones.

El mapa de categorización de los cuerpos de agua del país realizado por Bonilla et al. (2015) permitió identificar zonas de mayor peligrosidad de exposición a las cianobacterias. En particular las zonas embalsadas de los grandes ríos como el Río Uruguay y el Río Negro y las costas del Río de la Plata fueron los ecosistemas con mayores registros de riesgo de exposición alto, con acumulación de espuma de cianobacterias. Los autores también destacan que los indicadores de alto riesgo de exposición a cianobacterias ocurren tanto en verano como en otras épocas del año, lo cual sugiere que la temperatura ya no es necesariamente una variable que limite el crecimiento y la acumulación de estos organismos.

La temperatura que es una variable clave para explicar el crecimiento del fitoplancton en general, por efectos del cambio climático puede actuar en sinergia con el aumento

de los nutrientes, acelerando la eutrofización y promoviendo la aparición de floraciones de cianobacterias.

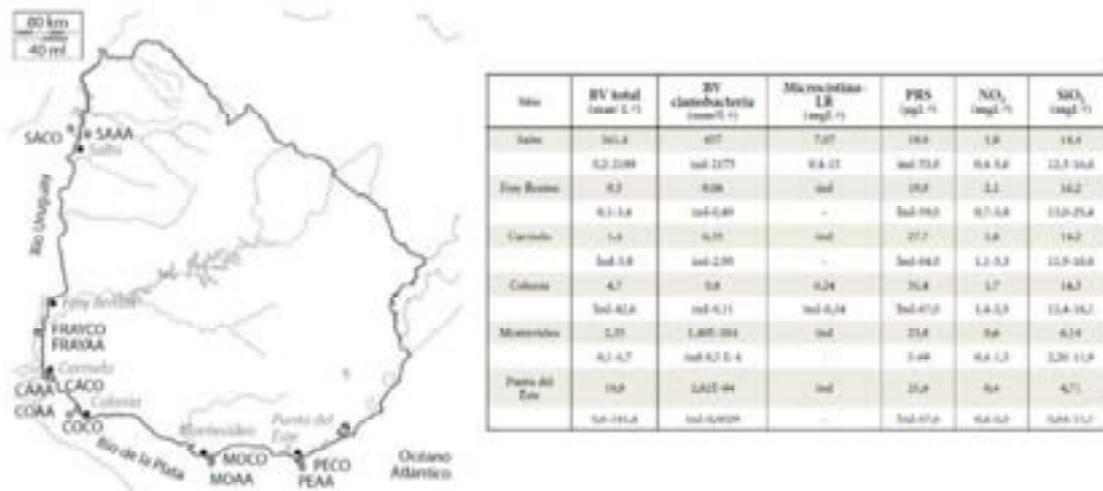


Fuente: Bonilla et al (2015)

Figura 4-10: Registros históricos de floraciones entre Colonia y San José.

Kruk et al. (2015) como parte del diseño de un sistema de alerta temprana de floraciones, realizaron un relevamiento a lo largo de la costa atlántica, platense y del Río Uruguay, en el cual se estudiaron las características ambientales de los cuerpos de agua, así como la presencia de floraciones y de concentración de toxinas de cianobacterias.

Entre los resultados se destaca la observación de la ocurrencia de floraciones en el Río Uruguay, en Salto, tanto en verano como invierno, incluyendo enero, marzo y junio de 2013, así como en marzo de 2014. Además de Salto, solo se observó un evento de floración en Colonia en marzo de 2013. La presencia de colonias formadoras de floraciones ocurrió en todo el gradiente espacial, excepto en Punta del Este, y correspondieron en su gran mayoría a organismos de gran tamaño del complejo *Microcystis aeruginosa*.



Fuente: Kruk et al (2015). Valores medios y rangos de variables biológicas y nutrientes disueltos en cada sitio de muestreo. BV=biovolumen, PSR= fósforo reactivo soluble, NO₃= nitrato, SiO₂= sílice, Ind= indetectable

Figura 4-11: Área de estudio y resultados del monitoreo de floraciones de Kruk et al. (2015).

Los eventos mencionados de floración por Kruk et al. (2015) resultan de importancia ya que corroboran tanto la extensión actual de los eventos de blooms de cianobacterias, más allá de sus tradicionales fronteras geográficas y temporales, así como por considerar a la cuenca alta el Río de la Plata, ríos Paraná y Uruguay, como las principales fuentes de propágulos. Las floraciones observadas ocurrieron con temperaturas de 14 °C, en el mes de junio, estudios previos indican que estos organismos tienen óptimos de temperatura para el crecimiento cercano a los 25 °C.

Para los nutrientes analizados no se observaron patrones claros, salvo los aumentos asociados a Salto y Montevideo, posiblemente vinculados a la contaminación urbana, los sitios analizados pueden clasificarse entre meso e hipereutróficos, de acuerdo a la concentración de fósforo, las cuales según el decreto 253/79, fueron superiores a su límite para aguas de potabilización, pero aceptable para su uso por recreación por contacto directo. Esto es de importancia ya que indicaría que no hay problemas para los usos recreativos de los cuerpos de agua, pero sí podría haber problemas para toma de agua potable, ya sea en tomas existentes, o para el futuro establecimiento de nuevas.

4.4 Características fisicoquímicas actuales del Río de la Plata en la costa de San José

4.4.1 Introducción

Como parte de los estudios ambientales para optar por el Río de la Plata como una fuente alternativa de agua bruta para potabilización, se definió la ejecución de una línea de base, generación de datos de calidad y fisicoquímicos del agua del Río de la Plata antes del inicio de construcción y operación de la infraestructura necesaria para la captación de agua desde el Río de la Plata.

La línea de base permite conocer el estatus ambiental del Río de la Plata como fuente de agua para potabilización y conocer datos actuales de sus características fisicoquímicas.

La generación de una base de datos de parámetros de calidad y fisicoquímicos del agua del Río de la Plata está basada en estrategias de monitoreo puntual y continuo. El monitoreo puntual consta de la colecta de muestras de agua para la determinación de distintas variables a través de análisis de laboratorio, y el monitoreo continuo comprende mediciones de variables a través de una sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD por su sigla en inglés) instalada *in situ* y que colecta de forma continua información a una frecuencia pre-establecida.

4.4.2 Estación de monitoreo puntual y del CTD

El muestreo puntual de calidad se realiza en el punto PM01, localización probable del lugar donde se ubicará la toma de agua, ubicado aguas adentro del Río de la Plata frente al balneario Arazatí en el departamento de San José a poco más de 1.500 m de la costa, en las coordenadas $-34.572172^{\circ}/-57.010803^{\circ}$. La sonda CTD, en tanto, se halla en las coordenadas $-34.586292^{\circ}/-56.988758^{\circ}$, también localizada a poco más de 1.500 m de la costa frente a balneario Arazatí.



Figura 4-12: Estación del muestreo del monitoreo puntual y ubicación del CTD.

4.4.3 Parámetros de calidad y fisicoquímicos

4.4.3.1 *Monitoreo Puntual*

Se definieron una serie de parámetros químicos, físicos, orgánicos y biológicos, considerados relevantes en la determinación de la calidad actual del Río de la Plata, y que, además, pueden influir en los procesos de potabilización.

En el punto de muestreo PM01 algunos de los parámetros son determinados a través de mediciones *in situ*, mientras que otros fueron analizados en laboratorio, la tabla siguiente muestra los parámetros seleccionados a determinarse, la determinación (*in situ* o laboratorio), y la profundidad de toma de muestra.

Tabla 4-2: Parámetros fisicoquímicos de calidad de agua determinados en el PM01.

Parámetro	Unidades	Determinación	Profundidad de colecta de muestras
Profundidad (Z)	m	In situ	Hasta el fondo
Temperatura (T)	°C	In situ	Perfil cada 1 m
Transparencia	cm	In situ	Superficial
Conductividad	µS/cm	In situ	Perfil cada 1 m
Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	In situ	Perfil cada 1 m
	%	In situ	Perfil cada 1 m
pH	--	In situ	Perfil cada 1 m
Salinidad	Ups	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Cloruros	mgCl/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Color	Esc. Pt-Co	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Turbidez	NTU	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Alcalinidad total	mgCaCo3/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Nitrógeno total Kjeldahl	mgN/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Fosforo total	mgP/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Fosfato	mgPO4/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Sólidos suspendidos fijo	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Sólidos disueltos volátiles	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Sólidos disueltos fijos	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Carbono orgánico total	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Clorofila a	µg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Ficocianina	µg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Microcistina	µg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Cianobacterias		Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Hierro	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Manganeso	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Zinc	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Plomo	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Arsénico	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Cadmio	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Cromo	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Selenio	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua

Parámetro	Unidades	Determinación	Profundidad de colecta de muestras
Cobre	mg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Sodio	mgNa/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Amonio	mgNH ₄ /L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua
Atrazina	µg/L	Laboratorio	Mitad de la columna de agua

Para los parámetros a determinarse *in situ* se definió la realización de un perfil en la columna de agua cada 1 m, mientras que en los parámetros que son determinados en laboratorio la muestra para análisis se colecta a la mitad de la profundidad total, en el entendido que la zona es relativamente somera, y se halla en una región del Río de la Plata predominantemente fluvial, por lo que es baja la probabilidad de una estratificación debido al ingreso de aguas desde el Océano Atlántico desde el Este.

Las determinaciones *in situ* fueron realizadas con un equipo multiparámetro AQUAREAD Modelo Aquameter AM200/Aquaprobe AP-2000, mientras que las muestras de agua se colectaron con una botella muestreadora tipo Niskin, la transparencia se definió con un disco de Secchi.

En capítulo Anexo 11.4, son presentados los resultados correspondientes.

4.4.3.2 Monitoreo Continuo

El monitoreo continuo está a cargo del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), quien es propietaria de la sonda CTD, y realiza las acciones de mantenimiento, levantamiento y análisis de los datos generados por el equipo.

El CTD de medición continua es una sonda modelo SBE 19plus V2, de la empresa Sea-Bird Electronics, a los sensores de conductividad, temperatura y profundidad se incorporó un sensor combinado para registrar turbidez, fluorescencia de clorofila a y fluorescencia de ficocianina, modelo ECO Triplet-w, fabricado por WET Labs y un fluorómetro para registrar materia orgánica coloreada disuelta (CDOM, por su sigla en inglés), modelo ECO-FLCDS, fabricado también por WET Labs.

La ubicación de los sensores se instaló a una profundidad de 0,5 m sobre el lecho del río, mientras que la frecuencia de captura de datos fue programada para que la sonda registre un dato de cada uno de los parámetros cada 15 minutos. Para verificación y calibración de las mediciones de la sonda CTD, muestras de agua son recolectadas a 1 m del fondo por triplicado para la determinación de la concentración de los parámetros de sólidos suspendidos totales, sólidos suspendidos fijos, clorofila a, y color.

En capítulo Anexo 11.3, son presentados los informes realizados por al IMFIA de la UDELAR.

4.4.3.3 Laboratorio a cargo de los análisis

El laboratorio que realiza el análisis de las muestras del monitoreo puntual de calidad de agua, así como de las muestras para calibración y verificación de la sonda CTD de IMFIA, es el Laboratorio Ecotech. Ecotech se halla habilitado por DILAVE y por el Organismo Uruguayo de Acreditación, bajo los requisitos de la Norma ISO/IEC 17.025:2017.

Para el caso del monitoreo puntual, la colecta de muestras para análisis en laboratorio y las mediciones de variables fisicoquímicas *in situ* que se realizan en el punto PM01, es también realizada por personal técnico del laboratorio Ecotech.

4.4.3.4 Evaluación de resultados

Para el monitoreo puntual, como forma de evaluar los resultados obtenidos estos se comparan contra los estándares de calidad de agua que se establecen en la normativa vigente, decreto 253/79, según el tipo de uso previsto para el Río de la Plata. Tradicionalmente, el Río de la Plata se lo asigna a la Clase 3, aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica. Pero, dado que ahora se prevé su utilización como fuente de agua bruta, se comparan los resultados contra los estándares para la Clase 1, aguas destinadas o que puedan ser destinadas al abastecimiento de agua potable a poblaciones con tratamiento convencional. También se incluirán los estándares previstos en la modificación del decreto 253/79 del Grupo Gesta Agua (2008), de cumplimiento para todos los cuerpos de agua superficiales, aún en proceso de aprobación.

Tabla 4-3: Estándares de referencia para los parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Estándar Decreto 253/79		Estándar Gesta Agua
	Clase 1	Clase 3	
Temperatura	S/E	S/E	S/E
Conductividad	S/E	S/E	S/E
Oxígeno disuelto (mg/L)			≥ 5 mg/L
pH			6,5 ≤ pH ≤ 8,5
Salinidad	S/E	S/E	S/E
Cloruros	S/E	S/E	S/E
Color no natural	Ausente		Color verdadero: no significativamente diferente al natural del cuerpo para la estación considerada
Turbidez	≤ 50 NTU		Incremento de valores históricos en un 10% valor natural o en su defecto ≤ 50 UNT
Alcalinidad total	S/E	S/E	S/E
Nitrógeno total Kjeldahl	S/E	S/E	S/E
Fosforo total	≤ 25 µg/L		≤ 100 µg/L

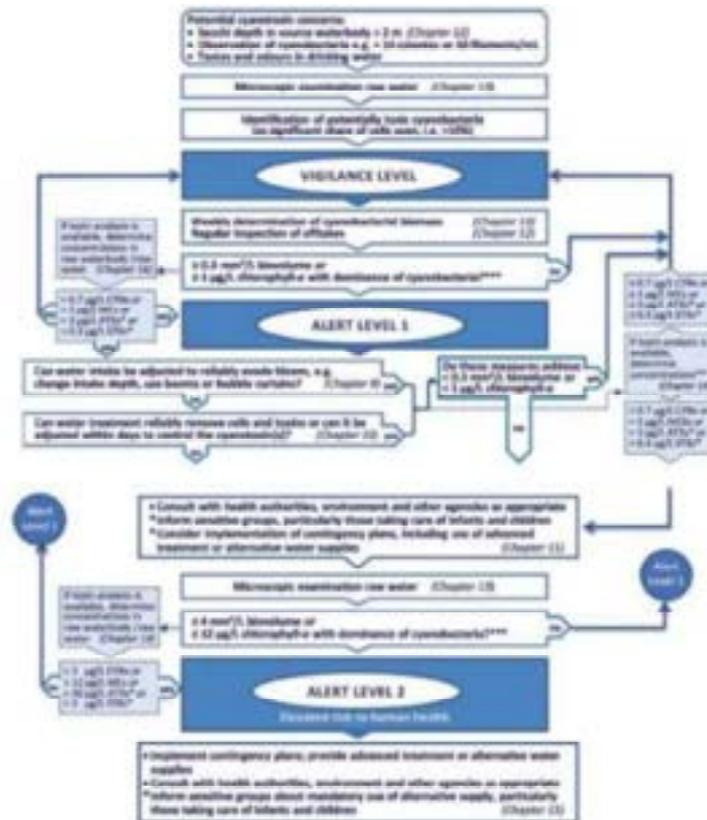
Parámetro	Estándar Decreto 253/79		Estándar Gesta Agua
	Clase 1	Clase 3	
Fosfato	S/E	S/E	S/E
Sólidos suspendidos volátiles	S/E	S/E	S/E
Sólidos suspendidos fijo	S/E	S/E	S/E
Sólidos disueltos volátiles	S/E	S/E	S/E
Sólidos disueltos fijos	S/E	S/E	S/E
Carbono orgánico total	S/E	S/E	S/E
Clorofila a ^(a)	S/E	S/E	E < 10 µg/L; MB 10 < Clo a ≤ 20 µg/L; S 20 < clo a ≤ 50 µg/L
Ficocianina	S/E	S/E	S/E
Microcistina	S/E	S/E	S/E
Cianobacterias ^(a)	S/E	S/E	E ≤ 5000 cel/mL; MB 5000 ≤ Cianobacterias ≤ 50.000 cel/mL; S 50.000 ≤ Cianobacteria ≤ 500.000 cel/mL; NA > 500.000 cel/mL
Hierro	S/E	S/E	S/E
Manganeso	S/E	S/E	S/E
Zinc			≤ 0,03 mg/L
Plomo	≤ 0,03 mg/L		≤ 0,003 mg/L
Arsénico			≤ 0,005 mg/L
Cadmio			≤ 0,001 mg/L
Cromo	≤ 0,05 mg/L		≤ 0,01 mg/L
Selenio	S/E	S/E	≤ 0,001 mg/L
Cobre	≤ 0,2 mg/L		≤ 0,01 mg/L
Sodio	S/E	S/E	S/E
Amonio	S/E	S/E	S/E
Atrazina	S/E	S/E	≤ 0,018 mg/L
Coliformes fecales	No se deberá exceder el límite de 2000 CF/100 mL en ninguna de al menos 5 muestras, debiendo la media geométrica de las		1000 ufc/100 ml, valor de media geométrica móvil de 5 muestras consecutivas

Parámetro	Estándar Decreto 253/79		Estándar Gesta Agua
	Clase 1	Clase 3	
	mismas estar por debajo de 1000 CF/100 mL		

S/E: sin estándar de referencia. (a), valores de referencia del Grupo Gesta Agua para aguas para recreación por contacto directo: E, excelente; MB, muy buena; S, satisfactoria; NA no apta

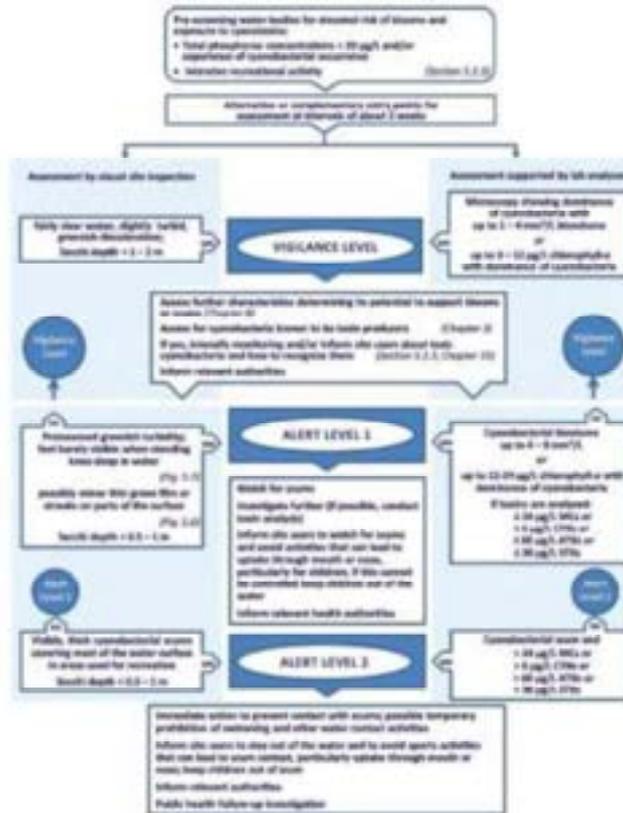
Para evaluar la concentración de las cianotoxinas analizadas en el agua de las muestras puntuales, se consideran los valores guía de Chorus & Walker (2021) para la WHO, para aguas destinadas a suministro y a aguas destinadas a la recreación por contacto directo.

Figura 4-13 Niveles de alerta para cianobacteria en agua para suministro.



Fuente: Chorus, I, Welker M; eds. 2021. Toxic Cyanobacteria in Water, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH.

Figura 4-14 Niveles de alerta para cianobacterias en agua recreacionales



Fuente: Chorus, I, Welker M; eds. 2021. Toxic Cyanobacteria in Water, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (FL), on behalf of the World Health Organization, Geneva, CH.

4.4.3.5 Resultados

4.4.3.5.1 Monitoreo puntual en PM01

Ecotech ha realizado dos relevamientos de calidad de agua y medición de variables fisicoquímicas en las aguas del Río de la Plata. El primero tuvo lugar el 08 de noviembre del año 2021, y el segundo relevamiento el día 22 de diciembre del mismo año. Los resultados de los análisis de laboratorio para los parámetros determinados se presentan en los informes del Laboratorio Ecotech que se incluyen como anexos a este documento (ver Anexo 11.4).

Las muestras para análisis puntuales colectadas por Ecotech en el punto PM01 fueron recolectadas a una profundidad de 3 m, los resultados de los parámetros analizados en las aguas del Río de la Plata para los dos relevamientos realizados, 08/11/2021 y 22/12/2021, se muestran en la tabla siguiente, para aquellos parámetros con estándar de comparación en el decreto 253/79 y la propuesta del Grupo Gesta Agua, se destacan en verde cuando cumplen con su valor de referencia, y en naranja suave cuando incumplen con alguna de las normativas usadas para la evaluación.

Tabla 4-4 Resultados fisicoquímicos y biológicos en agua en el punto PM01 a 3 m de profundidad.

Parámetro	08/11/2021	22/12/2021
Temperatura (°C)	21,1	24,2
Secchi (cm)	NC	NC
Conductividad (μS/cm)	168	127
OD (mg/L)	9,56	8,35
OD (%)	106,8	99,9
pH	8,18	7,49
Salinidad (ups)	0,1	0,1
Cloruros (mgCl/L)	17	27
Color (Esc Pr-Co)	61	28
Turbidez (NTU)	31	24
Alcalinidad Total (mgCaCO3/L)	33	31
NTK (mg/L)	<5	<2
PT (mg/L)	0,3	0,2
PO4 (mg/L)	<0,05	0,2
SSV (mg/L)	<15	7
SSF (mg/L)	<15	12
SDV (mg/L)	<60	<60
SDF (mg/L)	120	133
COT (mg/L)	<4	<4
Clorofila a (μg/L)	<3,8	11,0
Ficocianina (μg/L)	<7	<7
Microcistina (μg/L)	<0,35	<0,08
Cianobacterias (cel/L)	NC	NC
Fe (mg/L)	1,2	1,2
Mn (mg/L)	0,02	0,02
Zn (mg/L)	0,02	0,10
Pb (mg/L)	<0,005	<0,005
Ar (mg/L)	<0,005	<0,005
Cd (mg/L)	<0,001	<0,001
Cr (mg/L)	<0,01	<0,01
Se (mg/L)	<0,005	<0,005
Cu (mg/L)	<0,01	0,01

Parámetro	08/11/2021	22/12/2021
Na (mg/L)	15	22
NH4 (mg/L)	<0,02	<0,02
Atrazina (µg/L)	<0,1	<0,1
Coliformes fecales (ufc/100mL)	S/D	<100

En el punto PM01 la profundidad total de la columna en el sitio los días 08/11 y 22/12 fue 6,5 m, y la profundidad del disco de Secchi determinó una transparencia de entre 0,5 y 0,6 m en los dos relevamientos.

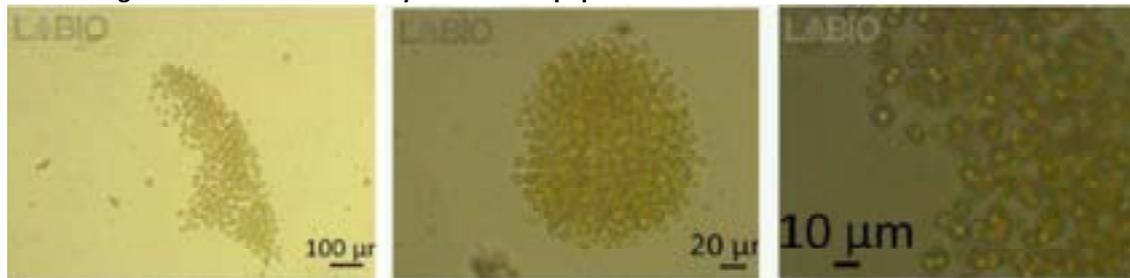
La transparencia, medida con disco de Secchi, mide la profundidad a la cual llega el 15% de la intensidad de la luz, a partir de ella se puede determinar hasta donde alcanza la zona eufótica, definida como la capa de agua hasta una profundidad donde se registra el 1% de la intensidad de la luz en superficie. La importancia de esta profundidad es que equivale aproximadamente al Punto de Compensación, donde la producción primaria se iguala con la respiración. Dicha profundidad es $Z_{eu} (m) = 2,4 ZDS$. Para ambos relevamientos la zona eufótica alcanzó hasta 1,2 m.

Para aquellos parámetros con un estándar de referencia en la normativa nacional, el fósforo total presentó en los monitoreos de noviembre y diciembre resultados no aceptables, al ser superiores su estándar en el decreto 253/79 vigente de $\leq 0,025$ mg/L. Para el metal pesado zinc, la concentración determinada en el punto PM01 en el mes de diciembre de 2021 tuvo un resultado que incumple con su valor de referencia, mientras que, para el selenio, los resultados de noviembre y diciembre son considerados no aceptables ya que el límite de cuantificación del laboratorio Ecotech es mayor que su estándar de referencia propuesto en la modificación del decreto 253/79 por Gesta Agua, adoptándose un criterio conservador.

En la muestra de agua del mes de noviembre de 2021 colectada para el análisis de la presencia de cianobacterias, el laboratorio a cargo del análisis no identificó la presencia de componentes de este grupo.

Durante el mes de diciembre del 2021, en la muestra de agua colectada en PM01, se identificó la presencia de la cianobacteria *Aphanothece* sp., del Orden Chroococcales, la importancia de la presencia del género radica en su potencial riesgo toxicológico ya que son capaces de generar de microcistinas y lipopolisacáridos. Otros miembros presentes de la comunidad fitoplanctónica fueron *Melosira* sp., diatomea céntrica cf. *Coscinodiscus*, *Stausosira* sp., y *Cocconeis* sp (Orden Bacillariophytas); *Closterium* sp. (Orden Chlorophytas), y un dinoflagelado peridinal no identificado (Orden Dinophytas).

Figura 4-15 Cianobacteria *Aphanothece* sp. presente en PM01 en diciembre de 2021.



Los resultados obtenidos de la concentración de clorofila a, muestran en el mes de noviembre con un resultado de $<3,8 \mu\text{g/L}$ aguas de calidad excelente para el valor límite de referencia de la propuesta del Grupo Gesta Agua de modificación del decreto 253/79, mientras que la concentración de $11,0 \mu\text{g/L}$ del mes de diciembre indica aguas de calidad muy buena para balneabilidad. Las concentraciones de microcistina determinadas en noviembre y diciembre en PM01 se hallan por debajo de los niveles de alerta de las aguas destinadas para suministro y recreación.

Para aquellos parámetros con estándar, las mediciones *in situ* de las concentraciones de oxígeno disuelto y pH muestran que los resultados del perfil fueron aceptables para cualquiera de los estándares considerados. Los perfiles verticales de los parámetros determinados *in situ* se muestran en la Figura siguiente. La temperatura registrada muestra el patrón estacional esperado, donde tiende a incrementarse a medida que avanza la temporada estival, como se muestra en el perfil de la temperatura en diciembre los registros en la columna de agua más elevados en diciembre.

No se observa estratificación en el punto PM01 para los parámetros de oxígeno disuelto (en concentración y porcentaje de saturación), pH, y temperatura. Para el parámetro de la conductividad se puede observar tanto en noviembre como en el monitoreo de diciembre de 2021 una tendencia a disminuir a medida que se incrementa la profundidad. En el monitoreo de noviembre de 2021 entre superficie y fondo se apreció una diferencia de $18 \mu\text{S/cm}$, mientras que en el muestreo de diciembre la diferencia fue de $34 \mu\text{S/cm}$, los resultados de conductividad son indicadores de aguas de origen fluvial, por lo que las diferencias observadas no son indicadoras de estratificación.

Figura 4-16 Perfiles verticales de OD, pH, temperatura y conductividad en el punto PM01



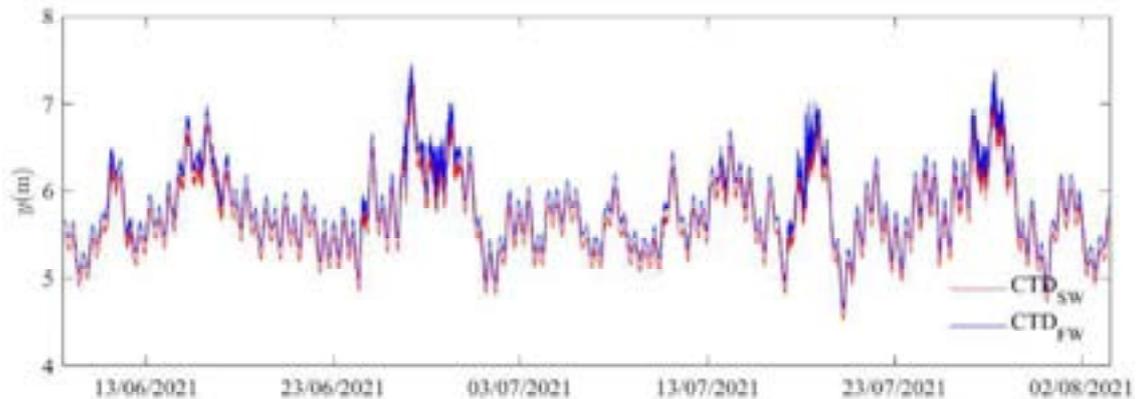
Las líneas rojas son los estándares de referencia del decreto 253/79

4.4.3.5.2 Monitoreo continuo

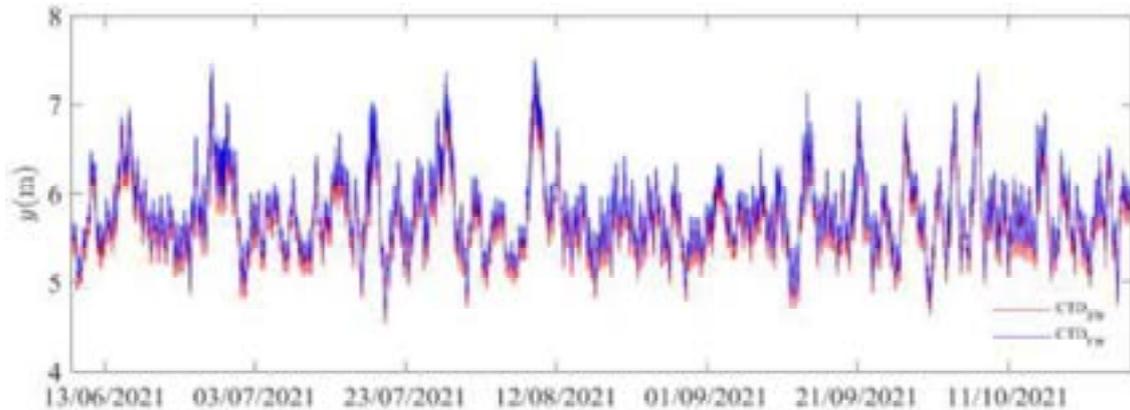
A la fecha, IMFIA ha emitido tres informes (19/8/2021, 18/11/2021 y 16/12/2021) de evaluación de la medición continua de los parámetros de: profundidad, temperatura, salinidad, turbidez, materia orgánica disuelta coloreada, fluorescencia de clorofila a y de ficocianina. Cada nuevo informe es acumulativo de los resultados obtenidos con la sonda CTD de medición continua, es decir, que se sigue con la línea temporal de datos generados, y estos se presentan en forma de gráfico. Los informes se presentan en Anexo 11.3.

El tirante de agua (considerando agua dulce y sin corrección por variaciones de presión atmosférica) varió entre 4,65 y 7,52 m, y su promedio fue 5,81 m. Siendo la cota del lecho del río en el punto de fondeo -4,51 m referida al 0 Wharton.

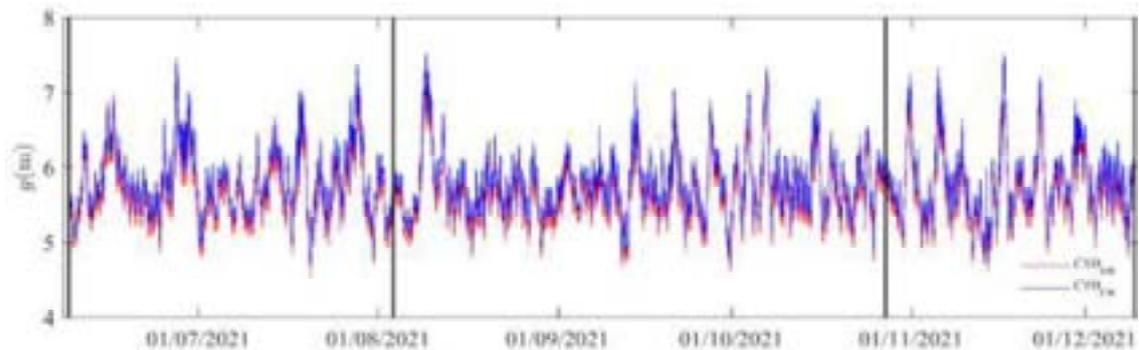
Figura 4-17 Serie de datos de profundidad (m)
Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-October 2021



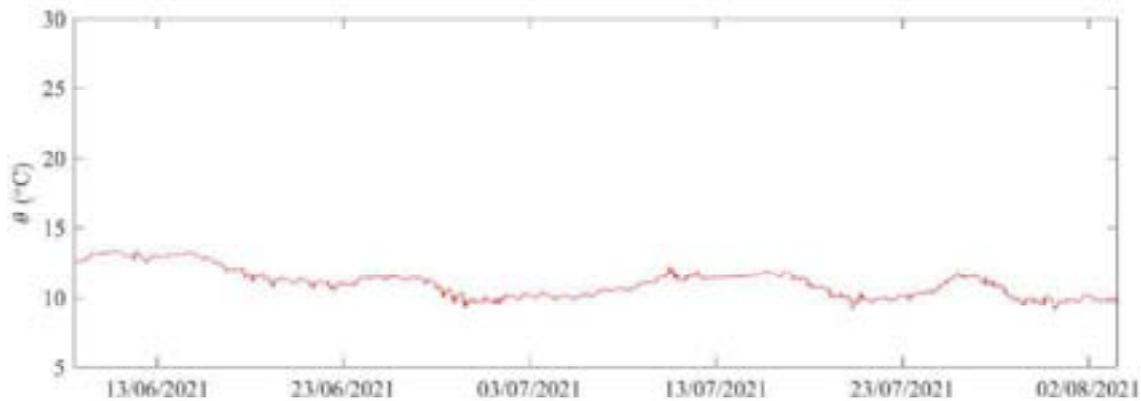
Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021



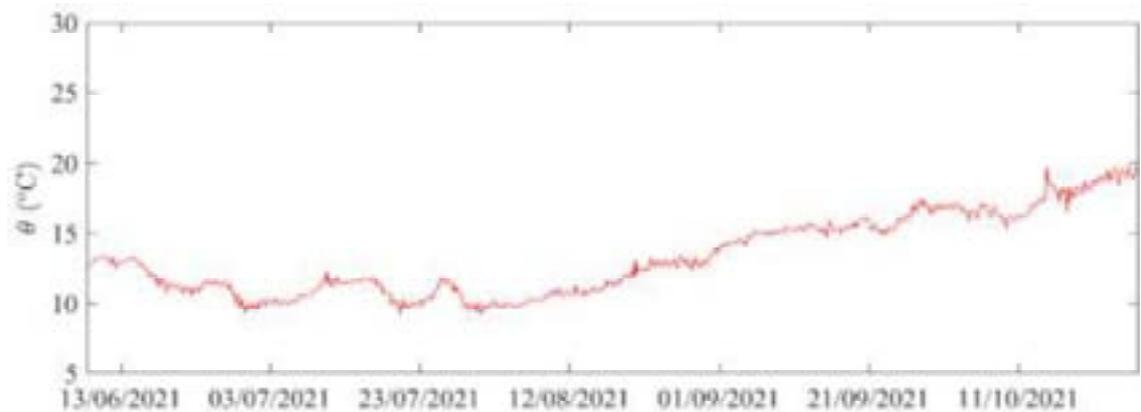
Profundidad según agua dulce CTD_{FW} o salada CTD_{SW}, sin corregir por variaciones de la presión atmosférica. Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

La temperatura del agua varió entre el mínimo de 9,16 °C y máxima de 23,25 °C, siguiendo el patrón estacional esperado, temperaturas más bajas en invierno y otoño, y más cálidas en primavera y crecientes a medida que se avanza en el período estival.

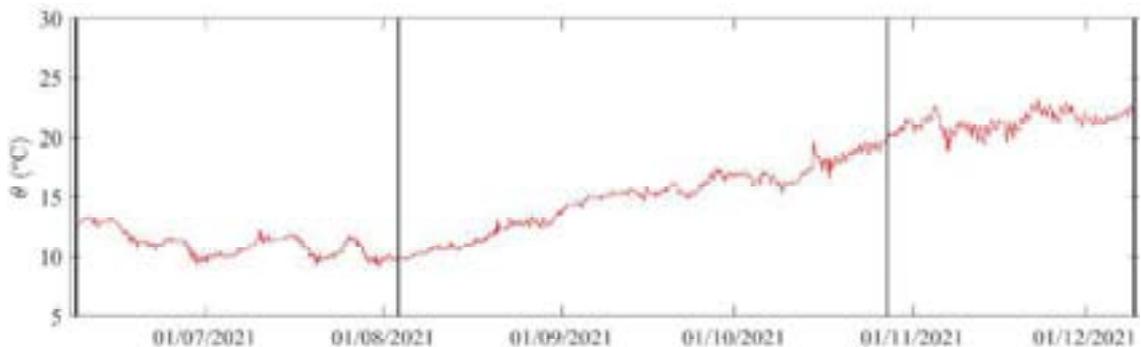
Figura 4-18 Serie de datos de temperatura (°C)
 Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-Octubre 2021



Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021



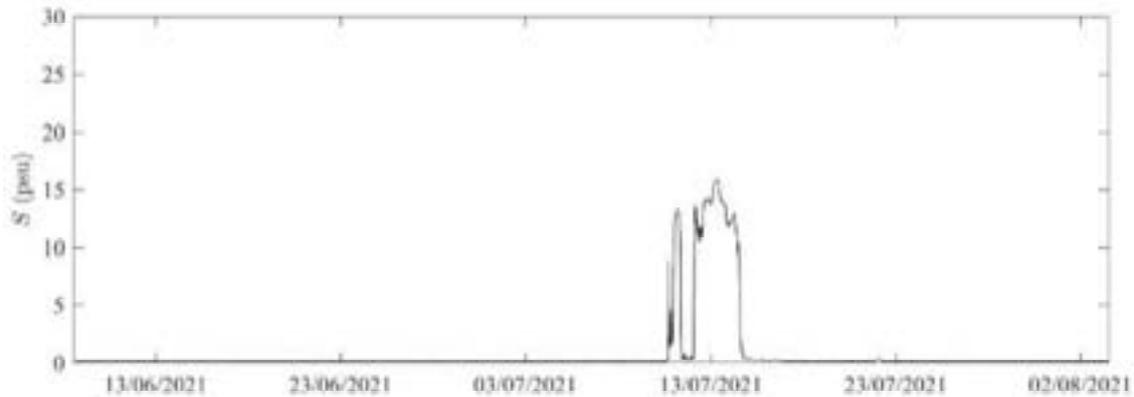
Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

La salinidad del agua medida en profundidad a 0,5 m sobre el lecho del río osciló entre 0,05 y 15,86 psu. Como se observa en la Figura siguiente, la mayor parte de los registros indicaron la presencia de aguas continentales de origen fluvial, con valores predominantemente < 1 psu, a mediados de junio y en los primeros días de agosto se registraron valores de salinidad que indican la presencia de aguas salobres, valores mayores a 10 psu. Aunque el límite de intrusión salina suele estar más hacia el Este del sitio de medición de la sonda CTD, en las cercanías de la desembocadura del río Santa Lucía, en condiciones de sequía, como las que el país registro durante gran parte del año 2021, es posible registrar valores de salinidad más elevados, principalmente en

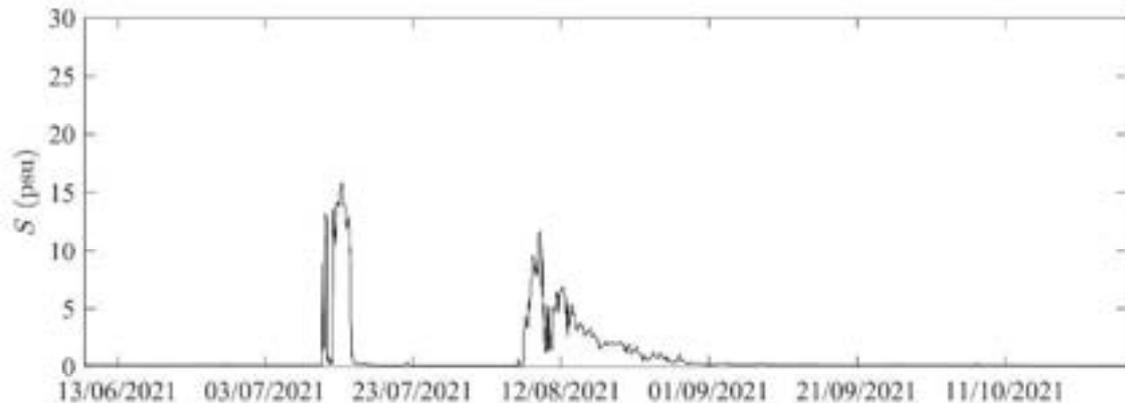
profundidad, cuando las masas de agua más saladas se desplazan en forma de cuña por debajo de las aguas de origen fluvial.

Figura 4-19 Serie de datos de salinidad (psu)

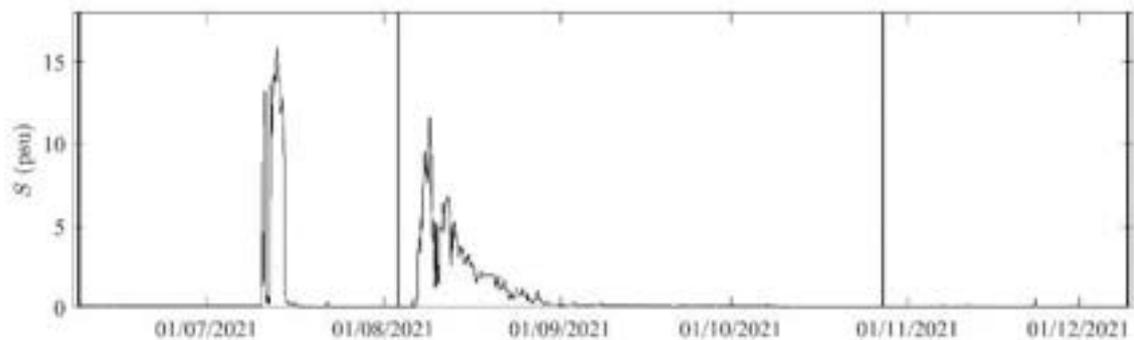
Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-October 2021



Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021



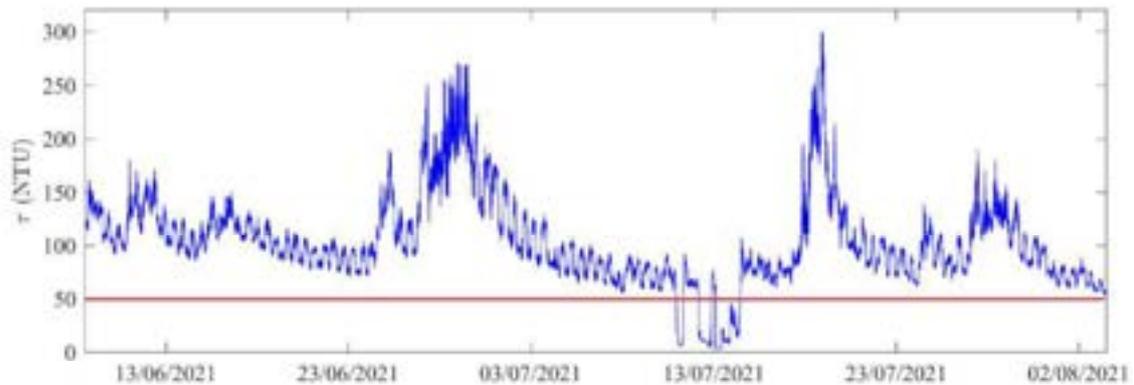
Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

La turbidez a 0.5 m sobre el lecho del río varió aproximadamente entre: 2 y 300 NTU, principalmente en períodos de frío, otoño e invierno, hasta agosto de 2021 la mayor proporción de resultados de turbidez que superaron 50 NTU (estándar del decreto 253/79) fueron registrados. En los períodos cálidos siguientes se aprecian valores muy oscilantes del parámetro, intercalándose valores superiores e inferiores a 50 NTU de manera consistente. Este comportamiento puede deberse a que en estos períodos

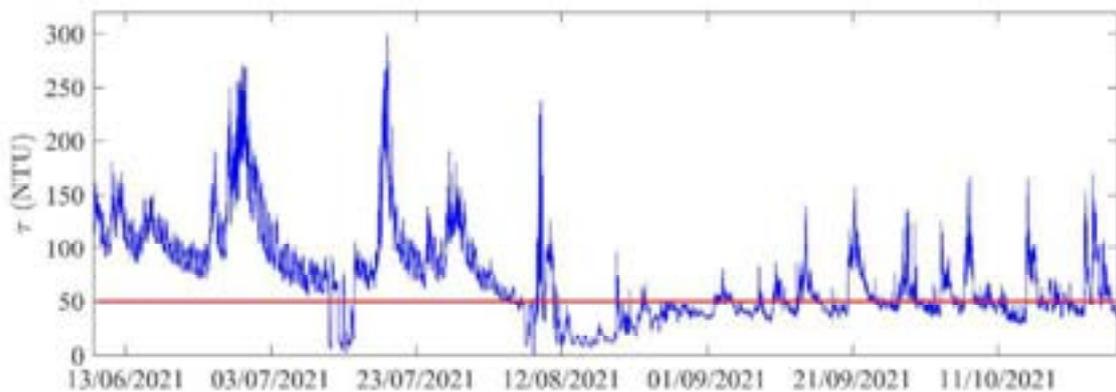
suelen registrarse una disminución en los vientos, con predominio de direcciones de componente Norte, que no permitiría la re-suspensión de sedimentos desde el lecho,

Figura 4-20 Serie de datos de turbidez (NTU)

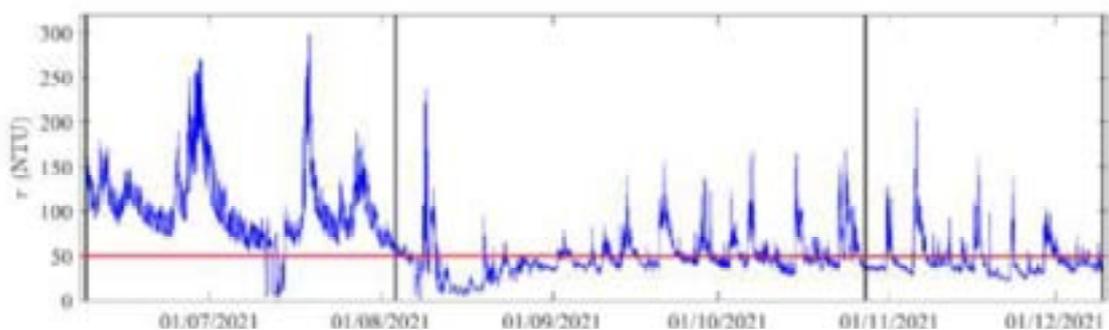
Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-October 2021



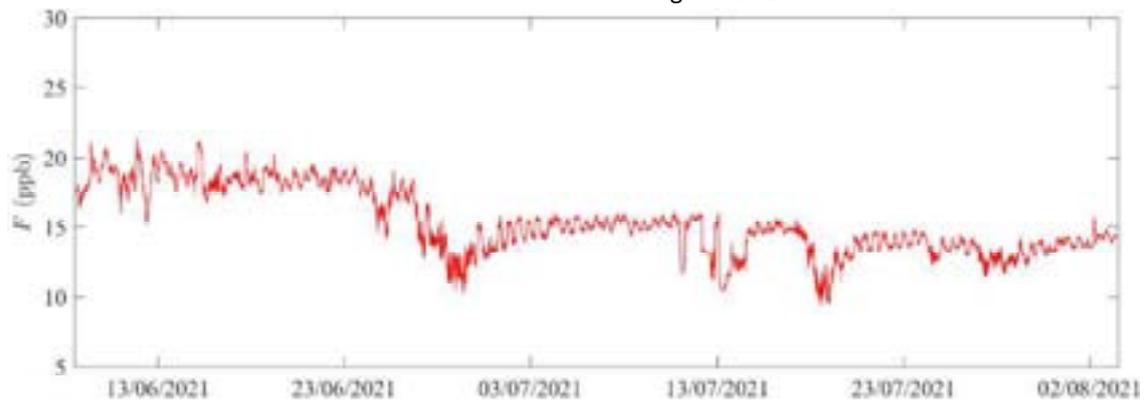
Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021



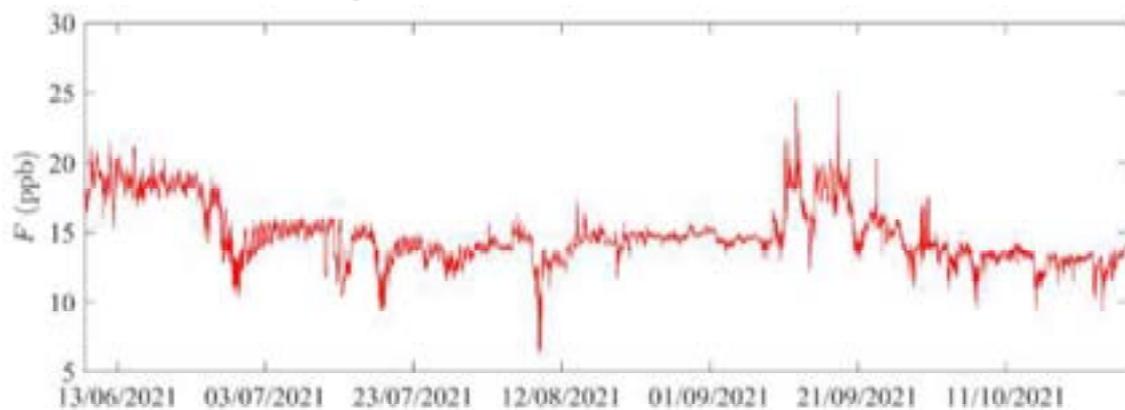
Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento. En rojo el estándar de 50 NTU del decreto 253/79

La fluorescencia asociada a materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) a 0,5 m sobre el lecho del río varió aproximadamente entre: 6 ppb y 25 ppb (partes por billón de equivalente de Quinina deshidratada).

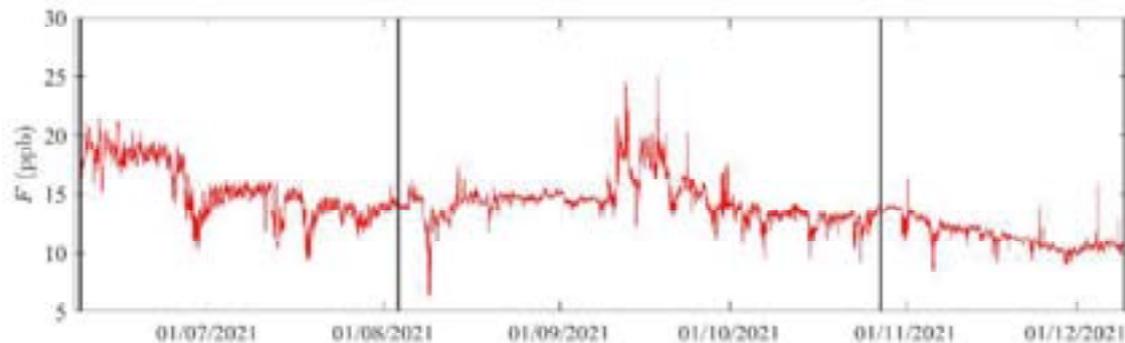
Figura 4-21 Serie de datos de CDM (ppb)
Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-Octubre 2021



Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021

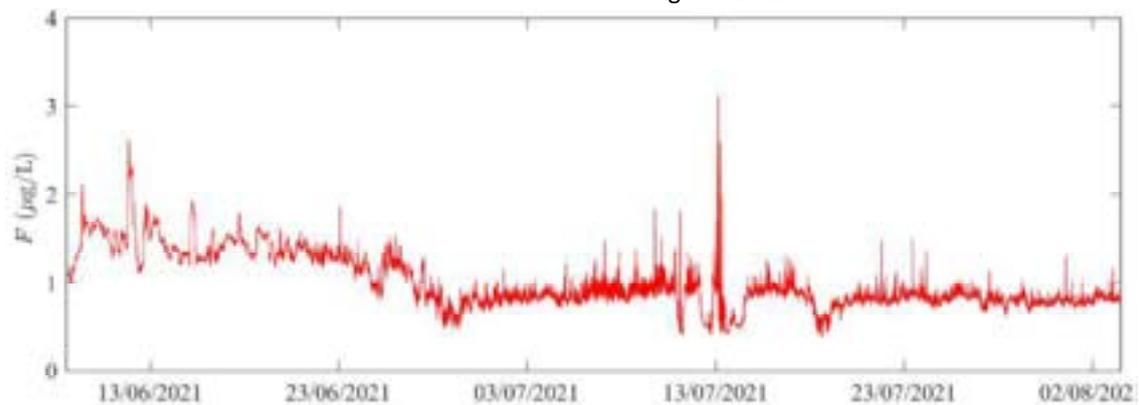


Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

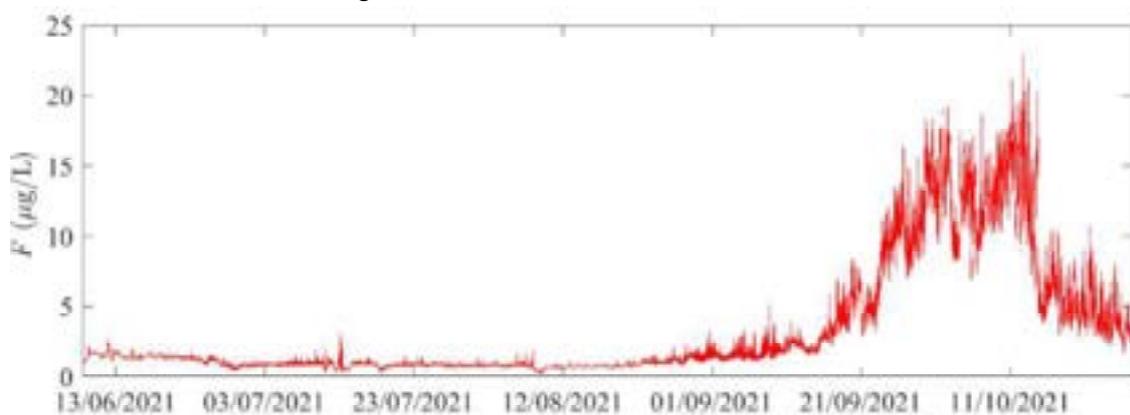
La fluorescencia asociada a clorofila a registrada a 0,5 m sobre el lecho del río varió aproximadamente entre 0,1 y 23,0 $\mu\text{g/L}$ (microgramos por litro de clorofila a). Como se observa en la figura siguiente, aproximadamente hasta mediados de setiembre, y desde mediados de octubre hasta el fin del período informado en esta etapa, diciembre de 2021, los resultados de clorofila a de las mediciones continua fueron excelentes, según el valor propuesto en la propuesta del Grupo Gesta Agua, mientras que en el período entre estas serie de datos se observan de manera mayoritaria valores que indican calidad de agua muy buena para actividades de recreación por contacto directo.

Figura 4-22 Serie de datos de fluorescencia de clorofila a ($\mu\text{g/L}$)

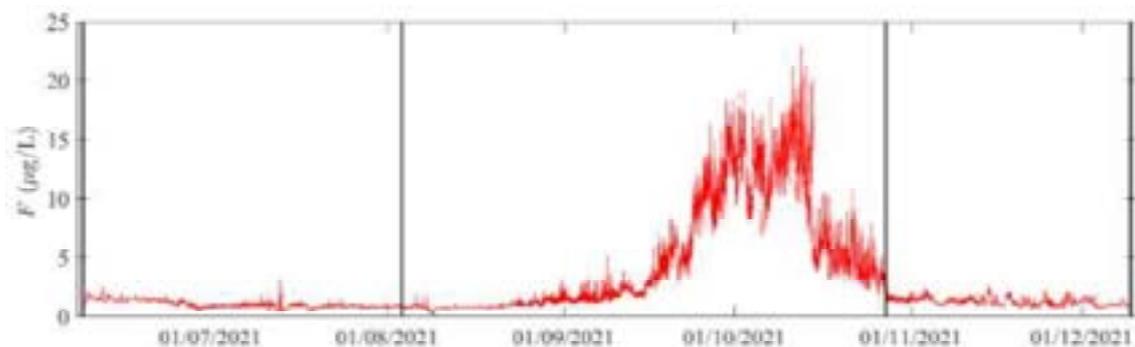
Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-Octubre 2021



Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021

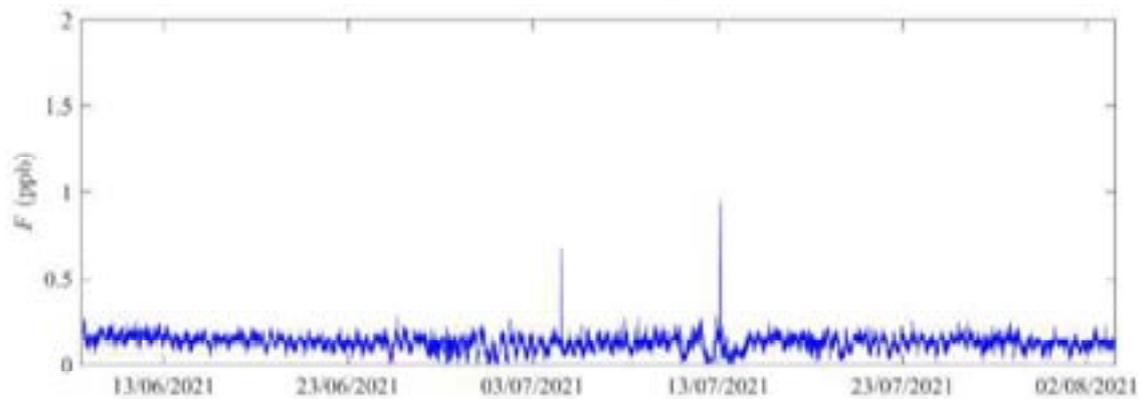


Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

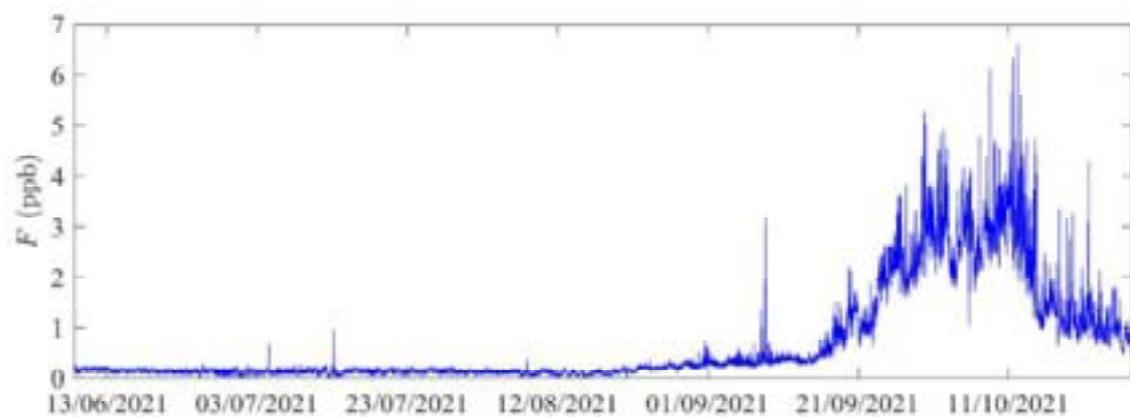
La fluorescencia asociada a ficocianina registrada a 0,5 m sobre el lecho del río varió entre 0,00 y 6,60 ppb (partes por mil millones de equivalente de basic blue 3). No se dispone de conversiones a concentración del pigmento o biovolumen para las medidas de ficocianina, pero se ha observado que es un buen indicador de la presencia de cianobacterias en el fitoplancton. Es de esperar que los valores de fluorescencia de ficocianina lleguen a los 10 ppb en los meses estivales.

Figura 4-23 Serie de datos de fluorescencia de ficocianina (ppb)

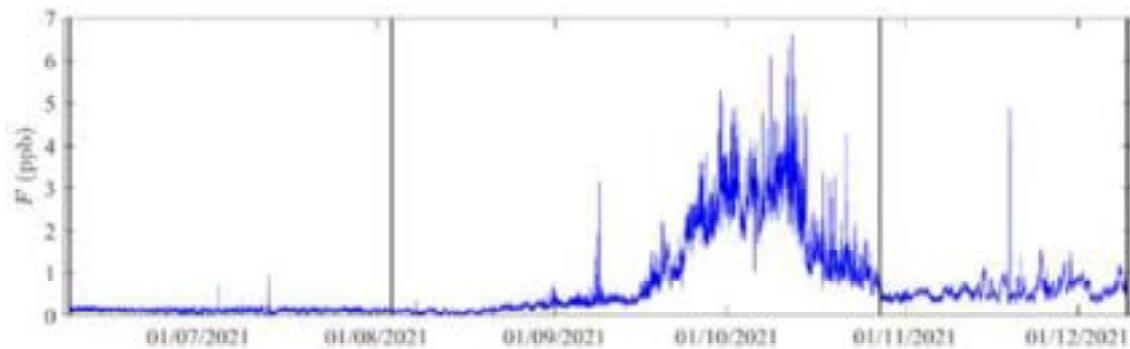
Primer informe IMFIA Junio-Agosto 2021



Segundo informe IMFIA Junio-Octubre 2021



Tercer informe IMFIA Junio-Diciembre de 2021



Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

Se tomaron muestras de agua, por triplicado, los días 8 de junio, 3 de agosto, 27 de octubre y 9 de diciembre de 2021 para calibración y verificación de las medidas del CTD.

Tabla 4-5 Resultados de parámetros de laboratorio de muestras del IMFIA para el CTD.

Parámetro	Replica	8/6/2021	3/8/2021	27/10/2021	9/12/2021
SST (mg/L)	R1	44	<15	15	<15
	R2	71	<15	<15	<15
	R3	ND	<15	18	ND
Turbidez (NTU) ¹		120	52	37	36
SSF (mg/L)	R1	37	<15	<15	<15
	R2	60	<15	<15	<15
	R3	ND	<15	<15	ND
Clorofila a (µg/L)	R1	<2,5	5,7	9,9	<2,5
	R2	3,4	6,4	8,7	2,5
	R3	2,6	5,8	9,6	2,7
Fluorescencia de clorofila a ¹ (µg/L)		1,1	0,8	2,8	1
Color (Esc Pr-Co)	R1	S/D	37	27	17
	R2	S/D	25	22	29
	R3	S/D	14	25	20
Fluorescencia a CDOM ¹ (ppb)		S/D	14,1	14	10,6

1: valores registrados por el sensor del CTD en el momento de extracción de la muestra

4.4.4 Conclusiones

Los resultados obtenidos en el monitoreo puntual en el sitio de muestreo PM01 y los registros continuos colectados con la sonda CTD son consistentes con lo esperado para la zona del Río de la Plata en estudio.

Entre los parámetros determinados se destacan los resultados de fósforo total, en los monitoreos realizados las concentraciones de este parámetro fueron no aceptables, una situación común en el Río de la Plata y los cuerpos de agua del país, cuyo estado trófico se encuentra afectado por elevadas concentraciones de nutrientes determinando un estado de eutrofia.

En los resultados de medición continua con CTD se destacaron la elevada proporción de resultados que incumplen con su estándar de 50 NTU del decreto 253/79 para aguas Clase 3, aguas destinadas para la protección de la biota, y Clase 1, aguas cuyo principal uso sea para abastecimiento de agua potable. Estos valores son comunes a este cuerpo de agua, donde las características del lecho, con predominio principalmente de sedimentos finos, como limos o arcillas, junto con la baja profundidad, determina que en condiciones de vientos moderados a fuertes se produzca la suspensión del sedimento, como suele ocurrir en períodos de invierno. Un resultado a vigilar durante monitoreos posteriores es la concentración del metal pesado zinc, que en el mes entre muestreos tuvo un incremento de 500%, pasando de 0,02 mg/L a 0,10 mg/L.

Para los parámetros de calidad de agua biológicos, clorofila a, ficocianina, microcistina y presencia de cianobacterias, los resultados obtenidos en el muestreo puntual y continuo indican aguas de calidad excelente y muy buena, con concentraciones por debajo del nivel de alerta 1 de la WHO. Durante noviembre no se registró la presencia de cianobacterias en la muestra de agua, mientras que en diciembre fue identificado un género de cianobacterias productor de cianotoxina.

Algunos parámetros pueden modificar su comportamiento al ingresar a una temporada cálida más avanzada. En esta región del Río de la Plata suelen ocurrir floraciones de cianobacterias durante la temporada de verano, al incrementar la temperatura y las horas diurnas con radiación solar, ya que suelen aprovechar las altas concentraciones de nutrientes, en particular aquellos fosforados, que suelen ser limitantes. Durante el mes de diciembre fue detectada la presencia de un género de cianobacterias capaz de producir microcistinas. Altos desarrollos de cianobacterias pueden modificar la composición fisicoquímica del agua, alterando los niveles de material en suspensión, aumentando el pH y llegando en casos extremos a reducir la concentración de oxígeno disuelto en agua, al aumentar la concentración de materia orgánica por efecto de blooms fitoplanctónicos a un nivel más allá de la capacidad oxidativa del sistema, significando el deterioro ambiental de las áreas afectadas.

A la fecha los resultados obtenidos no indican una afectación ambiental severa del Río de la Plata. El Río de la Plata es un cuerpo de agua eutrófico, por lo que concentraciones elevadas de nutrientes son esperables, no se observaron resultados de parámetros que indiquen deterioro del área, la concentración de oxígeno disuelto fue siempre aceptable, los resultados obtenidos son consistentes con el desarrollo de vida acuática que promueve el decreto 253/79 para las aguas Clase 3.

5 ESTUDIO DE SALINIDAD EN LA ZONA DE CAPTACIÓN

5.1 Introducción

En este informe se presentan los estudios complementarios realizados de la dinámica de la salinidad del agua vinculados al Proyecto de Toma de Agua de OSE en el Río de la Plata, en la zona de Arazatí.

El objetivo es realizar un análisis detallado a partir de simulaciones numéricas de largo plazo que permita valorar la frecuencia, duración e intensidad de eventos de salinidad en la zona de la toma de agua, a partir de los cuales poder dimensionar sobre bases objetivas el volumen de reserva de agua dulce complementario, que permita mantener la operación continua de la nueva Planta Potabilizadora aún frente a eventos de salinidad en el punto de toma.

El análisis realizado inicialmente a instancias del Informe de Avance 1 de los Estudios, se basó en considerar el viento en forma discreta a través de su distribución de frecuencia direccional. De esta forma se gana en rapidez de cálculo, pero se pierde una representación real del efecto de la serie cronológica de los vientos, con sus duraciones y sus típicos cambios direccionales.

Realizar simulaciones de largo plazo permite considerar el viento tal como fue ocurriendo secuencialmente a través del tiempo y del espacio, sin necesidad de introducir el efecto de la tormenta ficticia con las limitaciones que esto significa.

Por otra parte, el escenario de caudal bajo y medio provocado por los afluentes principales (ríos Paraná y Uruguay) resulta muy plausible y es frecuente su consideración para el estudio de eventos de salinidad. Sin embargo, aplicar series anuales de caudales resulta más representativo de la realidad, pues anualmente se dan períodos de caudales bajos, medios y altos que inciden sobre la posición espacial de la pluma salina.

Finalmente se tiene el tema de la condición inicial a partir de la cual se aplica la tormenta ficticia. Como se analizó oportunamente, la condición de partida en cuanto a estado de salinidad, tiene una influencia muy importante en los resultados. Realizar simulaciones largas elimina la necesidad de definir una condición inicial.

En consecuencia, en esta instancia se procedió a realizar una simulación de proyección diaria de la concentración de salinidad para un período de tiempo de 28 años comprendidos entre 1993 a 2020, a partir de series reales de vientos y caudales afluentes.

5.2 Características de los modelos empleados

En esta etapa, nuevamente se utilizó el modelo numérico tridimensional RMA-10 que fue desarrollado por el Prof. Ian King de la Universidad de California en Davis. El modelo fue descrito en el Informe de Avance 1, por lo cual no se presentan detalles del modelo en esta instancia.

5.3 Configuración global

5.3.1 Implementación del modelo hidrodinámico

Como se mencionó en el Informe de Avance 1, estos modelos de la familia RMA se han aplicado desde hace varias décadas al Río de la Plata, por lo cual para este trabajo de implementación del modelo RMA-10 se tomaron en cuenta varios resultados y procedimientos ya realizados (Fossati, 2005; IMFIA, 2005, 2006, Santoro 2017).

En general, las implementaciones del modelo se han realizado siguiendo la configuración indicada en la Figura 5-1, en la cual el límite del modelo en la frontera fluvial se ubicaba aguas abajo de Nueva Palmira y en Buenos Aires en la zona del Paraná de las Palmas.

En esta nueva fase del estudio, se efectuó otra implementación del modelo, ubicando la frontera en el Río Uruguay en la zona de Fray Bentos, y la del Río Paraná en San Pedro, de forma de evitar posibles reflexiones de las ondas de marea en esa frontera.

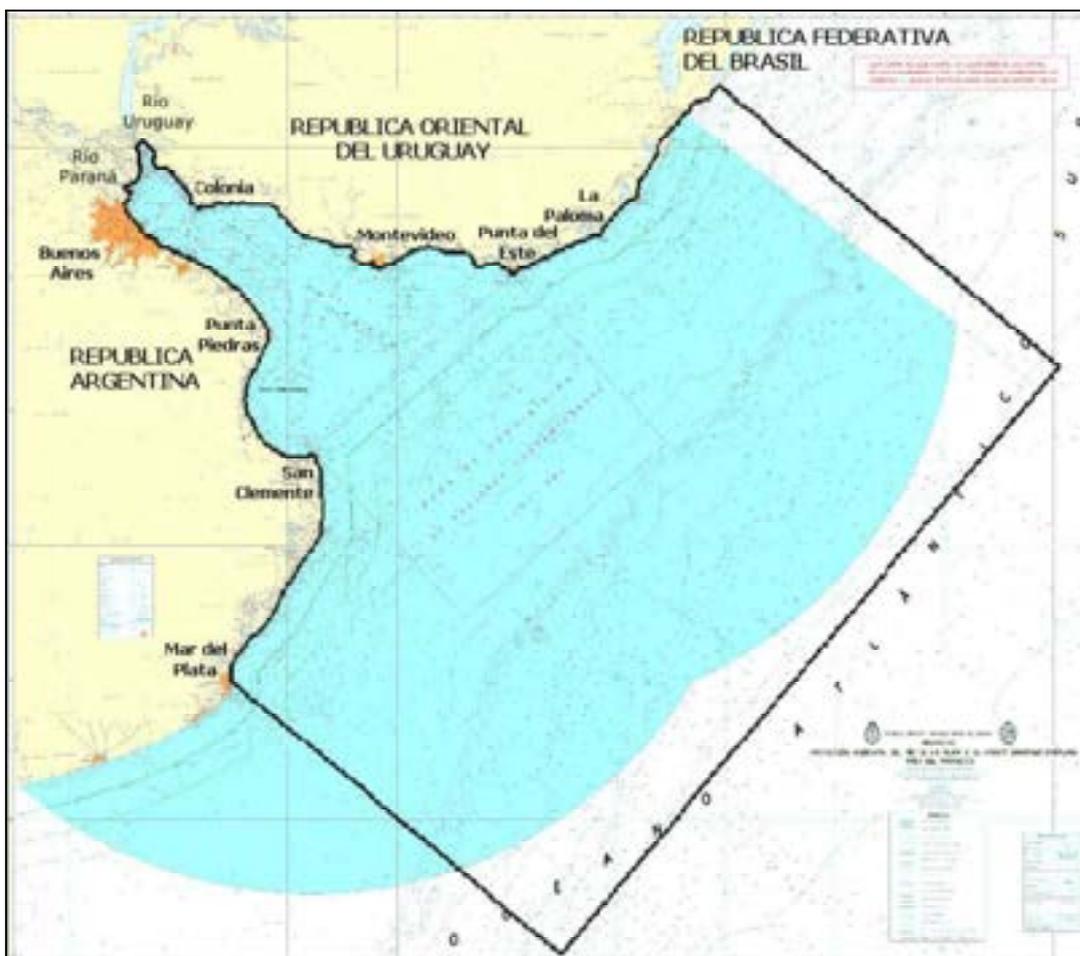


Figura 5-1: Contorno del dominio de cálculo utilizado en la modelación en la primera etapa del estudio.

5.3.1.1 Malla de cálculo

El nuevo dominio de cálculo definido para realizar la modelación del Río de la Plata se muestra en la Figura 5-2.

En la Figura 5-2 se presenta la configuración horizontal de la malla en elementos finitos utilizada en este trabajo, la cual se estructuró sobre la base de un sistema coordinado Este-Oeste y Norte-Sur a partir de los contornos y de los datos batimétricos digitalizados. La mayor zona de detalle de la malla definida para este trabajo se encuentra en los alrededores de Montevideo hasta la zona de Cufre. La mayor resolución finalmente se realizó en la zona de la zona de Arazatí, para representar la morfología costera y la línea de costa, con elementos de hasta 200 m de lado (ver Figura 5-3 y Figura 5-4).

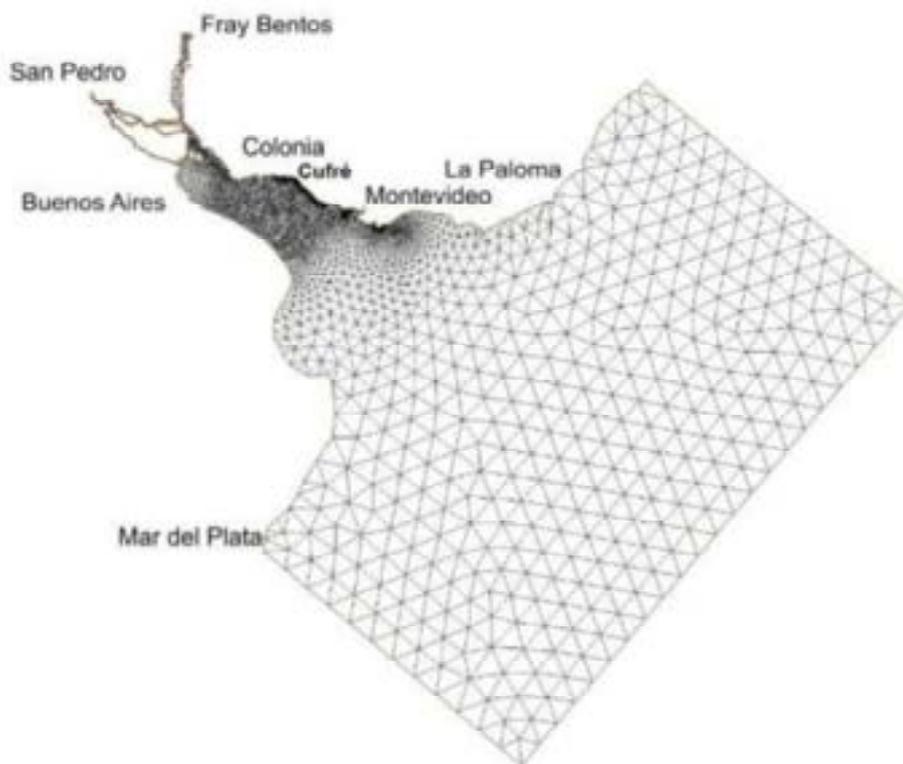


Figura 5-2: Malla en elementos finitos utilizada en la modelación.

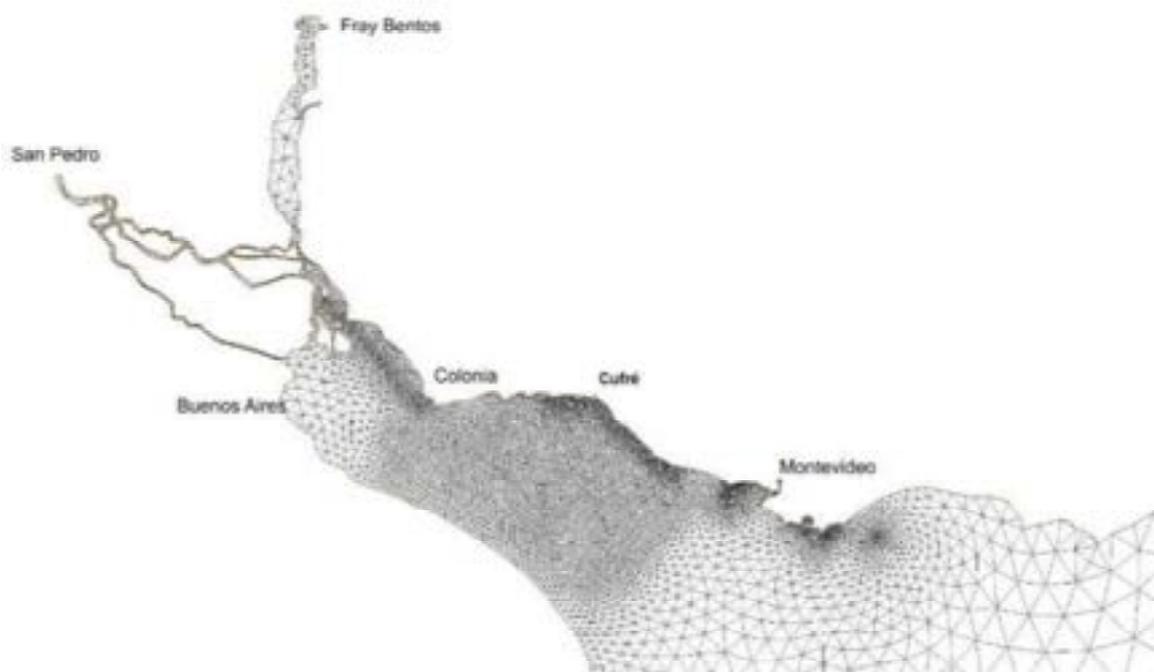


Figura 5-3: Vista regional de la malla en elementos finitos utilizada en la modelación.

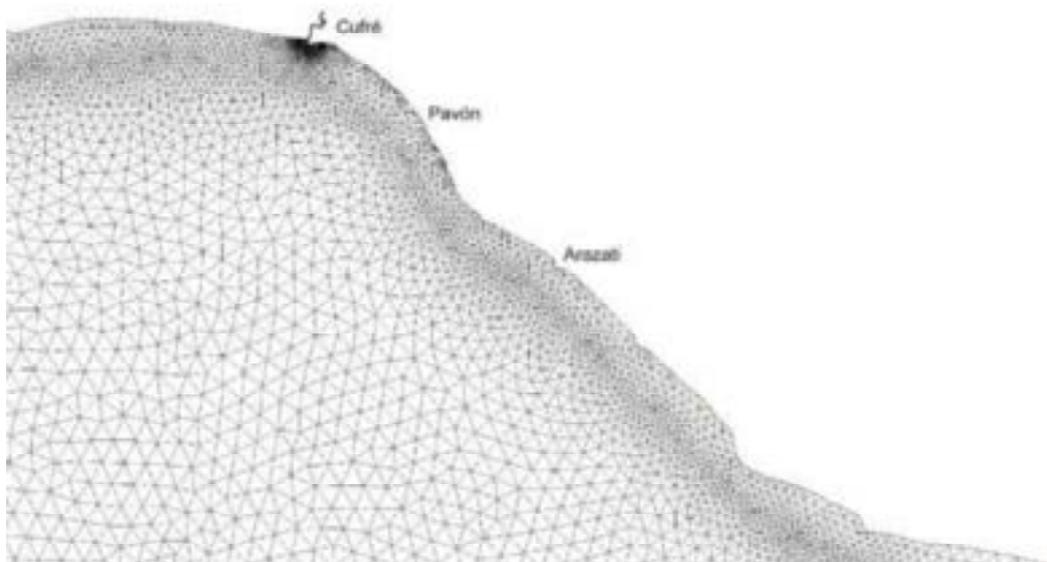


Figura 5-4: Detalle de la malla en elementos finitos en la zona de Arazatí.

5.3.1.2 Batimetría

La batimetría del dominio de cálculo se confeccionó a partir de información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) para el Río Uruguay, el Río de la Plata y la plataforma continental. Toda la información de profundidades recopilada tiene el mismo nivel de referencia, el Cerro Wharton, razón por la cual no fue necesaria ninguna reducción adicional. Esta información convenientemente digitalizada constituye los archivos de base para la generación de la batimetría en la malla discreta sobre la cual trabaja el modelo.

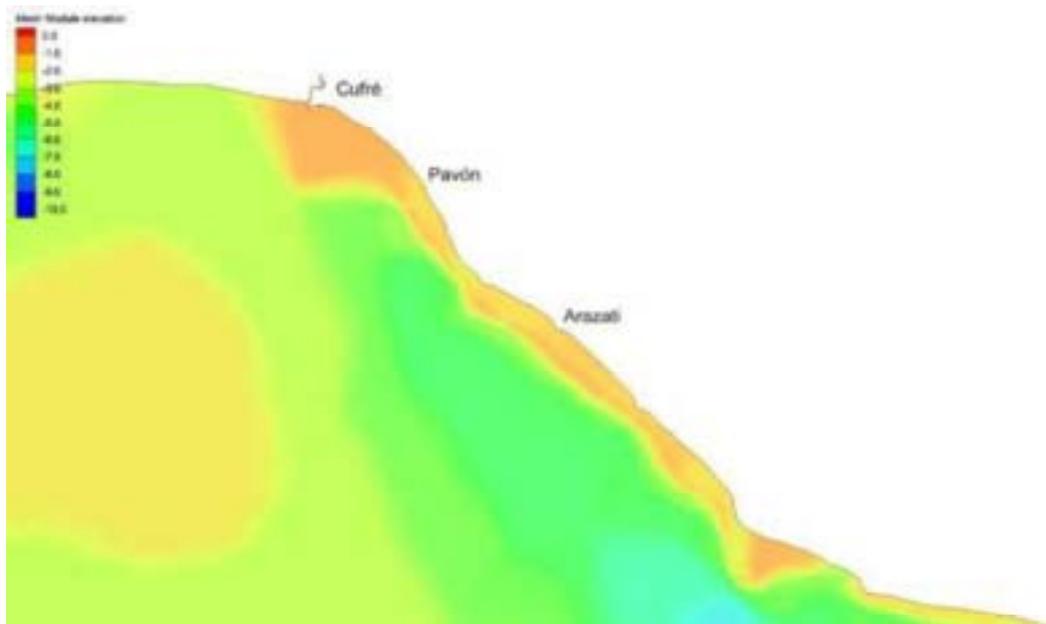


Figura 5-5: Batimetría en la zona de Arazatí.

En la Figura 5-5 se muestra la batimetría en la zona de Arazatí, incluyendo la zona del Arroyo Cufre.

5.3.1.3 Condiciones de borde e inicial

Caudal Fluvial

Una de las condiciones de borde que deben especificarse en el modelo son los flujos que ingresan al dominio. En el caso del Río de la Plata por la frontera Oeste ingresa el mayor aporte de caudal a través de la descarga de los ríos Paraná y Uruguay. Estas condiciones de borde se imponen al modelo como un ingreso de caudal a través de las secciones correspondientes a los ríos, las cuales se definen como líneas de continuidad en la malla. Se impone un ingreso del caudal perpendicular a la frontera y con un valor de salinidad cero por tratarse de un ingreso de agua fluvial.

El ingreso del Río Paraná se define en una sección ubicada aproximadamente en San Pedro. El ingreso del Río Uruguay se realiza en la sección ubicada en la zona de Fray Bentos.

Elevación de la superficie libre

El ingreso del flujo exterior del Océano Atlántico a través de la frontera oceánica del modelo se especifica a partir de la elevación de la superficie libre y el valor de salinidad a lo largo de la misma. La elevación de la superficie libre puede imponerse como un valor constante en todo el período de simulación o puede especificarse como una serie temporal de nivel variable más representativo de la realidad. La condición de borde

oceánica seleccionada para la salinidad fue un valor constante a lo largo de todo el período de simulación igual a 38 ppm.

Dependiendo de las condiciones que se quieren representar en cada simulación, el nivel impuesto en la frontera oceánica se calcula diferente. Cuando se realiza la simulación considerando como uno de los forzantes la marea astronómica, ésta se representa en el modelo a partir de la condición de borde de nivel en la frontera oceánica. En 23 nodos distribuidos en la frontera oceánica se calculan las series temporales de niveles correspondientes a la marea astronómica a partir de la superposición de las componentes armónicas principales de la marea, M2, O1, Q1, N2 y S2 para el período de tiempo seleccionado. El modelo en cada paso de tiempo calcula los niveles en el resto de los nodos de la frontera oceánica interpolando linealmente a partir de los niveles ingresados. Se tiene con esto un valor de nivel impuesto en esta frontera para cada paso de tiempo, es decir, variable en el tiempo.

Cuando se considera la marea real como uno de los forzantes del modelo, también se utiliza la condición de borde de nivel en la frontera oceánica para representarla, siendo necesarias en este caso las series de registros reales de niveles en Mar del Plata y en La Paloma. Estas series de niveles se ingresan al modelo como condiciones de borde de nivel en los dos nodos correspondientes a la intersección de la frontera oceánica y la costa. En el caso de Mar del Plata este punto coincide con su ubicación real pero el nodo de la frontera Norte no coincide con la ubicación de La Paloma, sino con un punto ubicado más al Norte. En este caso se asume la hipótesis de que la elevación de la superficie libre en el nodo Norte es proporcional a la variación de la superficie libre en La Paloma, ajustando durante la calibración el factor de proporcionalidad.

Además de considerar las series reales en estos dos puntos, se calculan los niveles correspondientes a la marea astronómica del mismo período en los 23 nodos de la frontera oceánica como se explicó en el caso anterior. Para los nodos de las fronteras se calcula la diferencia entre los niveles medidos y los niveles astronómicos, obteniéndose así la serie de niveles residuales en estos dos puntos. A partir de estas series de niveles residuales se calcula la serie de niveles residuales en los nodos restantes de la frontera, que posteriormente se suman a la componente astronómica previamente calculada. La distribución de niveles residuales en la frontera se determina de forma que se ajusten los niveles reales dentro del dominio de cálculo, lo cual se realiza en la etapa de calibración del modelo. Finalmente, el modelo distribuye linealmente los niveles reales de los 23 nodos a lo largo de todos los nodos de la frontera oceánica.

Vientos

Como se mencionó anteriormente, los datos de viento utilizados fueron extraídos de la base de datos del ECMWF del Reino Unido. En particular se utilizó una serie temporal de valores horarios que cubre los años 1993-2020.

El viento genera sobre la superficie libre una tensión de corte que el modelo impone como condición de borde. El efecto del viento puede considerarse constante a lo largo del período de simulación o variable según el paso de tiempo, siendo necesaria la especificación en este caso del vector viento en cada instante de la simulación.

En este trabajo de simulación el viento se considera variable en el espacio y en el tiempo. La grilla espacial es de 0.25 grados x 0.25 grados en latitud-longitud, con 41 columnas x 33 filas. El paso de tiempo de los campos de vientos es horario. La Figura 5-6 muestra los puntos de la grilla de vientos que son extrapolados a los 17425 nodos de la malla en elementos finitos para cada paso de tiempo.

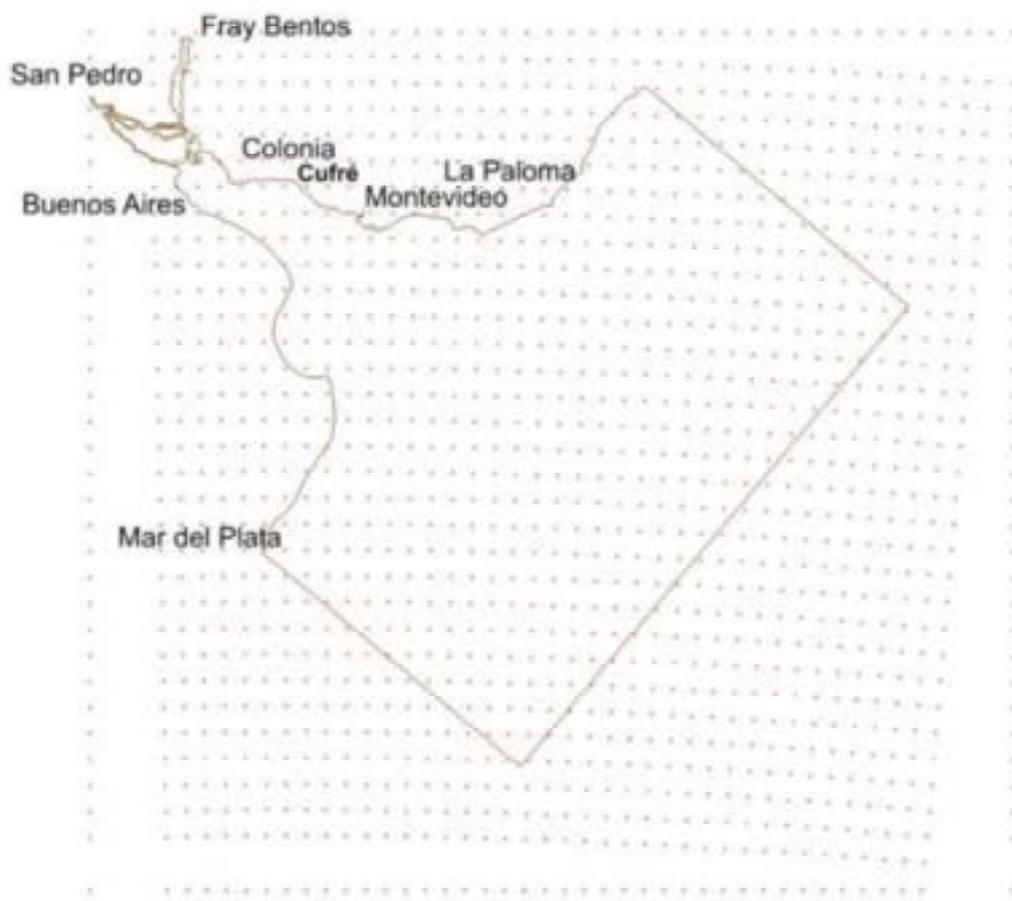


Figura 5-6: Grilla de vientos desde la que se interpola a la malla en elementos finitos.

Condición Inicial

En cada simulación el modelo requiere la especificación de una condición inicial para las variables del sistema, es decir, para la elevación de la superficie libre, para la velocidad y para la salinidad. La condición inicial para la elevación de la superficie es un valor uniforme en todo el dominio de cálculo, igual a 0,91 m. Para el campo de velocidades la condición inicial es el reposo.

Para la condición inicial de salinidad la situación es más compleja. Es lógico pensar que en la frontera oceánica los valores de salinidad que se deben imponer sean valores cercanos a la salinidad en los océanos y que en la zona de descarga fluvial se deben imponer valores de salinidad cero, es decir agua dulce. El problema en este caso se presenta en la representación inicial de la zona de mezcla y en general hay varias formas de resolverlo. En este caso se utilizó una condición inicial muy diferente a la real y se realizó una simulación previa del sistema lo suficientemente larga como para independizarse de la misma. La metodología utilizada consistió en imponer un valor de salinidad oceánica en todo el dominio de cálculo y a partir de esa situación modelar la evolución de la descarga fluvial y por lo tanto la formación de la zona de mezcla. Al iniciar la simulación, el frente salino se desplaza hacia el exterior del Río de la Plata hasta que se establece una situación de régimen. Esta metodología y los tiempos requeridos para independizarse de la condición inicial han sido estudiados en trabajos anteriores (Fossati 2005, IMFIA 2011).

5.3.2 Validación hidrodinámica

5.3.2.1 *Características generales*

Al igual que como fue realizada durante la primera etapa del Estudio, se verificó que el modelo ajustara adecuadamente, para lo cual se simuló el período de tiempo comprendido entre octubre de 2003 y abril/mayo de 2004, aunque la verificación del modelo se realizó para el período febrero - abril de 2004. Los meses anteriores deben simularse para independizarse de la condición inicial establecida, principalmente de la condición impuesta al campo salino.

En este caso el período comprendido entre octubre 2003 y diciembre de 2003 inclusive se simuló considerando como únicos forzantes del sistema el caudal fluvial correspondiente a dicho período y la marea astronómica.

El mes enero de 2004 se simuló considerando el efecto de la marea real, del caudal fluvial y el efecto del viento. Con este período previo se alcanza una situación inicial muy favorable para la modelación del período de calibración, la cual se realizó también teniendo en cuenta el efecto de la marea real, de los vientos y del caudal fluvial que ingresa al sistema.

La comparación de los valores medidos y modelados de velocidades de corriente y niveles, a partir de la cual se realiza la verificación, se realizó para los meses de marzo y abril de 2004.

Los niveles registrados en las estaciones mareográficas de Montevideo, Colonia y Buenos Aires son los que se utilizaron para comparar con los niveles modelados. Los puntos de control representativos de dichas estaciones se definieron en la malla de cálculo para realizar la comparación.

En la Figura 5-7 a la Figura 5-14 se presentan los resultados de la verificación realizada.

5.3.2.2 Resultados del ajuste del modelo

Marzo 2004

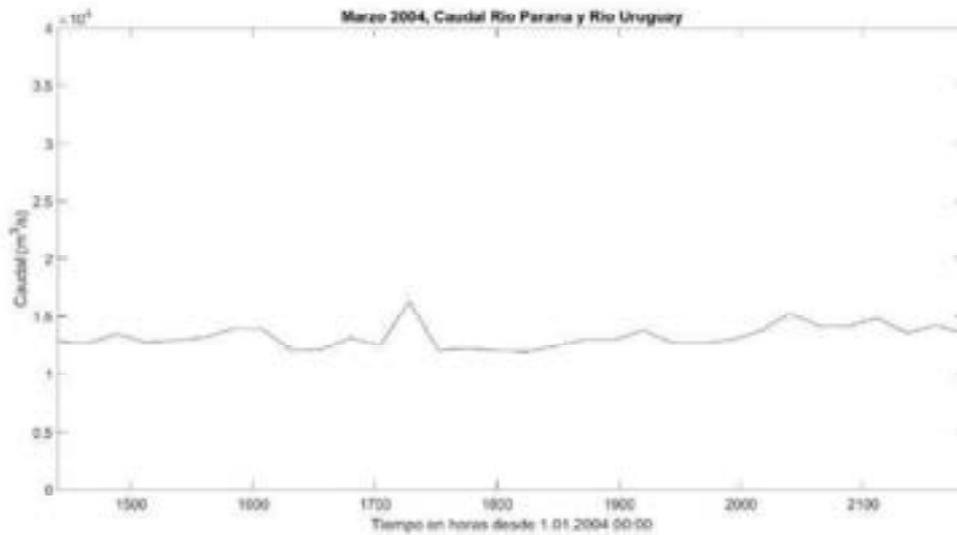


Figura 5-7: Caudales fluviales totales durante Marzo de 2004.

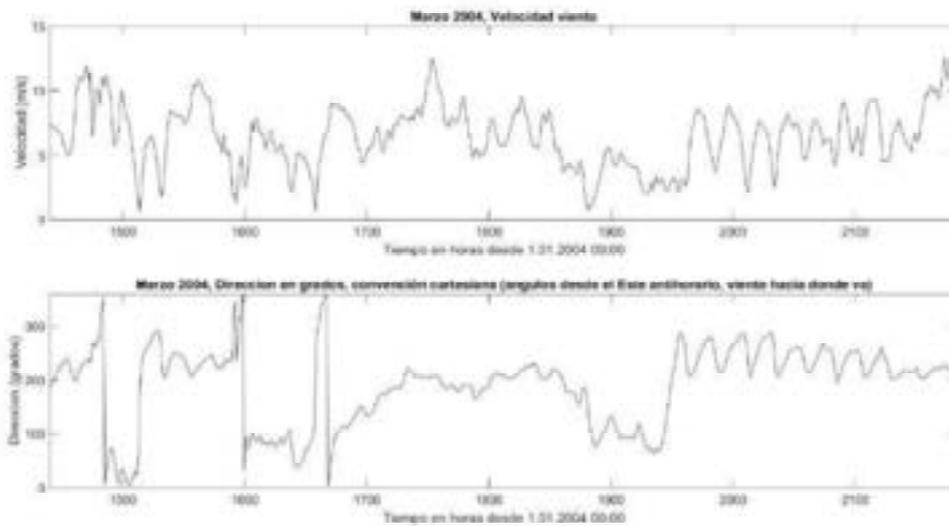


Figura 5-8: Velocidad y dirección de viento durante Marzo de 2004.

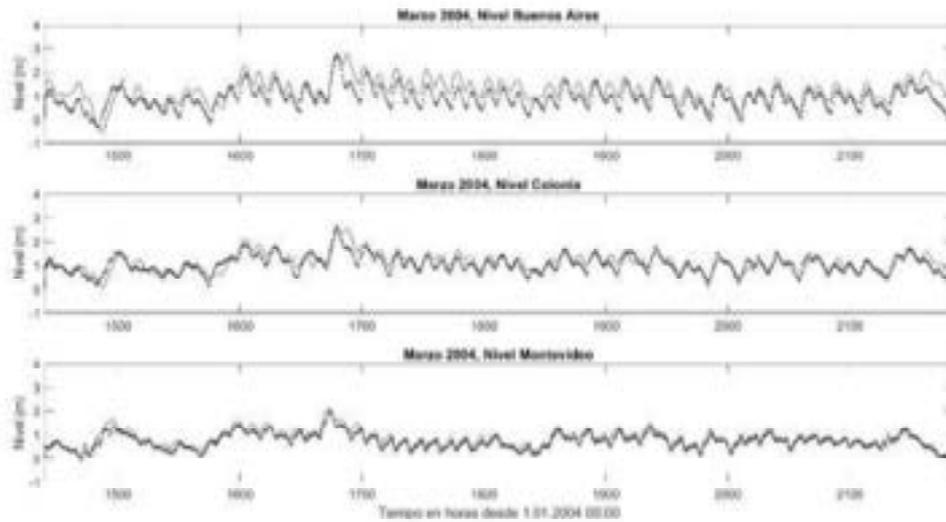


Figura 5-9: Comparación de niveles medidos y obtenidos con el modelo en las estaciones mareográficas de Montevideo, Colonia y Buenos Aires, durante Marzo de 2004.

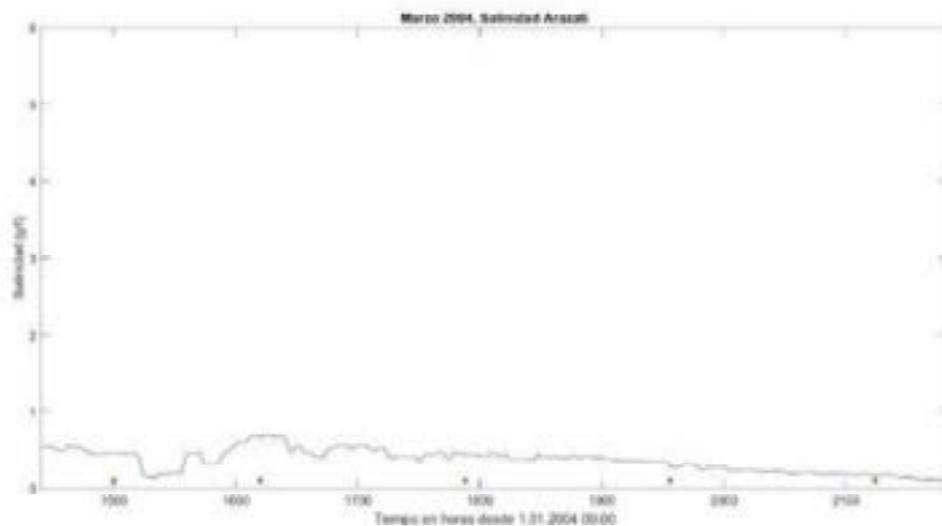


Figura 5-10: Salinidad en Arazatí. Resultados modelos (línea), valores medidos OSE (puntos), Marzo de 2004.

Abril 2004

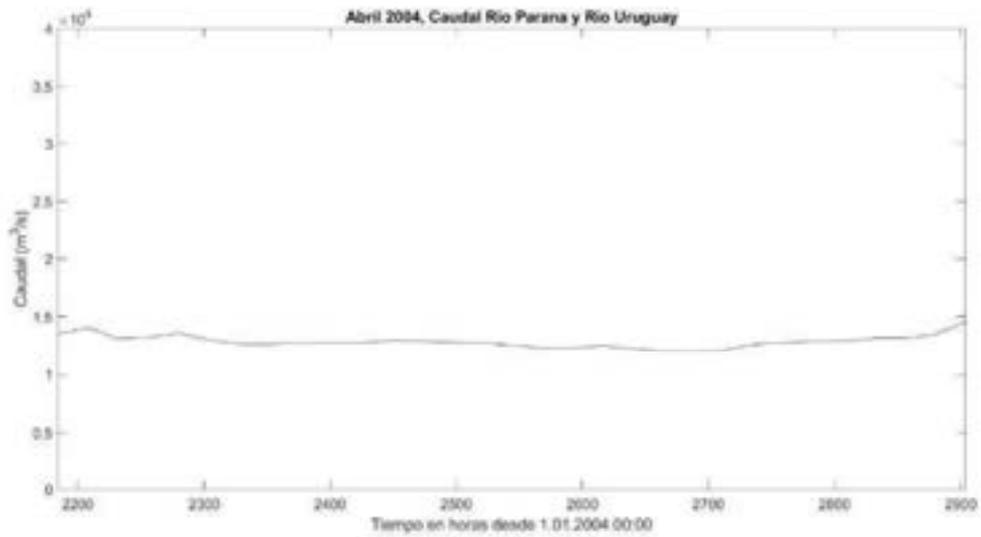


Figura 5-11: Caudales fluviales totales durante Abril de 2004.

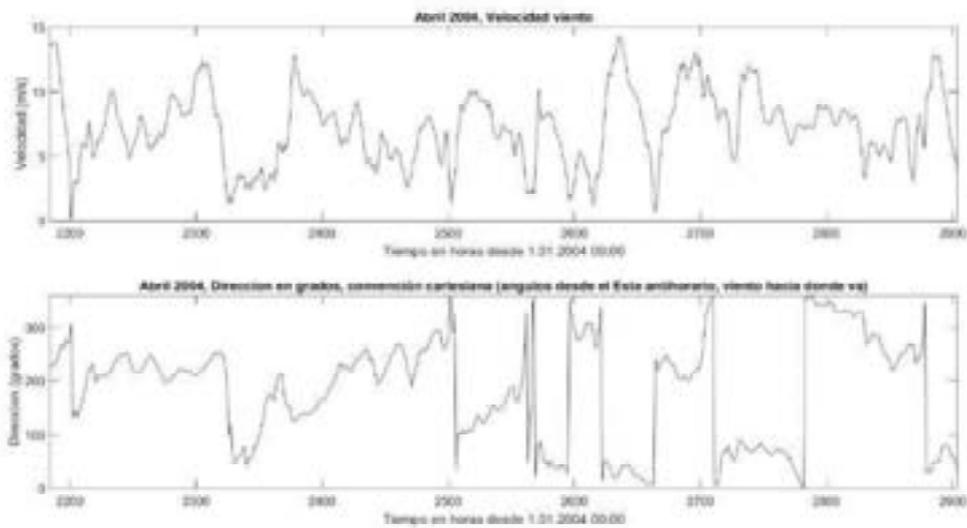


Figura 5-12: Velocidad y dirección de viento durante Abril de 2004.

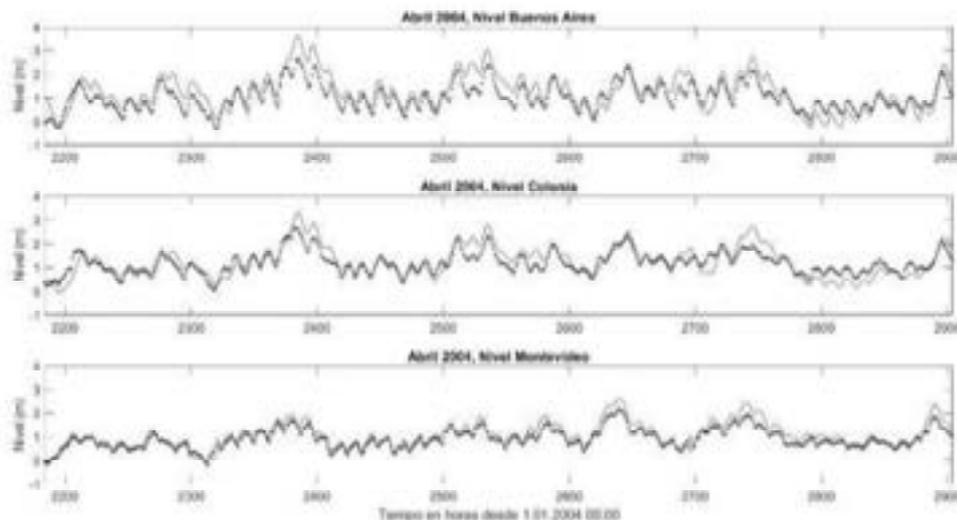


Figura 5-13: Velocidad y dirección de viento durante Abril de 2004.

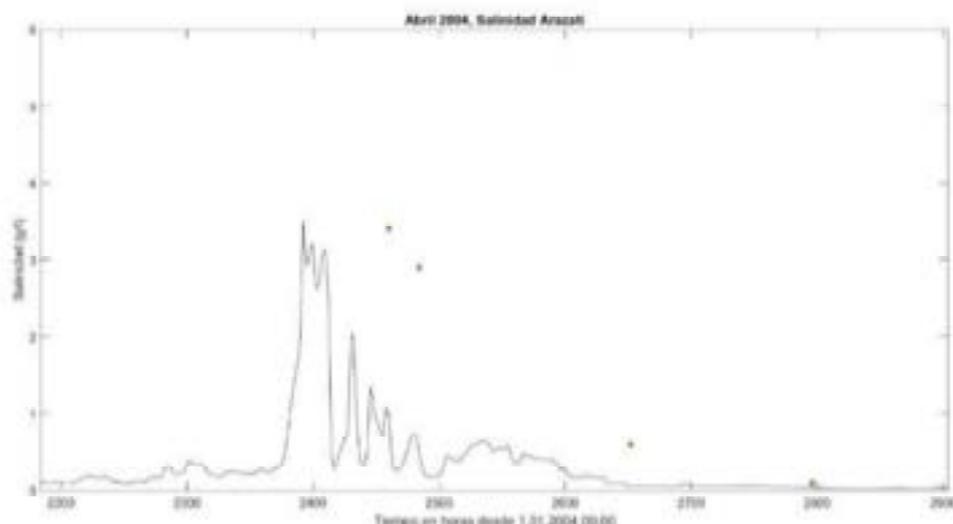


Figura 5-14: Salinidad en Arazatí. Resultados modelos (línea), valores medidos OSE (puntos), Abril de 2004.

En dichas figuras se observa como el modelo representa correctamente la variación temporal y la magnitud de los niveles medidos en las tres estaciones de control seleccionadas. Lo más importante en este caso es la representación de la variación de los niveles registrados en la estación mareográfica de Colonia, ya que es la zona de particular interés en este trabajo de modelación. Respecto a esto, se observa en las figuras presentadas, que aunque en ciertos casos no se reproduce el valor exacto de nivel, sí se representan los períodos de bajante y de creciente de nivel, además de la oscilación diaria generada por la marea.

En síntesis, estos resultados obtenidos en la validación hidrodinámica muestran que el modelo es capaz de representar correctamente los niveles y las corrientes del Río de la Plata.

Por otra parte, se han representado los resultados de salinidad calculados con el modelo en Arazatí, durante los meses de marzo - abril de 2004, período de tiempo en el cual además de haber mediciones de salinidad realizadas por OSE, también se registraron eventos de salinidad alta en Arazatí.

La comparación entres valores modelados y medidos muestra que el modelo reproduce bastante bien los valores medidos, principalmente los valores extremos registrados en abril 2004, además de ser coherente con los valores de salinidad bajos registrados en el mes de marzo 2004.

5.4 Puntos de Monitoreo

Con el objeto de analizar los resultados de las simulaciones realizadas, se seleccionaron 7 puntos de cálculo en los cuales se determinaron los valores de salinidad para las diferentes condiciones de vientos y caudales fluviales analizadas. Dichos puntos se localizan aproximadamente a 2km de la costa, distanciados entre si entre 2km a 5 km.

Las coordenadas de los puntos de cálculo son las siguientes:

- Point 1 X=485343.0 Y=6186421.0
- Point 2 X=490376.0 Y=6183059.0
- Point 3 X=491647.0 Y=6180639.0
- Point 4 X=492501.0 Y=6178775.0
- Point 5 X=494660.0 Y=6176738.0
- Point 6 X=498787.0 Y=6174038.0
- Point 7 X=502282.0 Y=6170770.0

Dichos puntos se muestran en la Figura 5-15.

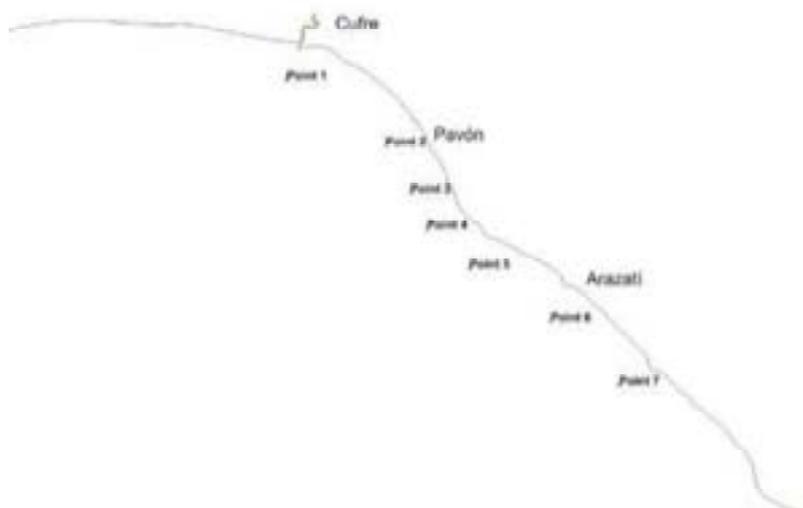


Figura 5-15: Ubicación de los puntos de monitoreo de salinidad.

5.5 Escenarios considerados

Los escenarios de simulación fueron definidos básicamente en función de 3 variables que fuerzan el modelo: vientos, caudales fluviales y niveles oceánicos.

En relación a los valores de vientos, como se dijo anteriormente se trabajó con vientos horarios obtenidos del ECMWF para el período 1993-2020, en una grilla de 0.25 grados x 0.25 grados en latitud y longitud, la cual fue interpolada a la malla del modelo.

Hay diferentes estudios que caracterizan estadísticamente los caudales fluviales. En este trabajo se toma como referencia los valores seleccionados por Fossati et. al (2008) ya que su elección fue definida para el estudio de la dinámica de la salinidad en el Río de la Plata.

La Tabla 5-1 define los valores característicos de los caudales fluviales altos (percentil 25% de superación), medios y bajos (percentil 75% de superación), utilizados en las simulaciones de ambos escenarios.

Mean, high and low flow discharges (m ³ /s) for main tributaries of the Río de la Plata				
	Flow discharge (m ³ /s)			Total
	Paraná Las Palmas River	Paraná Guazú River	Uruguay River	
Mean flow	4050	11600	4650	22300
High flow	6800	22800	10400	40000
Low flow	3000	10200	1800	15000

Tabla 5-1: Valores de caudales del Río Paraná y Río Uruguay correspondientes a flujos altos, medios y bajos. (Tomado de Fossati et al 2008).

En relación a los caudales fluviales, inicialmente se había planteado trabajar solamente con los caudales correspondientes al año 2004, que como ya se había mencionado corresponde a un año con caudal bajo.

Sin embargo, el efectuar sistemáticamente todas las simulaciones en un escenario de déficit hídrico, claramente se generarían resultados con un sesgo muy marcado que podrían no ser realistas, pues considerar permanentemente caudales bajos significaría admitir que la pluma salina se posiciona en una zona del Río de la Plata ubicada más al Oeste de la que en realidad se ubica, y en consecuencia generando un ingreso de la salinidad fuera de la realidad.

En consecuencia, para las simulaciones extendidas, se trabajó con una serie de 9 años de caudales diarios registrados en el Río Paraná y en el Río Uruguay correspondientes al período 1999-2007. En la Tabla 5-2 se presentan los caudales medios anuales para cada uno de los años, observándose que en general la serie contempla caudales bajos y medios.

Año	Caudal medio (m ³ /s)		
	Río Parana	Río Uruguay	Total
1999	20,465	3,389	23,854
2000	16,297	4,733	21,029
2001	15,694	6,332	22,025
2002	18,403	8,686	27,090
2003	17,931	5,517	23,447
2004	14,861	2,922	17,783
2005	14,374	4,991	19,366
2006	12,954	2,097	15,050
2007	17,520	5,299	22,818

Tabla 5-2: Valores de caudales del Río Paraná y Río Uruguay correspondientes al período 1999-2007.

Se observa que de los 9 años considerados, hay 1 año con caudal bastante superior a la media (2002) y 3 años con caudales bastante inferiores al caudal medio (2004, 2005 y 2006). Esta serie de 9 años de caudales fue utilizada para completar las simulaciones extendidas para los años en los que no se contaba con datos reales de caudales afluentes.

En relación a los niveles oceánicos que fuerzan el modelo, se contaba con información registrada en las estaciones de Mar del Plata y La Paloma para el año 2004. Esta información fue complementada con información de niveles obtenidos del modelo global de océano Copernicus, que simula exclusivamente las mareas de tormenta sin acople con las mareas astronómicas. A través de esta modelo se obtuvieron series horarias para los años 2018, 2019 y 2020, completando así una serie de 4 años de niveles oceánicos.

A partir de esta información, las simulaciones fueron efectuadas considerando el viento correspondiente a cada año, y combinando niveles oceánicos y caudales fluviales de acuerdo a las series disponibles.

La Tabla 5-3 presenta la combinación utilizada en las simulaciones.

	Anio simulacion	Nivel oceanico (anio)	Caudal (anio)
1	1993	---> 2004	2004
2	1994	---> 2004	2004
3	1995	---> 2019	2002
4	1996	---> 2020	2003
5	1997	---> 2004	2004
6	1998	---> 2018	2005
7	1999	---> 2019	1999
8	2000	---> 2020	2000
9	2001	---> 2018	2001
10	2002	---> 2019	2002
11	2003	---> 2020	2003
12	2004	---> 2004	2004
13	2005	---> 2018	2005
14	2006	---> 2019	2006
15	2007	---> 2004	2007
16	2008	---> 2020	1999
17	2009	---> 2004	2000
18	2010	---> 2018	2001
19	2011	---> 2019	2002
20	2012	---> 2020	2003
21	2013	---> 2004	2004
22	2014	---> 2018	2005
23	2015	---> 2019	2006
24	2016	---> 2020	2007
25	2017	---> 2004	1999
26	2018	---> 2018	2000
27	2019	---> 2019	2001
28	2020	---> 2020	2002

Tabla 5-3: Escenarios simulados período 1993-2020.

5.6 Resultados de las simulaciones extendidas

5.6.1 Generalidades

A partir de los resultados del modelo hidrodinámico RMA10 se realizó el estudio de la salinidad en los 7 puntos de control mencionados anteriormente.

A partir de las series temporales de salinidad en cada punto y para cada escenario, se extrajeron del modelo resultados cada 0,25 horas. Con el objeto de definir indicadores de los valores de salinidad más robustos, en cada simulación se aplicó un filtro de 24 horas tipo media temporal de forma de eliminar oscilaciones rápidas.

5.6.2 Frecuencias de ocurrencia

En la Figura 5-16 se muestra la serie temporal de salinidad en Arazatí (punto P6) para los 28 años de simulación. Esta serie es utilizada para definir los eventos de salinidad.

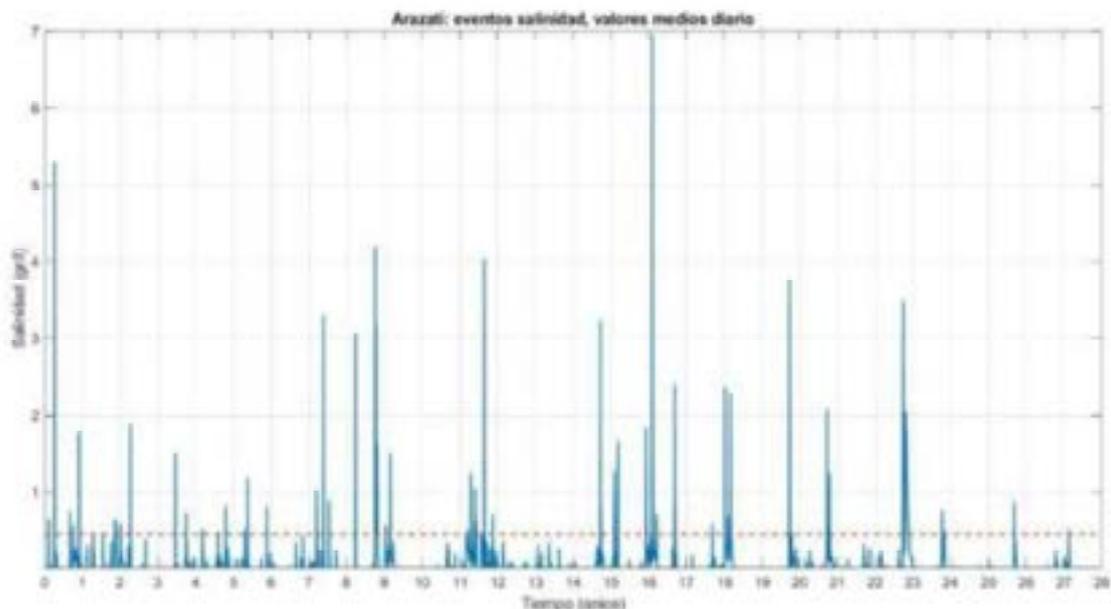


Figura 5-16: Serie temporal eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

En la siguiente Figura se muestra la curva de frecuencia de los valores de salinidad instantáneos en Arazatí (no de los eventos de salinidad). Se observa que aproximadamente el 97,5% del tiempo la salinidad es inferior a $0,45\text{g/l}^3$, por lo cual el 2,5% (9,1 días/año) del tiempo, la salinidad es superior al valor umbral.

³ Valor asociado a una concentración de Cloruros de 250 mg/l, correspondiente al VMP de la norma UNIT 833:2008 que establece los requisitos de Agua Potable.

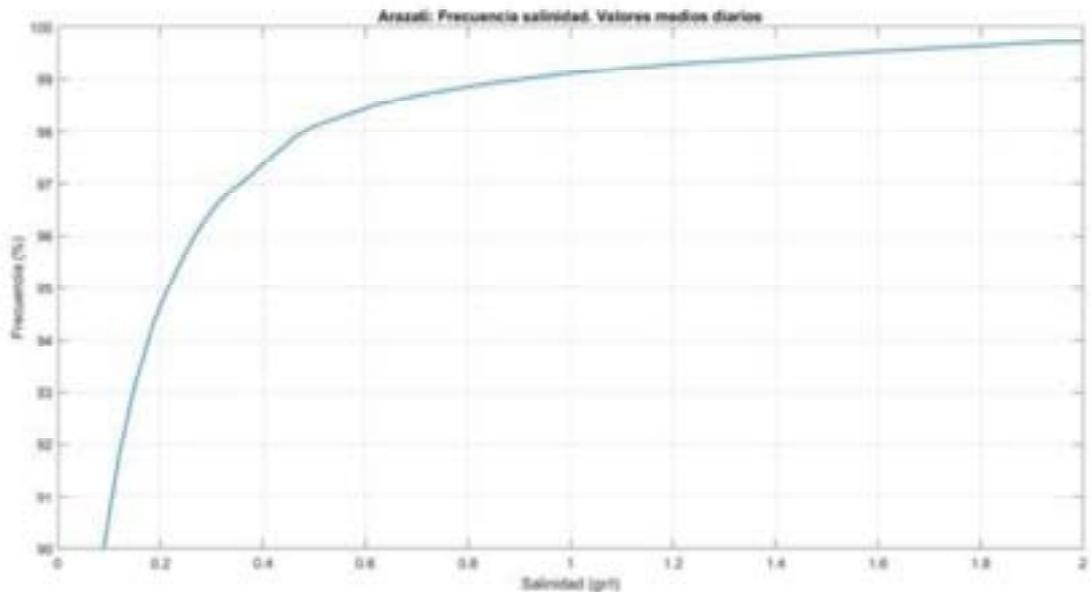


Figura 5-17: Curva de frecuencia de salinidad en Arazatí (28 años)

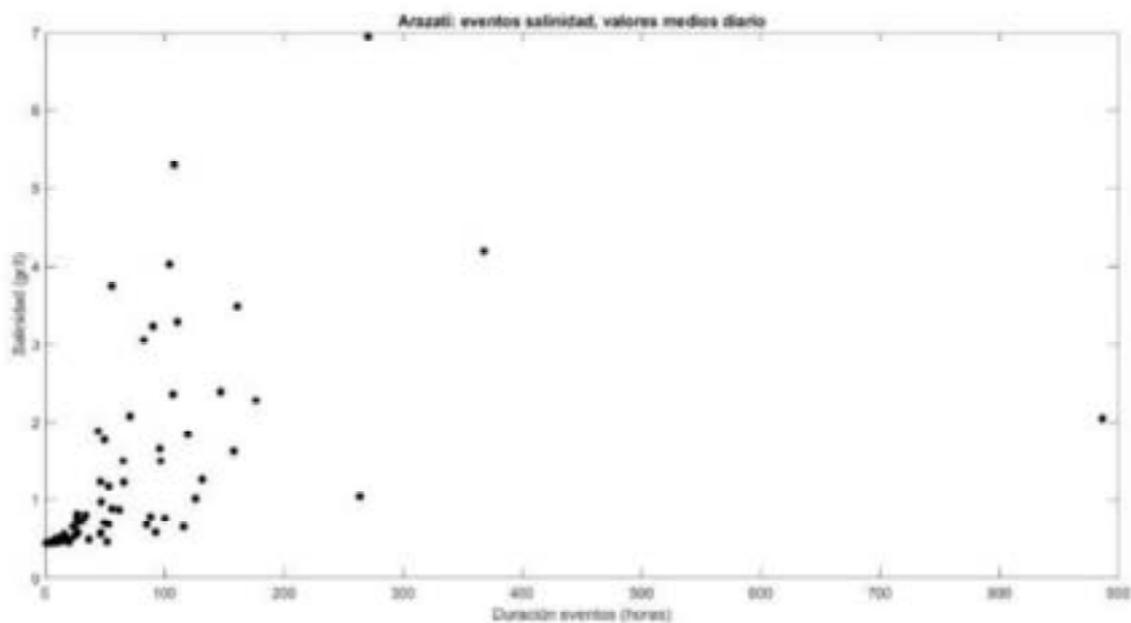


Figura 5-18: Salinidad-Duración de los eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

En la Figura 5-18 se grafican los pares de valores de salinidad y duración de cada uno de los eventos de salinidad en Arazatí. Se observa que hay un número importante de eventos cuya duración es menor a 24 horas. Se destaca la ocurrencia de un evento excepcional cuya duración es de 886 horas.

En la Figura 5-19 se grafica la serie temporal de salinidad en Cufre. En este punto de monitoreo se observa el menor número de eventos de salinidad en comparación con Arazatí, observándose un período de 6 años continuos sin eventos salinos. En la Figura

5-20 se muestra la curva de frecuencia de la salinidad y en la Figura 5-21 los pares de valores de salinidad y duración de cada uno de los eventos de salinidad en Cufre.

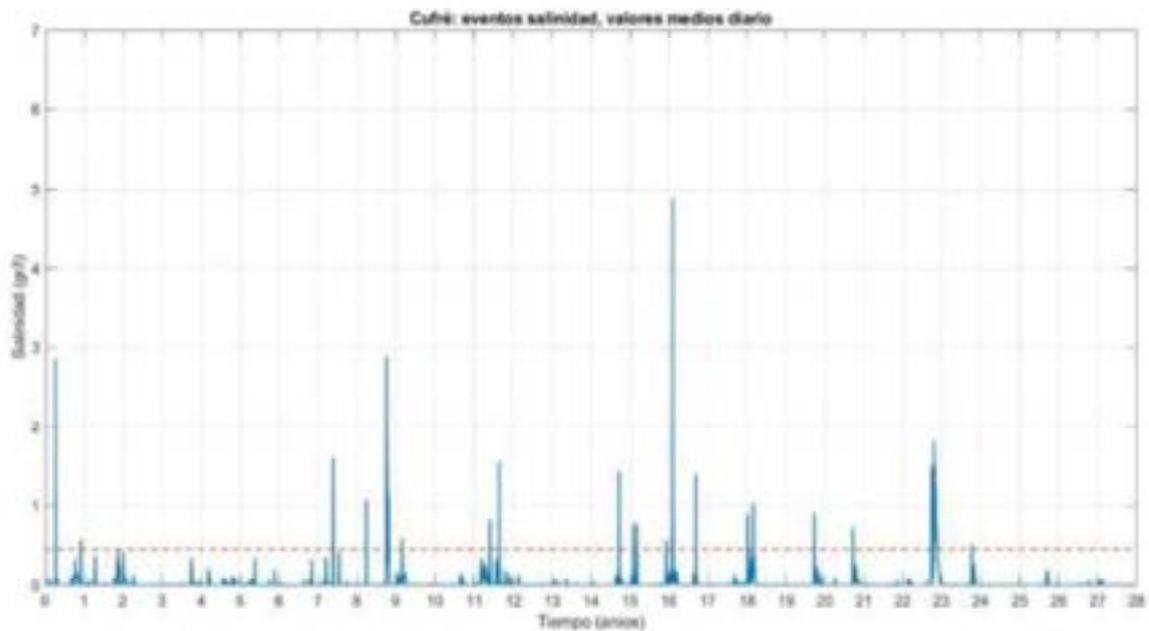


Figura 5-19: Serie temporal salinidad en Cufre (28 años de simulación).

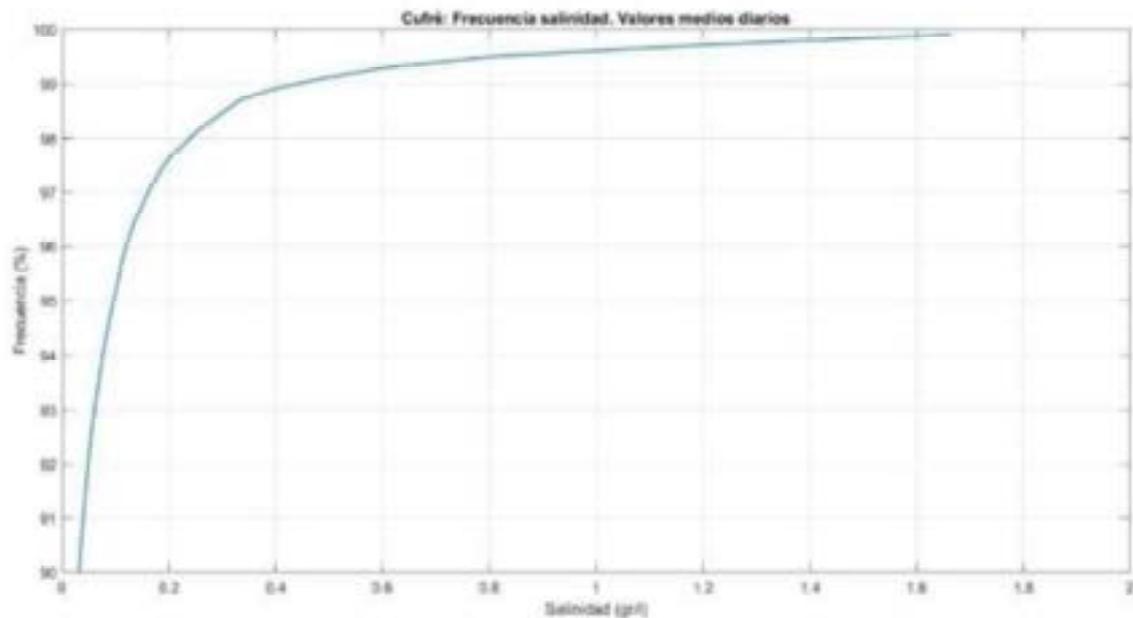


Figura 5-20: Curva de frecuencia de salinidad en Cufre (28 años de simulación).

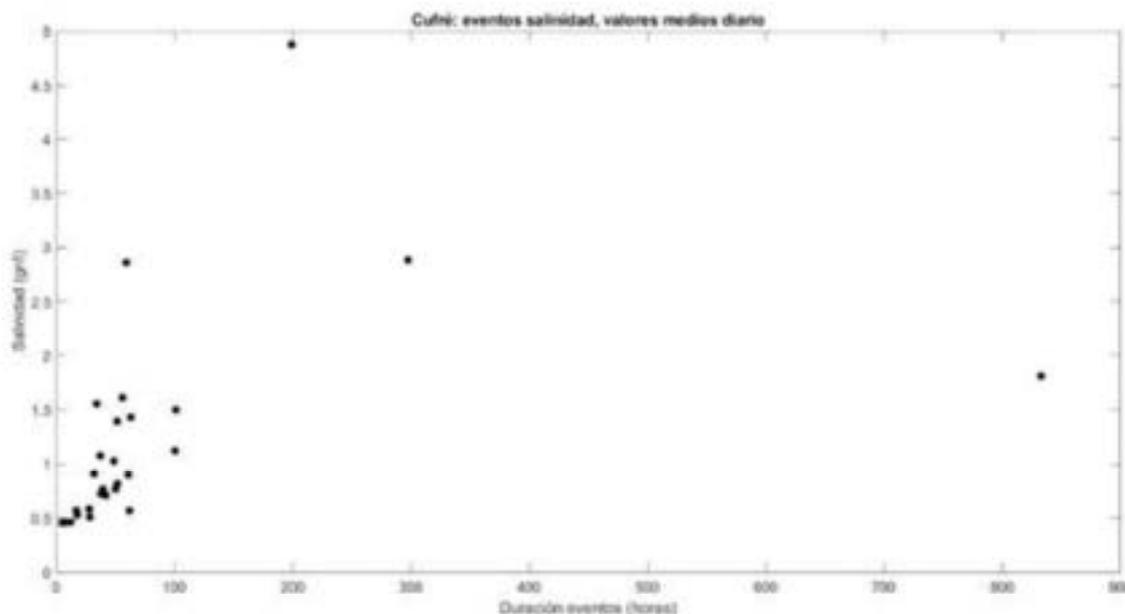


Figura 5-21: Salinidad-Duración de los eventos de salinidad en Cufré (28 años de simulación).

Respecto de la curva de frecuencia de salinidad en Cufré, se hace notar que en este punto el 99,2% del tiempo la salinidad es inferior al valor umbral, por lo tanto el 0,8% del tiempo (2,9 días/año) es superior.

A partir de la serie de valores de salinidad, se calcularon los eventos de salinidad ocurridos en el período simulado.

Cada evento es definido cuando el valor de salinidad supera el umbral establecido de 0,45g/l, y está determinado entre dos cruces sucesivos por este umbral (el primer cruce es hacia arriba y el segundo es hacia abajo). La duración del evento se calcula como el tiempo transcurrido entre el cruce hacia arriba y el cruce hacia abajo. El valor de salinidad asociado a cada evento se define como el valor máximo alcanzado en ese evento.

En la Tabla 5-4 se presentan algunos resultados de las simulaciones extendidas correspondiente al período de 28 años de simulación.

Por ejemplo, se observa que en el punto P6 correspondiente a Arazatí, hay 72 eventos de salinidad en los 28 años de simulación, mientras que en Cufré hubo 27 eventos.

Simulación: 28 años	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Numero de eventos salinidad	27	35	33	35	51	72	67
Valor maximo de salinidad (gr/l)	4.9	5.8	5.1	5.0	6.9	6.9	10.0
Salinidad percentil 95% (gr/l)	3.2	2.7	2.7	3.5	4.1	4.0	5.1
Salinidad percentil 90% (gr/l)	2.6	2.1	2.2	2.6	3.6	3.2	3.7
Salinidad percentil 50% (gr/l)	0.9	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8
Duración promedio eventos (horas)	88	81	84	84	81	76	82
Duración máxima (horas)	833	862	873	878	875	886	885
Duración percentil 95% (horas)	378	290	302	296	228	255	274
Duración percentil 90% (horas)	179	131	153	151	147	150	149
Duración mínima (horas)	5	7	1	5	1	1	3

Tabla 5-4: Resumen de resultados de la simulación extendida. P1: Cufre, P2: Pavón, P6: Arazatí.

La Tabla 5-4 presenta asimismo algunos estadísticos básicos de los eventos. Por ejemplo, se observa que la duración máxima de los eventos es menor en Cufre (833 horas) que en Arazatí (886 horas), y que el 90% de los eventos tienen una duración menor a 179 horas en Cufre y de 150 horas en Arazatí.

En la Figura 5-22 se muestra la curva de frecuencia de las duraciones de los eventos registrados en Arazatí en el período simulado. Se observa que la duración correspondiente al percentil 90% es de 150 horas, y que el 10% de los eventos tienen una duración inferior a 7,25 horas.

En la Figura 5-23 se presenta la curva de frecuencia en Cufre.

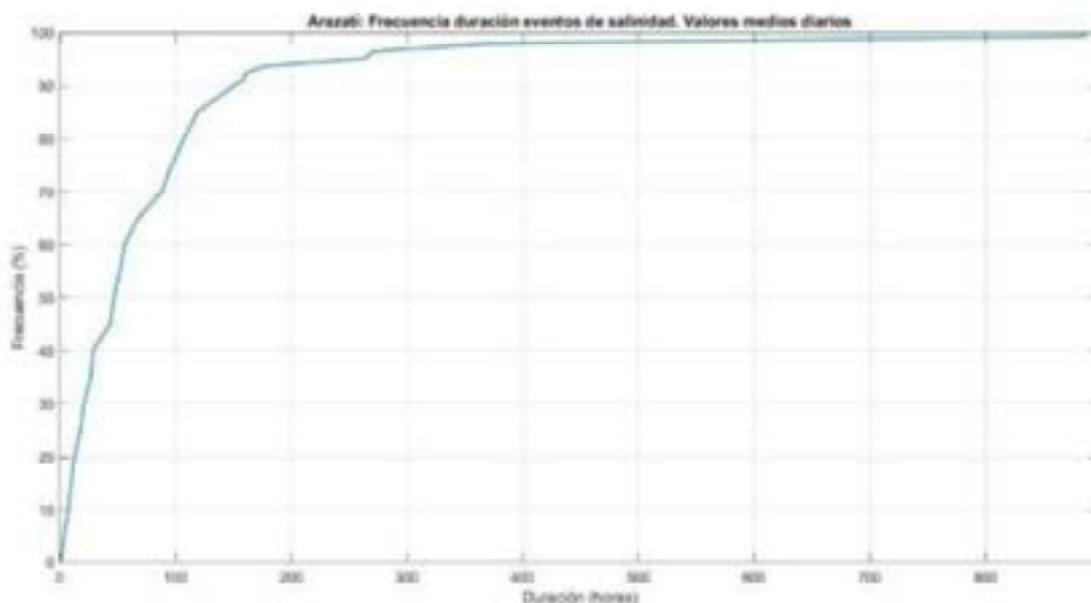


Figura 5-22: Curva de frecuencia de duración de los eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

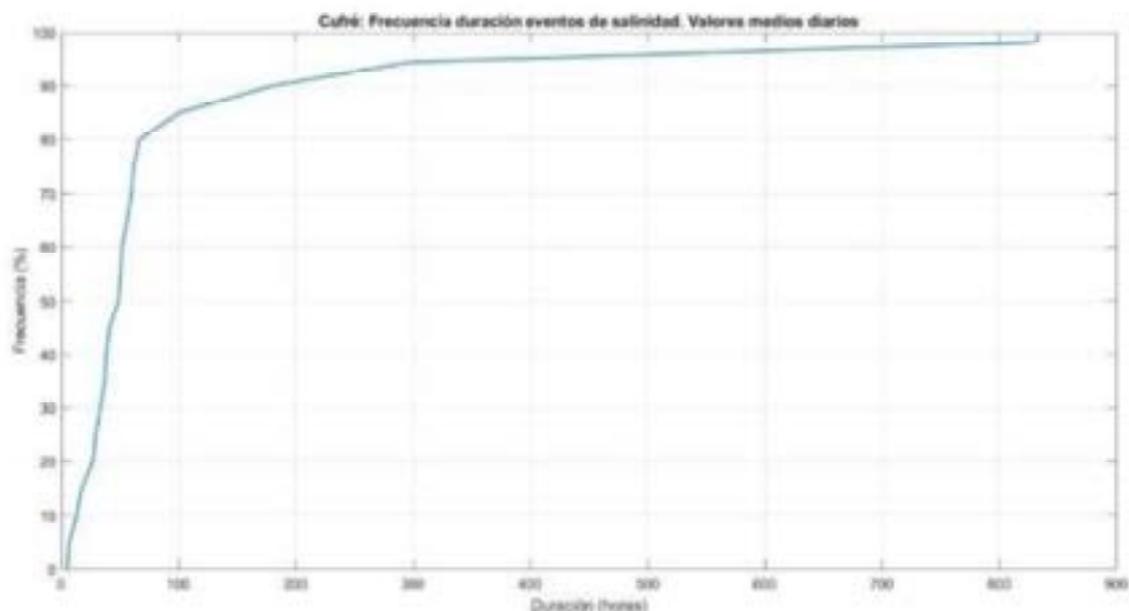


Figura 5-23: Curva de frecuencia de duración de los eventos de salinidad en Cufre (28 años de simulación).

5.6.3 Duración de eventos en Arazatí

Los 72 eventos de salinidad registrados en Arazatí se presentan en la Tabla 5-5, de los cuales hay 23 eventos que duran menos de 24 horas.

Por otra parte, en la misma tabla se presenta el lapso de tiempo transcurrido entre eventos sucesivos (expresados en horas y en días). Se observa que hay 14 eventos que ocurren en menos de 48 horas del evento anterior, por lo cual podrían asumirse que pertenecen al mismo evento meteorológico.

Asimismo, destaca un evento excepcional, el evento número de orden 68 cuya duración es de 886 horas, que ocurre en el año 2015.

No Orden	Duracion evento			Tiempo entre eventos consecutivos			No Orden	Duracion evento			Tiempo entre eventos consecutivos		
	horas	horas	días	horas	horas	días		horas	horas	días	horas	horas	días
1	23						37	27	759			31.6	
2	108	1,285	53.5				38	264	213			8.9	
3	27	3,480	145.0				39	20	1,203			50.1	
4	46	727	30.3				40	20	125			5.2	
5	50	1,298	54.1				41	4	9			0.4	
6	52	3,177	132.4				42	104	425			17.7	
7	116	4,988	207.8				43	27	1,950			81.3	
8	2	25	1.0				44	90	24,894			1037.3	
9	47	140	5.8				45	88	21			0.9	
10	93	963	40.1				46	47	2,995			124.8	
11	44	2,247	93.6				47	132	25			1.0	
12	65	10,429	434.5				48	96	619			25.8	
13	31	2,435	101.5				49	120	6,496			270.7	
14	1	3,756	156.5				50	271	1,285			53.5	
15	8	14	0.6				51	7	48			2.0	
16	18	0	0.0				52	50	692			28.8	
17	1	3,564	148.5				53	147	4,158			173.3	
18	10	22	0.9				54	27	8,596			358.2	
19	27	1,723	71.8				55	107	2,919			121.6	
20	9	4,451	185.5				56	16	21			0.9	
21	53	631	26.3				57	85	29			1.2	
22	34	4,402	183.4				58	53	649			27.0	
23	126	11,451	477.1				59	177	257			10.7	
24	111	1,511	63.0				60	56	13,598			566.6	
25	56	1,211	50.5				61	5	476			19.8	
26	83	6,069	252.9				62	71	8,149			339.5	
27	368	4,487	187.0				63	20	111			4.6	
28	3	7	0.3				64	18	118			4.9	
29	158	1	0.0				65	66	300			12.5	
30	16	1,853	77.2				66	161	16,975			707.3	
31	97	1,056	44.0				67	25	83			3.5	
32	13	17,611	733.8				68	886	139			5.8	
33	10	10	0.4				69	100	7,772			323.8	
34	37	166	6.9				70	12	429			17.9	
35	46	740	30.8				71	62	16,184			674.3	
36	9	16	0.7				72	12	12,600			525.0	

Tabla 5-5: Duración de los 72 eventos ocurridos en Arazatí (28 años de simulación).

5.6.4 Duración de los eventos del año 2015

Como se mencionó anteriormente, durante el año 2015 se observa la ocurrencia de un evento que destaca en cuanto a su duración, alcanzando las 886 horas. En la Figura 5-24 se muestra la variación temporal de la salinidad en Arazatí para el año 2015.

En la simulación de este año, se observa la ocurrencia de un primer evento cuyo pico ocurre a la hora 6461 y que dura 161 horas, seguido de un segundo evento menor a la hora 6635, y luego un tercer evento con pico a la hora 6926 y que dura 886 horas.

Este evento claramente destaca entre todos los eventos determinados en la simulación extendida.

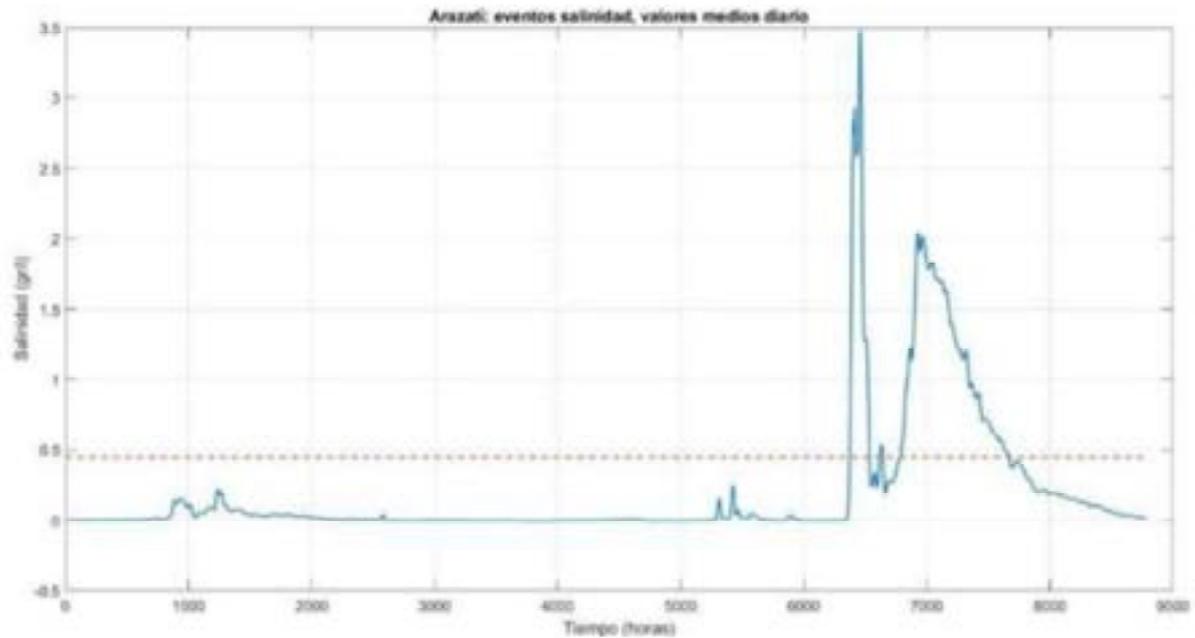


Figura 5-24: Variación de la salinidad en Arazatí año 2015.

La simulación del año 2015 fue realizada considerando caudales fluviales del año 2006, cuya serie presenta el menor valor de caudal promedio de los años considerados. La alta duración del evento está vinculada a que la pluma salina permanece en la zona superior del Río de la Plata frente a la zona de Arazatí retornando hacia el océano en forma muy lenta.

En los 28 años de simulaciones se detectaron varios casos con eventos consecutivos. Sin embargo, este año 2015 se destaca por la alta permanencia del tercer evento.

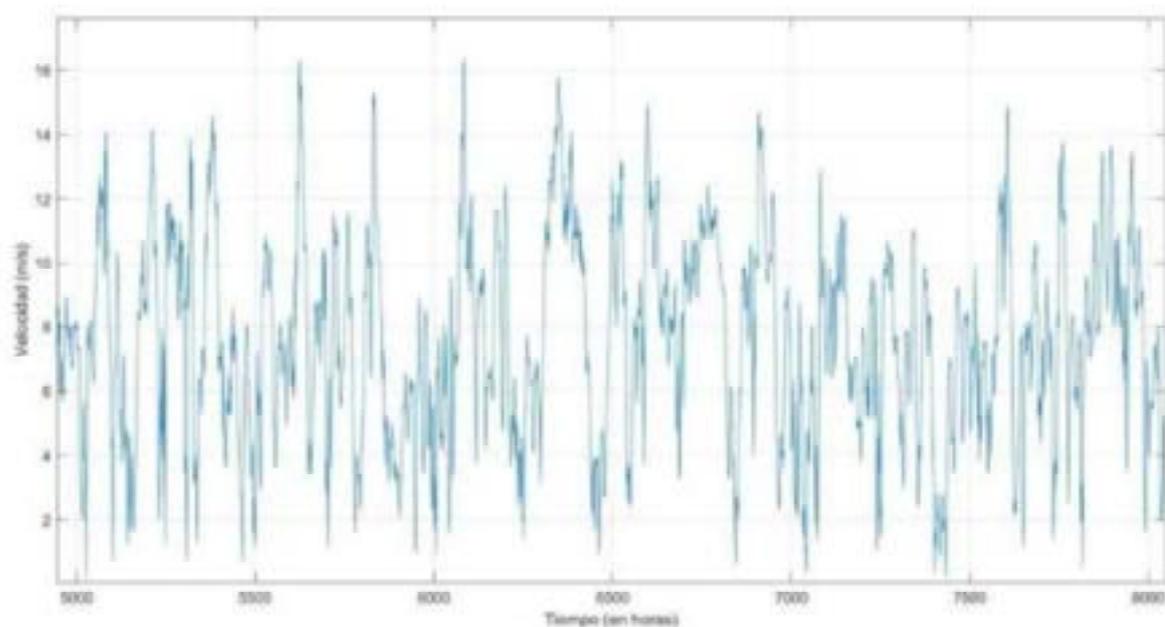


Figura 5-25: Variación temporal intensidad de viento año 2015.

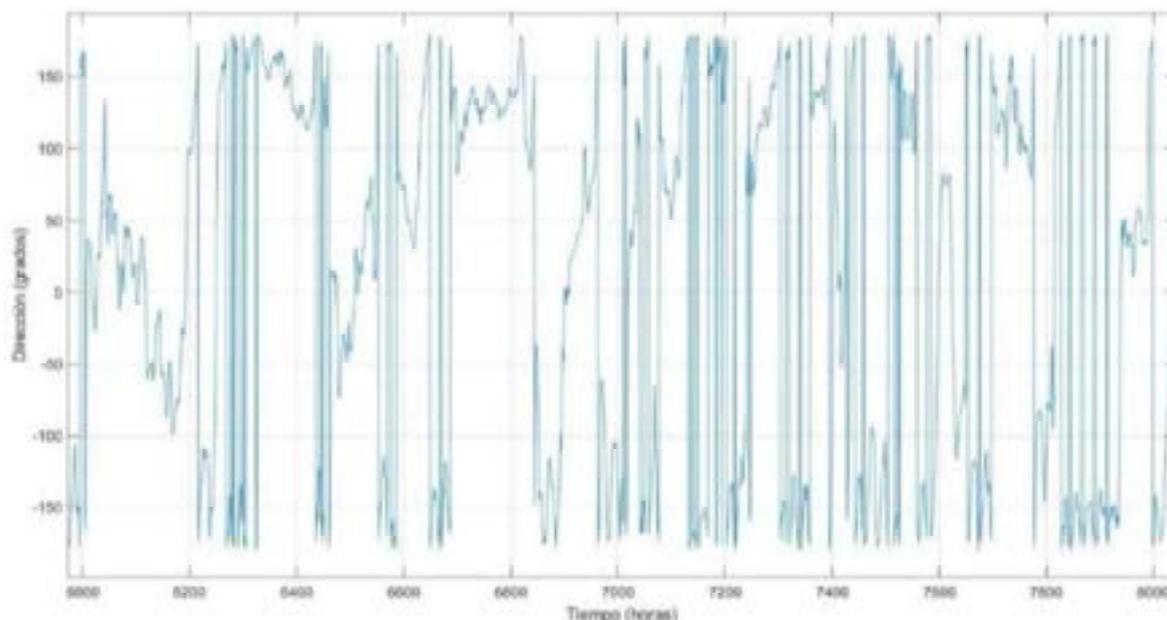


Figura 5-26: Variación temporal de la dirección del viento año 2015.

En la Figura 5-25 se observa que luego de ocurrido el tercer evento con pico a la hora 6926, la intensidad de la velocidad del viento es del orden de 10m/s (variando entre 8m/s y 12,5m/s), valores moderados que no explican por si solos la alta duración del evento.

Sin embargo, de la Figura 5-26, se observa que la dirección del viento tiene una permanencia muy elevada con direcciones que varían entre -150 grados (vientos del ENE) y +150 grados (vientos del ESE). Entre las horas 7000 y 7900 el viento se mantiene proveniente del sector Este. Una vez que es posicionada la pluma salina en la zona de Arazatí durante el primer evento salino, luego la permanencia del viento soplando del Este enlentece el desplazamiento de la pluma hacia el exterior.

En consecuencia, en esta simulación del año 2015 coinciden 3 factores importantes: la ocurrencia de eventos consecutivos, la ocurrencia de vientos moderados con una muy alta permanencia del Este, y simultáneamente la ocurrencia de caudales bajos de los ríos Paraná y Uruguay.

Con el objeto de analizar con mayor detalle este fenómeno, se realizaron 3 simulaciones adicionales manteniendo los mismos vientos, pero variando los forzantes de niveles y los caudales fluviales.

Las simulaciones adicionales fueron realizadas considerando:

- Nivel del año 2004, Caudal año 2004 (escenario caudal bajo).
- Nivel del año 2004, Caudal año 2001 (escenario caudal medio).

- Nivel del año 2004, Caudal año 2007 (escenario caudal medio).

En la Figura 5-27 se presentan los resultados de la simulación, considerando un segundo escenario de caudal bajo.

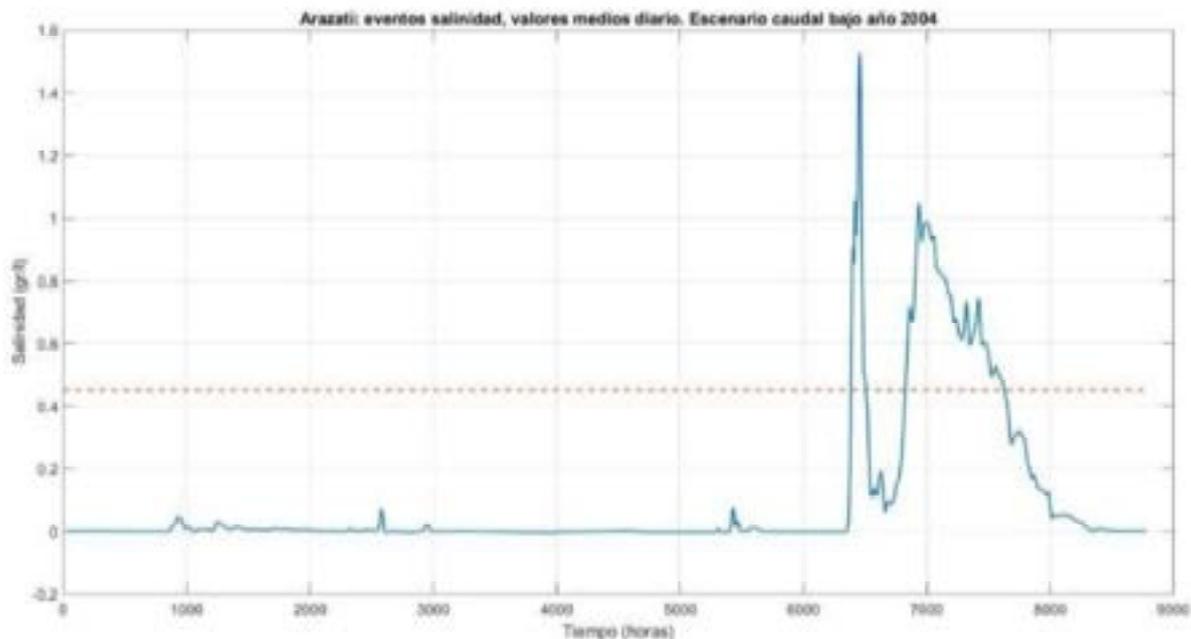


Figura 5-27: Variación de la salinidad en Arazatí año 2015 (Nivel año 2004, caudal año 2004).

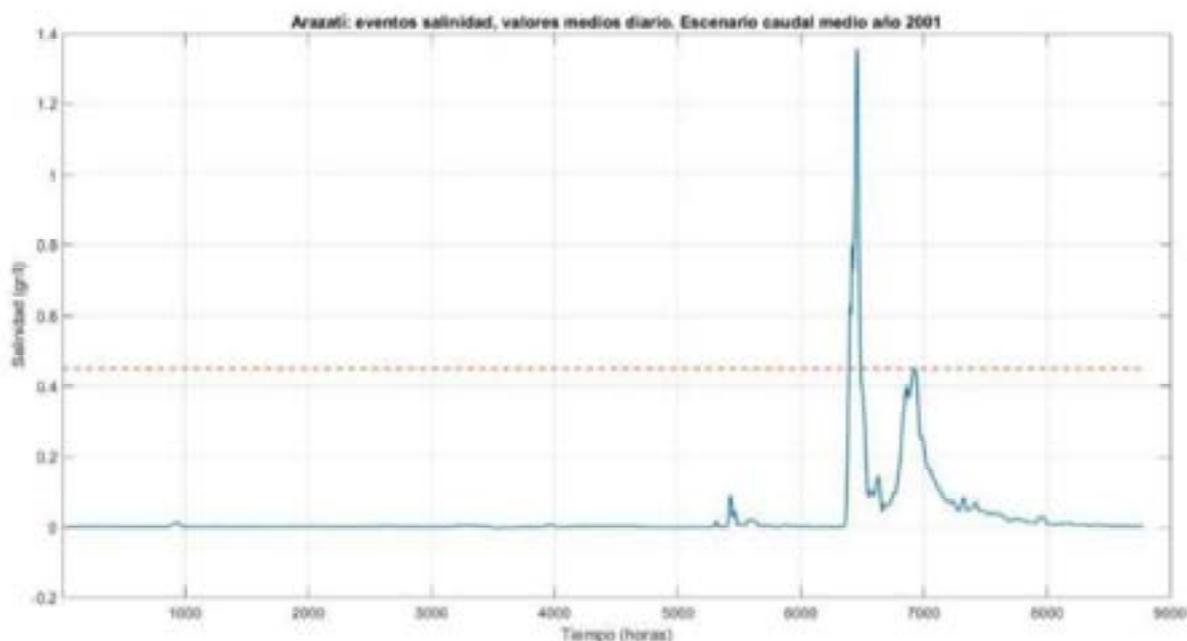


Figura 5-28: Variación de la salinidad en Arazatí año 2015 (Nivel año 2004, caudal año 2001).

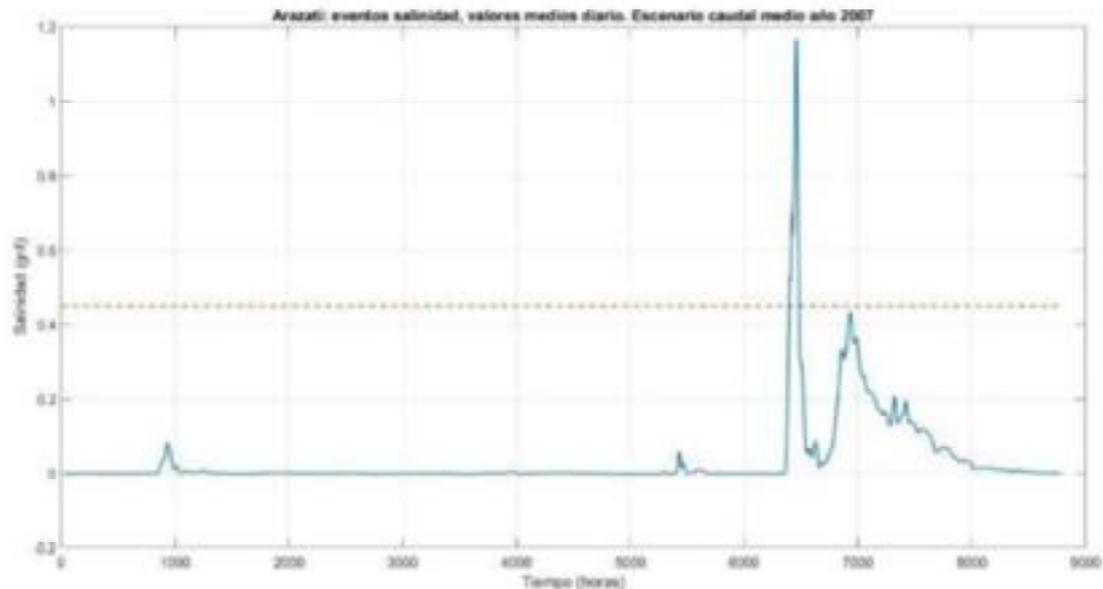


Figura 5-29: Variación de la salinidad en Arazatí año 2015 (Nivel año 2004, caudal año 2007).

Se observa que mientras que en todas las simulaciones se detecta la ocurrencia del primer evento, el segundo y tercer evento están condicionados por los caudales fluviales. En condición de caudales bajos el tercer evento es muy significativo, mientras que en condición de caudal medio ese evento no es observable.

En consecuencia, podemos asumir que al menos el 50% del tiempo en el cual los caudales superan el valor medio de aportes, no van a ocurrir eventos de esa naturaleza.

En el otro 50% del tiempo correspondiente a caudales menores al caudal medio, en efecto, tales eventos de salinidad sí pueden ocurrir. Evidentemente habrá un rango de caudales menores al caudal medio en los cuales la duración de ese evento será del orden de otros eventos que ocurrieron en otros años, y para caudales próximos al percentil 25% (caudales bajos) pueden ocurrir eventos de esa duración más extensa.

Por lo tanto, si el evento de viento ocurre con frecuencia cada 28 años, y si elegimos un percentil de caudales de aportes intermedios entre 50% y 25%, a partir del cual el evento es de larga duración, asumido en 33%, entonces la probabilidad combinada de ocurrencia de tal evento, sería estimada como producto de probabilidades $1/28 * 1/3$, o sea de una vez cada 84 años.

5.6.5 Duración de eventos extremos en Arazatí

A partir de esta serie de valores de duración de los eventos de salinidad, se excluye inicialmente el evento extremo del año 2015 y se procede a realizar un análisis estadístico de la serie observada.

Primeramente, se agruparon la duración de los eventos que ocurrieron en intervalos de tiempo menores a 32 días. Luego, se seleccionaron los 28 eventos de mayor duración para efectuar el análisis de valores extremos.

A dicha serie de datos, se le ajustó la función de distribución de extremos generalizada (GEV) que fue la que mejor ajuste presentaba.

En la Figura 5-30 se muestra el ajuste de la distribución, mientras que en la Figura 5-31 se presenta la curva de duración del evento para diferentes períodos de retorno.

Los parámetros de la GEV son:

$$k = 0.695921 [0.158978, 1.23286]$$

$$\sigma = 1.88859 [1.15711, 3.08248]$$

$$\mu = 3.49799 [2.62842, 4.36757]$$

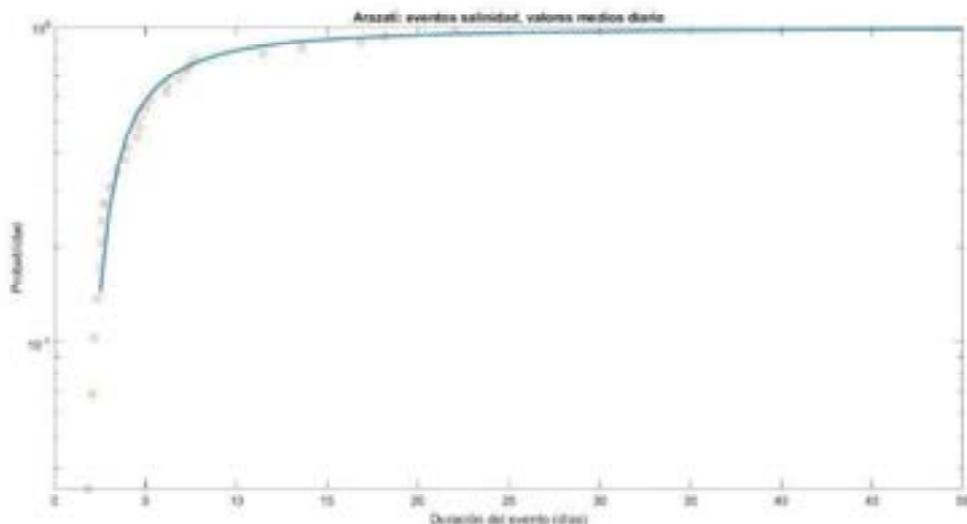


Figura 5-30: Curva de densidad de probabilidades GEV para la duración de los eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

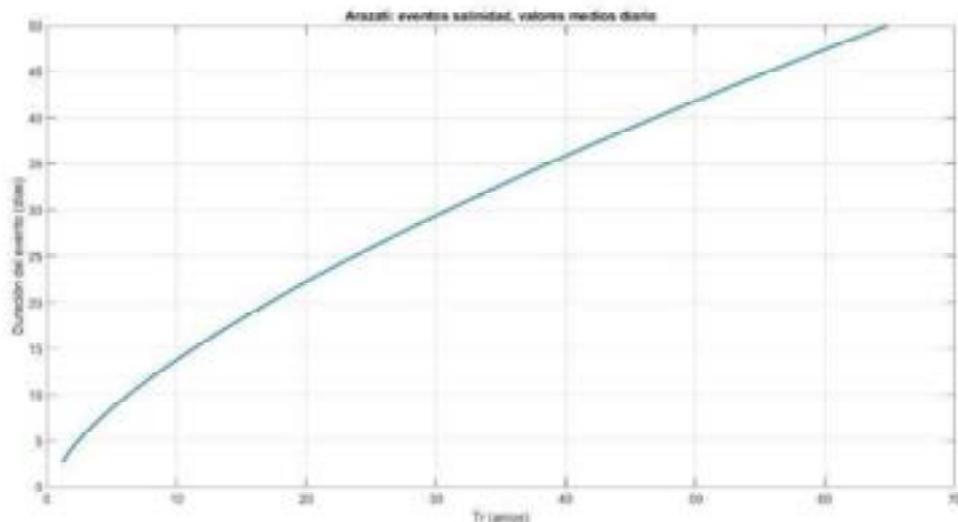


Figura 5-31: Curva de Periodo de Retorno T_r (años) para la duración de los eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

Se observa que al período de retorno $TR=30$ años le corresponde una duración de evento de 29,5 días, y para $TR=50$ años le corresponde uno de 42 días.

Adicionalmente, se realizó en forma análoga un análisis de extremos de duración mínima de intervalos de tiempo entre eventos, considerando los tiempos entre eventos superiores a 32 días. La Figura 5-32 muestra el ajuste de la densidad de probabilidad GEV y la Figura 5-33 el tiempo entre eventos para diferentes períodos de retorno.

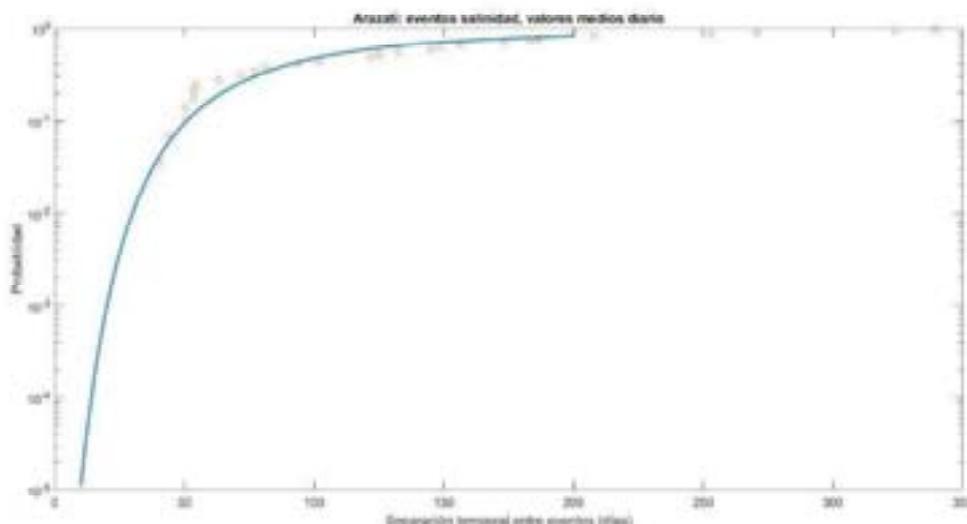


Figura 5-32: Curva de densidad de probabilidades GEV para los intervalos de tiempo entre eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

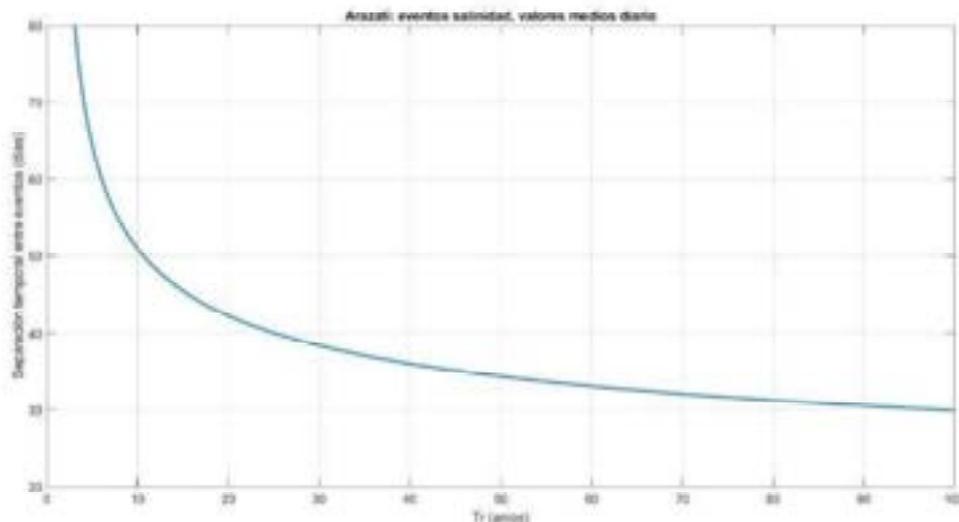


Figura 5-33: Curva de Período de Retorno T_r (años) de mínimos para el intervalo de tiempo entre eventos de salinidad en Arazatí (28 años de simulación).

Se observa que el intervalo de tiempo entre eventos con período de retorno $TR=50$ años es de 34 días.

5.7 Conclusiones

En Arazatí, aproximadamente el 97,5% del tiempo la salinidad es inferior a 0,45g/l, por lo cual el 2,5% del tiempo (9,1 días al año) la salinidad es superior. Ocurrieron 72 eventos de salinidad en los 28 años de simulación, lo cual significa en promedio 2,5 eventos por año.

Respecto a la duración de los eventos, en la Figura 5-22 se muestra la curva de frecuencia de las duraciones de los eventos registrados en Arazatí en el período simulado. La duración correspondiente al percentil 90% es de 150 horas, en tanto el 10% de los eventos tienen una duración inferior a 7,25 horas.

El ajuste de la distribución de extremos de duración de los eventos salinos en Arazatí permite estimar que el evento de duración de 42 días tiene asociado un período de retorno de aproximadamente 50 años.

Asimismo, se observa que al período de retorno de $TR=50$ años le corresponde un período de tiempo mínimo entre eventos de 34 días.

Asimismo, dentro de la serie modeladas de 28 años se registra un evento extremo en duración e intensidad (2015) cuyo tiempo de recurrencia estimado es de 84 años.

A partir de estos resultados en Capítulo 6.5 se procede al dimensionado de la reserva de agua dulce.

5.8 Nueva implementación y calibración del modelo de salinidad

Como fuera oportunamente mencionado, se fondeó el sensor de salinidad el 08/06/2021 y se comenzaron las campañas de extracción de datos (observaciones continuas entre junio y diciembre 2021). En los Anexos 11.3 se presentan los informes correspondientes de las campañas de colecta y análisis de datos.

En base a la nueva información disponible, se procedió a desarrollar una nueva implementación del modelo y su calibración, de acuerdo a lo que se detalla en los puntos siguientes.

5.8.1 Modificación del modelo

El modelo del Río de la Plata (RP) fue modificado, colocando la frontera oceánica próximo a la línea PTE-San Clemente, lo cual permitió reducir el dominio de cálculo:

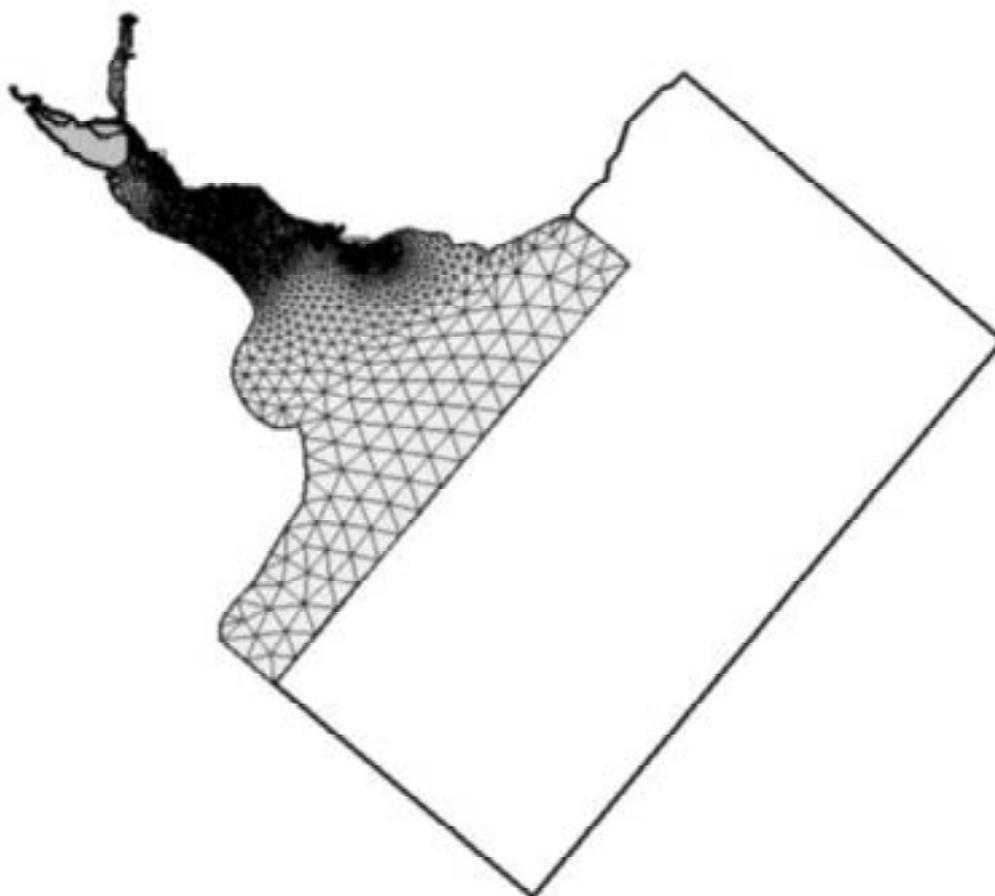


Figura 5-34: nueva frontera y malla de cálculo (se muestra el borde del modelo anterior).

Asimismo, la ubicación de la frontera oceánica a una zona menos profunda permite acoplar el modelo del RP con otro modelo oceánico global (que se llama Copernicus)

que suministra las condiciones de nivel de marea meteorológica y de salinidad en toda la frontera del modelo del RP. A estos valores de niveles de marea meteorológica se le suma a marea astronómica calculada con otro modelo oceánico solo de marea que se llama FES2014. De esta forma, las condiciones de borde en la frontera oceánica son muy superiores a las que usaba anteriormente, donde se asumía salinidad constante en el borde oceánico (esta información solo existe para los años 2018 a 2021).

Respecto de los vientos, se sigue utilizando los resultados de modelo denominado ERA5 de la ECMFW. Los datos de vientos de ERA5 fueron ajustados para las 8 direcciones de la rosa de vientos con 5 años de datos medidos de Pontón Recalada. Adicionalmente se realizó otro ajuste especialmente para las direcciones del N-NE-E, de forma de ajustar las salinidades del modelo a las mediciones del CTD.

Se dispuso de las mediciones continuas entre junio y diciembre 2021 para la revisión de la calibración.

5.8.2 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos con la nueva implementación y calibración se muestran en la Figura 5-35.

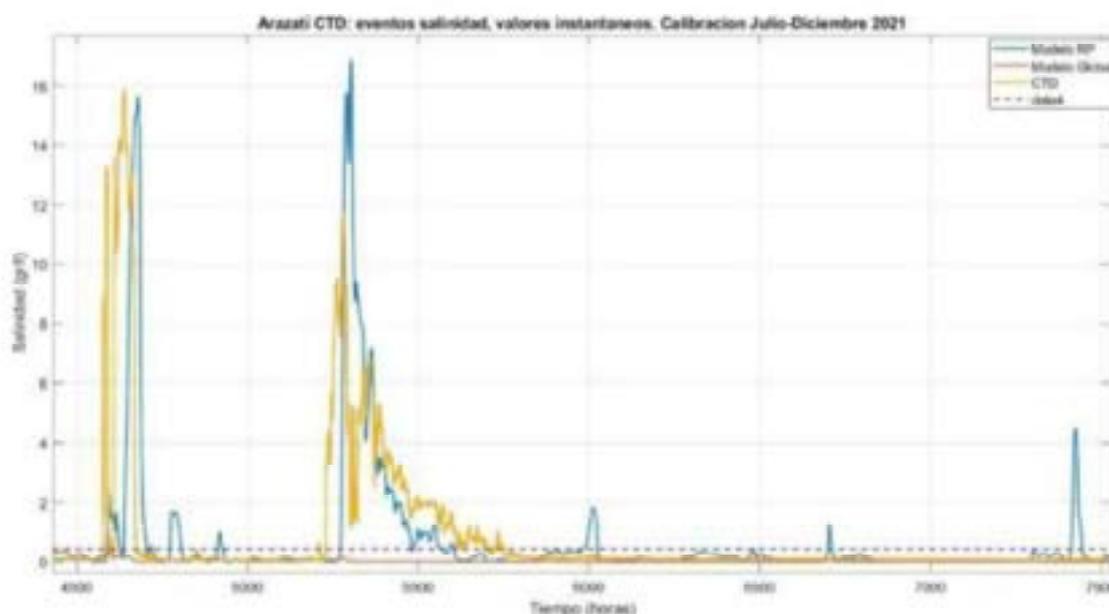


Figura 5-35: Resultado de la calibración julio-diciembre 2021

Con el objeto de analizar el comportamiento de la salinidad con la nueva implementación y calibración, se realizaron simulaciones en los siguientes 3 escenarios, con diferentes períodos de retorno (TR) según los eventos forzantes (aportes fluviales Q, vientos y niveles de océano):

- Vientos año 2015 con Caudal 2006 (percentil 25%) y niveles 2019, (evento crítico de la simulación extendida anterior – Q25%, TR > 84 años).
- Vientos año 2015, con Caudal 2007 (percentil 50%) y niveles 2019, (Qmedio, TR > 14 años).
- Vientos año 2021, con Caudal 2021 (percentil 1%, bajante histórica) y niveles 2021 (Qmin TR > 90 años).

Los resultados en forma de planilla se muestran en la Tabla 5-6. En esta tabla, se muestran en las primeras 2 columnas los resultados de duración de cada evento, y del lapso de tiempo transcurrido entre eventos consecutivos. En la tercera columna, se presenta el resultado de un balance a nivel días de disponibilidad, en las siguientes condiciones:

- Extracción a Qmax= 229.000 m³/d (condición de fin de período 2045)
- Reposición al 25% de Qmax en períodos de salinidad de RDLP admisible
- Volumen de polder: 9,3 Hm³ (aprox. 40 días de consumo)

Calibración original. Caudal bajo perc 25%			Año 2015						Año 2021		
			Cal 3 Q2006 Niv 2019 Wnd 2015 (Q 25%)			Cal 3 Q2007 Niv 2019 Wnd 2015 (Q medio)			Cal 3 Q2021 Niv 2021 Wnd 2021		
Duración evento (días)	Lag entre eventos (días)	Nro de días disponibles (días)	Duración evento (días)	Lag entre eventos (días)	Nro de días disponibles (días)	Duración evento (días)	Lag entre eventos (días)	Nro de días disponibles (días)	Duración evento (días)	Lag entre eventos (días)	Nro de días disponibles (días)
		40			40			40			40
6.71		33.29	0.77		39.23	1.18		38.82	0.69		39.31
1.02	3.47	33.14	2.88	9.86	37.13	2.11	158.74	37.89	12.20	2.10	27.64
36.93	5.80	-2.34	3.90	1.41	33.58	1.42	4.40	37.57	1.10	34.17	35.08
			0.92	2.74	33.35	1.31	1.29	36.58	1.73	21.92	38.27
44.66			1.76	37.65	38.24	0.40	10.70	38.86	1.17	0.13	37.14
			1.06	0.26	37.24	3.32	11.07	36.68	1.35	8.39	37.88
			1.69	27.83	38.31	5.84	17.27	34.16	29.39	1.01	8.74
			2.85	45.80	37.15	4.24	11.84	32.88	8.77	23.26	5.79
			4.25	5.49	34.27	1.60	1.00	31.52	1.27	2.82	5.22
			2.46	23.89	37.54	1.46	1.55	30.45	1.24	13.03	7.24
			3.97	2.03	34.08	1.31	6.38	30.73	3.02	0.65	4.38
			2.02	0.66	32.22	1.71	31.05	36.79	1.57	2.68	3.48
			1.90	3.05	31.09				9.00	19.10	-0.74
			2.76	4.51	29.46				3.13	0.19	-3.82
			0.99	2.25	29.03				1.75	17.66	-1.16
			4.75	5.78	25.73				1.44	57.48	11.77
			7.30	15.98	22.42	TR > 14 años			1.96	5.61	11.22
			15.78	2.38	7.23				4.96	1.60	6.66
			12.99	0.13	-5.73				1.66	1.66	5.42
			1.75	1.59	-7.08				16.88	1.38	-11.11
			0.35	3.19	-6.64						
			2.68	20.53	-4.18				104.26		
			79.77								
			TR > 84 años						TR > 90 años		

Tabla 5-6: resultados de la nueva calibración

5.9 Conclusiones de la nueva calibración

- La nueva implementación y calibración del modelo, reprodujo muy bien los 2 eventos significativos registrados por el sensor continuo (con algo más de ruido) durante el 2021.
- El escenario extremo de diseño de la calibración anterior (caudales medios a bajos, vientos 2015) arroja resultados similares a los de la nueva calibración: requerimiento de reserva de 42,5 y 47 días (déficits acumulados de 2,5 y 7 días) respectivamente (escenario con TR>84 años).
- Cuando se consideran caudales de aportes fluviales medios con vientos extremos (2015), (escenarios con TR>14 años), el volumen máximo de agua dulce consumido de la reserva (polder) es del orden del 25% del volumen total (más de 30 días de reserva remanente).
- Para el escenario del año 2021 (aportes fluviales mínimos históricos y clima marítimo moderado, escenario con TR> 90 años), el déficit de reserva proyectado es de 11 días.
- **Puede estimarse que el dimensionado propuesto de la reserva (polder) atiende escenarios (clima marítimo-aportes fluviales) con TR superiores a 50 años.**

5.10 Actualización de información relevante

5.10.1 Introducción

El presente subcapítulo expone y analiza el evento extraordinario de salinidad observado durante el primer trimestre del 2022 y recientemente relevado en la sonda multiparámetro.

En efecto, con fecha 24 de marzo pasado, al momento del cierre de la actual revisión del Informe Final, se recibieron los datos registrados por la sonda multi-parámetro ubicada en el punto de captación (Arazatí) y correspondientes al período entre el 02/01/2021 y el día 9/03/2022. En función de haberse observado valores de salinidad por encima del límite aceptable durante dicho período, procedió un análisis particular extraordinario y su incorporación en el presente capítulo a fin de confirmar los supuestos alcanzados por los estudios realizados hasta el presente.

Se procede entonces en este capítulo a presentar los datos de salinidad observados en el período reciente en cuestión y luego a realizar luego un análisis de su génesis, considerando correlación directa con los datos de aportes de caudales diarios reales en el período para los afluentes Paraná y Uruguay. En virtud de la fuerte correlación observada entre ambos eventos (salinidad y aportes fluviales extremadamente bajos), y a la ya verificada influencia del forzante aportes fluviales para el modelo calibrado de salinidad en Arazatí, se procedió a estimar el tiempo de recurrencia de ocurrencia de dicho fenómeno hidrológico de estiaje extremo para los principales cursos afluentes (ríos Paraná y Uruguay), y por consecuencia una cuantificación de riesgo de ocurrencia de tales eventos de salinidad debidos a condiciones extremas de estiaje para los afluentes citados.

Como se puede observar en la Figura 5-36, se detectó durante el período señalado un evento importante de salinidad sostenida en el período monitoreado, con una duración estimada de aproximadamente 66 días. Dicho evento se encuentra fuertemente condicionado por la forzante del modelo de salinidad en el estuario del Río de la Plata debido al aporte extremadamente bajos de sus afluentes principales, ríos Paraná y Uruguay en el mismo período.

En efecto, en base a esta correlación directa, se presenta en los capítulos siguientes, un análisis justificativo del carácter absolutamente excepcional en cuanto a la ocurrencia de caudales mínimos observados en los Ríos Paraná y Uruguay, valorada en términos de su período de retorno; así como una interpretación de su efecto en los valores de salinidad con base a la modelación de salinidad desarrollada hasta el momento.

5.10.2 Registros de salinidad de la sonda multiparámetro en zona de captación

La siguiente Figura 5-36, muestra el conjunto de mediciones de salinidad realizadas por la sonda continua en el punto de captación (Arazatí), para el período de medición comprendido entre el 08/06/2021 y el 09/03/2022 abarcando un total de prácticamente 10 meses continuos.

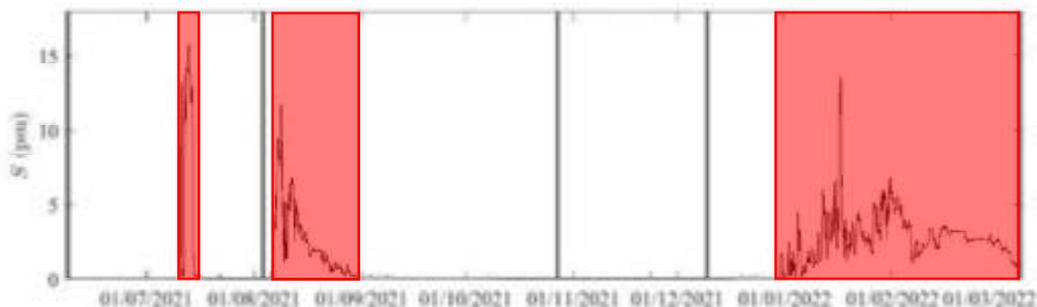


Figura 5-36: Serie de salinidad del agua a 0,50 m del lecho (1 PSU = ppm). Las líneas verticales indican las visitas de mantenimiento.

Durante el período citado, se registraron tres episodios de salinidad de distinta magnitud y comportamiento (los dos primeros han sido modelados según fue detallado en subcapítulos anteriores y el tercer período, objeto del presente análisis con duración estimada de 66 días).

- Primero: 10/07/2021 al 14/07/2021.
- Segundo: 06/08/2021 al 28/08/2021.
- Tercero: 02/01/2022 al 09/03/2022 (último registro).

Los eventos de salinidad observados en el período total, y particularmente en el tercer período citado, resultan ser totalmente excepcionales en el contexto de datos históricos de caudales fluviales de los afluentes principales ríos Paraná y Uruguay, y asimismo teniendo en consideración la modelación realizada para períodos prolongados en función de los forzantes históricos de vientos y caudales de afluentes expuesta en subcapítulos anteriores.

Es justamente este último forzante de aportes fluviales afluentes, el que registra condiciones de estiaje histórico, con caudales observados extremadamente bajos asociados a tiempos de recurrencia muy superiores a 50 años, lo que provoca consecuentemente los fenómenos extraordinarios de salinidad observados y que se analizan a continuación en forma exhaustiva.

5.10.3 Situación hidrológica presente

Los dos principales cursos de agua que conforman la Cuenca del Plata son el río Paraná y el río Uruguay.

El río Paraná presenta un caudal medio de 17.500 m³/s mientras que el Río Uruguay presenta un caudal medio de 5.500 m³/s, con lo cual el aporte medio conjunto de ambos afluentes se estima en 22.300 m³/s.



Figura 5-37: Cuenca del Plata y sus Centrales Hidroeléctricas de más de 100 MW de Potencia (Fuente: Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata – CIC).

El área de la cuenca del Río de la Plata es de 3:100.000 km², siendo la quinta en superficie nivel mundial, involucrando parte de los territorios de Uruguay, Argentina, Brasil, Bolivia y Paraguay.

Es de público conocimiento que actualmente, y desde marzo de 2021, el río Paraná presenta una bajante extraordinaria, sin registros semejantes desde 1970, y solo superados en la bajante histórica del año 1944. Cabe destacar que a partir de 1970 hubo una fuerte expansión del sector hidroeléctrico, principalmente en los cursos superiores del Paraná y sus afluentes básicamente en territorio de Brasil, que contribuyeron a amortiguar los valores de estiaje en función de su capacidad de regulación.

Algo similar está ocurriendo con el río Uruguay, donde los caudales medios erogados en enero del 2022 en la Central de Salto Grande, fueron los mínimos registrados en los últimos 40 años, y han obligado a operar cerca de los niveles mínimos operativos de la represa (cota + 30 m).

5.10.4 Correlación del estiaje fluvial de afluentes frente a niveles de salinidad medidos en Arazatí

En la siguientes Figuras, se presentan los registros de niveles para el río Paraná en la ciudad de Rosario y para el río Uruguay en Puerto de Concordia, indicando conjuntamente (coloración roja) los episodios de salinidad detectados en la sonda multiparámetro de Arazatí (según se explica en 5.10.2).



Figura 5-38: Historial de Alturas Hidrométricas en la Ciudad de Rosario (río Paraná). Período Abril 2021 a Abril 2022 (Fuente: Prefectura Naval Argentina).

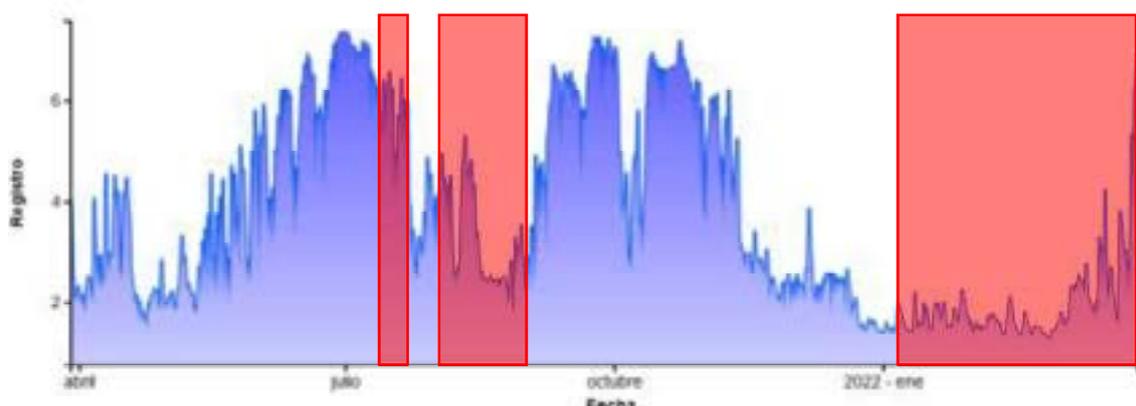


Figura 5-39: Historial de Alturas Hidrométricas en el Puerto de Concordia (río Uruguay). Período Abril 2021 a Abril 2022 (Fuente: CARU).

Como puede observarse, los primeros dos episodios de salinidad observados en Arazatí durante julio/agosto del 2021, se encuentran comprendidos en una primera ventana temporal de bajante extraordinario de los afluentes fluviales, con registros limnimétricos (cero local) en el orden de -0,30m para el río Paraná en Rosario (período comprendido entre julio y setiembre de 2021), y para el río Uruguay en Concordia una bajante con niveles aproximados de 2,00m (período comprendido entre agosto y setiembre del mismo año).

El tercer período de salinidad (enero-febrero 2022), también se encuentra asociado a una segunda ventana temporal de bajantes extraordinarias de ambos cursos de agua con niveles de escalas limnimétricas locales inferiores a 0,00 m para Rosarios e inferiores a 1,5 m para Concordia (período comprendido entre enero y marzo del 2022).

5.10.5 Valoración del estiaje fluvial en ríos Paraná y Uruguay

5.10.5.1 *Estimación de Caudales*

Río Paraná en Rosario

Se presenta a continuación los registros mínimos observados para el río Paraná en Rosario dentro de los dos períodos ventana antes indicados:

- Nivel mínimo en Rosario de -0,33 m, registrado el 20 de agosto de 2021.
- Nivel mínimo en Rosario de -0,49 m, registrado el 13 de enero de 2022.

A través de la siguiente curva de aforo para el Río Paraná en la Ciudad de Rosario se han estimado los caudales mínimos asociados a dichos niveles.

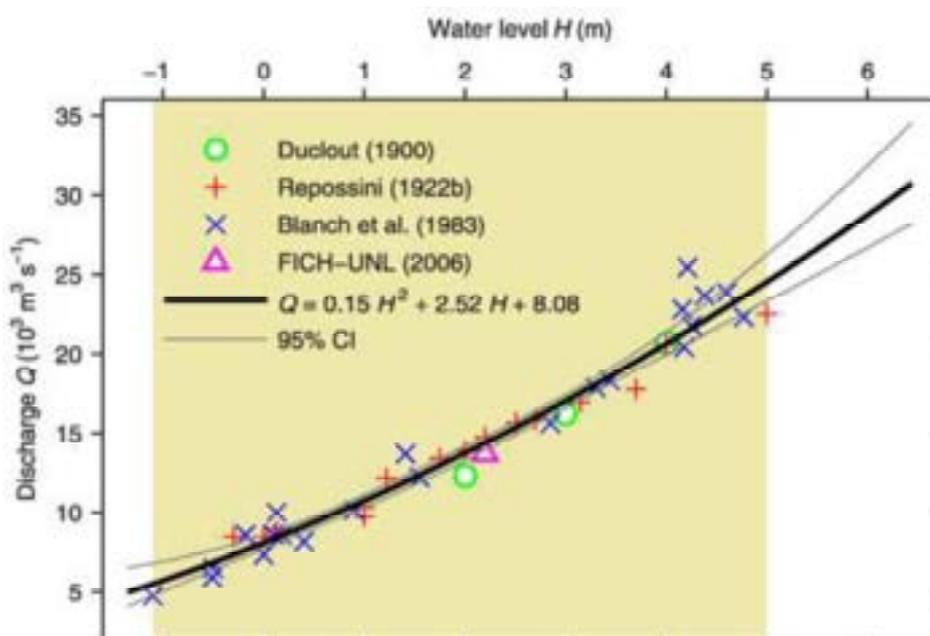


Figura 5-40: Curva de Aforo del Río Paraná en Rosario (Fuente: Antico et al, 2018⁴).

Tabla 5-7: Estimación de caudal del río Paraná en Rosario para los mínimos registrados en las dos ventanas de bajantes.

Registro	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)
20/08/2021	-0,33	6.881
13/01/2022	-0,49	7.260

Estos valores son consistentes con la serie de caudales diarios registrados en el río Paraná durante 2021 (entrada al Río de la Plata).

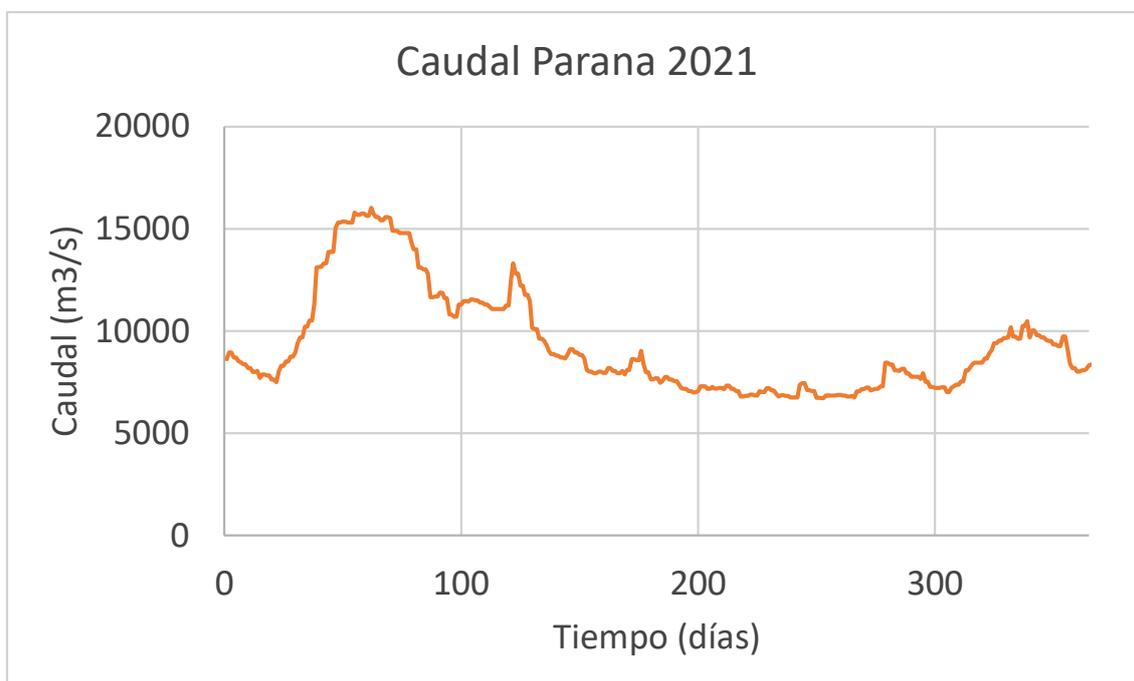


Figura 5-41: Caudales diarios registrados en río Paraná en 2021 (Fuente: Elaboración Ph.D. Ismael Piedracueva).

Río Uruguay en Concordia

Se presenta a continuación los registros mínimos observados en el río Uruguay, estación Concordia, dentro de los dos períodos ventana antes indicados:

- Nivel mínimo en Concordia de 0,78 m, registrado el 28 de agosto de 2021.
- Nivel mínimo en Concordia de 0,20 m, registrado el 27 de febrero de 2022.

⁴ Antico, A., Aguiar, R. O., & Amsler, M. L. (2018). Hydrometric data rescue in the Paraná River basin. *Water Resources Research*, 54, 1368– 1381.

A través de la siguiente curva de aforo para el Río Uruguay en la Ciudad de Concordia⁵ se han estimado los caudales mínimos asociados a dichos niveles.

$$Q(h) = 177.66 \cdot (h + 1.00)^{0.22} \quad h \leq -0.329m$$

$$Q(h) = 299.35 \cdot (h + 1.00)^{1.52} \quad h \leq 3.04m$$

$$Q(h) = 227.26 \cdot (h + 1.00)^{1.72} \quad h > 3.04m$$

Tabla 5-8: Estimación de caudal del río Uruguay en Concordia para los mínimos registrados en las dos ventanas de bajantes.

Registro	Nivel (m)	Caudal (m ³ /s)
28/08/2021	0,78 local (2,76 m Wharton)	720
27/02/2022	0,20 local (2,18 Wharton) *	395

(*): coincide con el registro mínimo de nivel aguas arriba de la represa (sin vertido) correspondiente a un valor de 30,80 m.

CTM Salto Grande define como regla de operación las siguientes consignas:

- 600 m³/s al Mínimo Caudal Aguas Abajo que permite atender las necesidades de la navegación.
- 400 m³/s Mínimo Caudal Aguas Abajo que permite atender las necesidades de agua potable de las poblaciones aguas abajo.

Según se habría informado la captación de la Planta Potabilizadora para la ciudad de Concordia quedó inoperativa en este período de tiempo debido a la bajante extraordinaria observada en el río Uruguay.

5.10.5.2 Período de retorno asociado a eventos de estiaje

Río Paraná en Rosario

Se presenta a continuación un gráfico con los niveles mínimos anuales registrados en el río Paraná, sección Puerto de Rosario, durante el período 1884 a 2020 a los efectos de ilustrar la recurrencia y evolución de estos valores extremos en el tiempo.

⁵ Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay, Informe INA-LHA 05-216-02 Jaime P., Menéndez A. N. Comitente: Proyecto Freplata. Julio 2002.

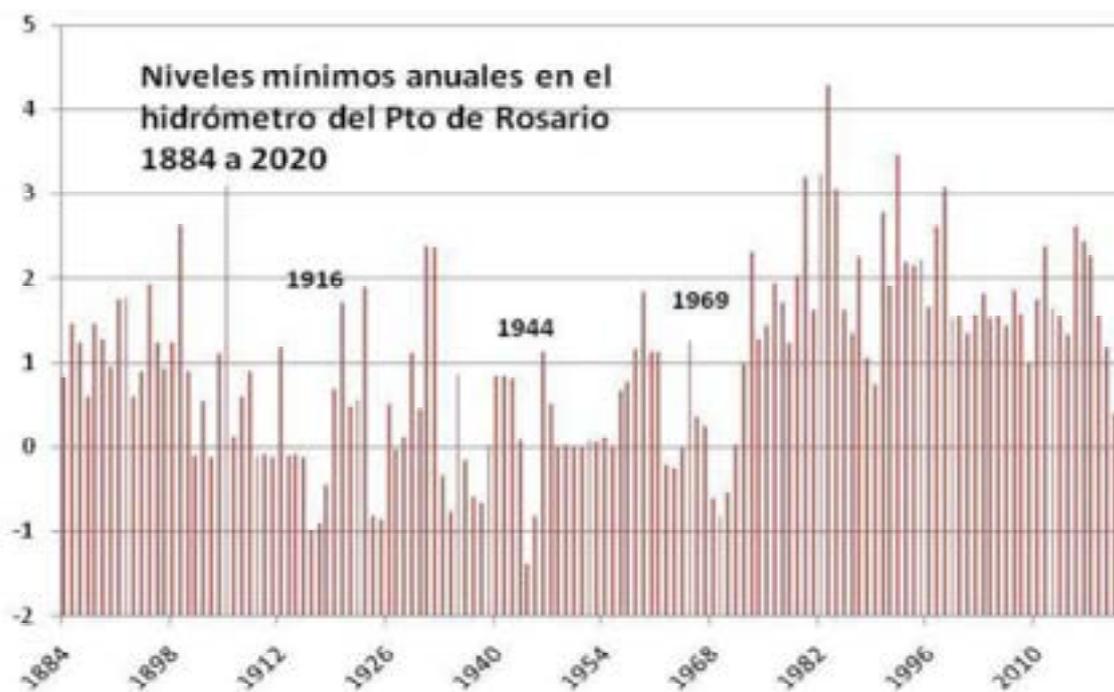


Figura 5-42: Niveles mínimos anuales en Puerto de Rosario (Fuente: Bolsa de Comercio de Rosario).

Cabe destacar que, a partir de los años 70, fueron construidas decenas de represas principalmente para generación hidroeléctrica en las cuencas media y alta del río Paraná y afluentes (ver Figura 5-37), con su correspondiente capacidad de contribución a mitigar caudales mínimos aguas abajo, en función de su capacidad de regulación, lo cual explica el comportamiento más homogéneo observado a partir de 1970, lo cual califica como de aún más extraordinario el fenómeno observado de estiajes absolutos observados durante los últimos 12 meses (2021-2022) para el mencionado curso.

Con posterioridad a la ejecución de tales represas (aprox. 1970), y hasta la fecha, no se han registrado valores de estiaje tan extremos. Ésto es, los valores de estiajes observados julio-agosto 2021 y enero-febrero 2022 resultan inéditos desde 1970 (transcurridos 50 años).

Se presenta a continuación una tabla con el análisis de frecuencia de ocurrencia de caudales de estiaje (aguas bajas) en el río Paraná (sección Rosario) realizado por el Instituto Nacional del Agua, de la República Argentina.

Tabla 5-9: Frecuencia de ocurrencia anual de aguas bajas (caudales de estiaje) en el río Paraná (Fuente: INA 2002⁶)

Umbral Q (m ³ /s)	1931-1943		1944-1970		1971-2001	
	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia
8000	2	0.15	2	0.07	0	0.00
9000	8	0.62	20	0.74	1	0.03
10000	9	0.69	28	1.04	3	0.10
11000	12	0.92	33	1.22	8	0.26
12000	14	1.08	31	1.15	16	0.52
13000	17	1.31	36	1.33	23	0.74
15000	12	0.92	26	0.96	35	1.13

En relación a la bibliografía asociada recurrencia de estos valores mínimos de nivel (y caudal) registrados en el río Paraná en el último año, se destaca:

- En la información del INA presentada anteriormente en la
-
- Tabla 5-9, no se encuentran registros inferiores a los valores mínimos registrados en 2021/2022 correspondientes a caudales aproximados de 7000 m³/s.
- Considerando la serie de caudales 1971-2020 el período de retorno de los caudales mínimos actualmente observados (aprox. 7.000 m³/s) resulta ser superior a 50 años.
- En el estudio de caracterización hidrodinámica en la cuenca baja del río Paraná de Gerbec et alii, se asocia un caudal de 11.600 m³/s a períodos de retorno de 50 años⁷, siendo ese valor indicado 65% superior al observado en 2021 y 2022.

En definitiva, y en base a la información antes presentada, se puede afirmar que los valores registrados de niveles y caudales de estiaje del río Paraná en Rosario, durante el período coincidente de ocurrencia de eventos de salinidad detectados por la sonda (2020-2021), presentan un período de retorno superior a 50 años.

Río Uruguay en Concordia

Se presenta a continuación una tabla con la frecuencia de ocurrencia de caudales de estiaje (aguas bajas) en el río Uruguay.

⁶ **Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay, Informe INA-LHA 05-216-02** Jaime P., Menéndez A. N. Comitente: Proyecto Freplata. Julio 2002.

⁷ Gerbec, M. S., & Borús, J. Paper 18–Caracterización Hidrodinámica en aguas bajas para la Vía Navegable del río Paraná (2016).

Tabla 5-10: Frecuencia de ocurrencia anual de caudales de estiaje (aguas bajas) en el río Uruguay (Fuente: INA 2002⁸).

Umbral Q (m ³ /s)	1931-1943		1944-1970		1971-2001	
	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia
500	2	0.15	2	0.07	1	0.03
800	6	0.46	17	0.63	7	0.23
900	9	0.69	20	0.74	9	0.29
1000	11	0.85	23	0.85	13	0.42
1100	13	1.00	27	1.00	14	0.45
1200	12	0.92	27	1.00	17	0.55
1500	14	1.08	32	1.19	26	0.84
1700	15	1.15	34	1.26	33	1.06
2000	14	1.08	40	1.48	40	1.29
2500	16	1.23	49	1.81	46	1.48

En un informe del Departamento de Hidrología de la Dirección Nacional de Hidrografía de Abril del 2006, se presenta la curva de frecuencia de niveles en Salto.



Figura 5-43: Niveles mínimos anuales en Puerto de Rosario (Fuente: DNH).

En relación a la bibliografía asociada al cálculo del tiempo de retorno de estos valores mínimos de niveles y caudales registrados en el río Paraná en el último año, se destaca:

⁸ **Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay, Informe INA-LHA 05-216-02 Jaime P., Menéndez A. N. Comitente: Proyecto Freplata. Julio 2002.**

- En la información del INA presentada anteriormente en la Tabla 5-10 se encuentra un registro inferior al valor mínimo registrado en 2022 correspondiente a un caudal aproximado de 395 m³/s, y se asocia a un período de retorno superior a 33 años.
- De la curva de frecuencia de la DNH, y extrapolando los niveles de Concordia a la Ciudad de Salto, se puede concluir que el valor mínimo de 0,20 m registrado en febrero de 2022, se puede asociar a un período de retorno superior a 100 años.

Al igual que para el río Paraná, se puede afirmar que los valores registrados de niveles y caudales en el río Uruguay, durante el período coincidente de ocurrencia de eventos de salinidad detectados por la sonda en Arazatí, son de recurrencia mínima de 50 años.

5.10.5.3 Duración de los eventos de estiaje

La Tabla 5-11 a continuación muestra los períodos identificados en el ciclo 1971-2001, que se asocian a caudales inferiores a 11.000 m³/s en el río Paraná y asociados a una frecuencia de ocurrencia de 0,25 (Período de retorno equivalente a 4 años).

Tabla 5-11 Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 11.000 m³/s para el río Paraná en período 1971-2001 (Fuente: INA 2002).

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Q _{mínimo} (m ³ /s)	T _{mínimo} (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Sep-71	Dic-71	4	8926	3.76	12	71
2	May-78	Jul-78	3	10457	0.18	5	78
3	Sep-81	Sep-81	1	10986	0.02	9	81
4	Dic-85	Ene-86	2	10107	1.05	1	86
5	Dic-88	Ene-89	2	9995	0.56	12	88
6	Nov-99	Nov-99	1	10869	0.22	11	99
7	Ene-00	Ene-01	1	10825	0.97	1	0
8	Ene-02	Ene-02	2	9924	1.47	9	1

Según la información antes indicada la duración de los eventos de caudales inferiores a 11.000 m³/s tiene una duración de entre 1 y 4 meses.

La siguiente figura la duración de eventos de estiaje para estiajes con distinto período de retorno entre 2 y 10 años para distintas secciones del río Paraná (entre ellas Rosario).

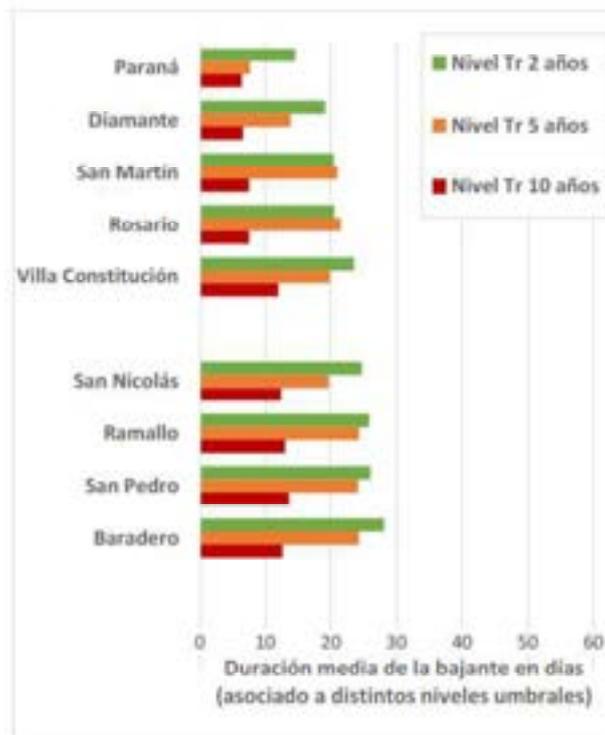


Figura 5-44 Duración de bajantes asociados a distintas recurrencias (Gerbec, M. S., & Borús, 2016).

Por un lado, las bajantes asociadas a período de retorno de 2 años presentan duraciones comprendidas entre 15 y 28 días. Mientras que las bajantes asociadas a un período de retorno de 10 años presentan valores promedios en el rango entre 6 y 14 días.

5.10.6 Conclusiones

El tercer episodio de salinidad observado en Arazatí durante los meses de enero a marzo de 2022, resultó ser absolutamente extraordinario por su duración (66 días) y tiene como factor relevante la ocurrencia de eventos de estiaje mínimos históricos absolutos de sus principales tributarios (Paraná y Uruguay), con período de retorno de ocurrencia mayor a 50 años (y posiblemente cercanos a los 100 años).

Estos caudales mínimos extraordinarios se han observado durante períodos prolongados de tiempo durante el año 2021 y al inicio del 2022, ocasionando así que la zona de transición del frente salino se haya desplazado río arriba en el Río de la Plata, asociados con eventos de viento de menor magnitud, provocando los episodios de salinidad observados en Arazatí y aún en estaciones ubicadas aguas arriba en la costa uruguaya (ej. Juan Lacaze).

En función de la excepcionalidad de tales eventos de estiaje y consecuentemente de salinidad asociados, y de acuerdo al análisis antes expuesto, se considera que continúan siendo válidas las conclusiones expuestas en el capítulo 0, en cuanto a que el dimensionado propuesto en el Proyecto para la reserva de agua dulce (polder) con 9,3 Hm³ de capacidad útil (equivalente a más de 40 días de extracción a capacidad máxima de producción de la nueva Planta Potabilizadora), resulta suficiente para atender la

demanda del sistema y en condiciones de satisfacer la oferta de agua pretendida de 229.000 m³/d, con un nivel de seguridad asociado a tiempos de retorno de hasta aproximadamente 50 años.

Se considera que tales niveles de seguridad resultan suficientes para los objetivos del Proyecto de mejora del abastecimiento de agua potable para el área Metropolitana de Montevideo, atendiendo además que ambos sistemas productores a estar disponibles (Arazatí y Aguas Corrientes) se complementan y dan una seguridad conjugada para atender las demandas del servicio.

Asimismo, el sistema propuesto tiene la flexibilidad de poder agregar más capacidad de reserva en el futuro, a través de embalse adicional (polder) si los niveles de seguridad exigibles fueran superiores al nivel fijado de TR > 50 años. Cabe destacar también que durante la operación futura del sistema proyectado, será posible continuar con la optimización de la modelación de eventos extremos de salinidad, lo que aumentará el nivel de confianza de las proyecciones y estimaciones de niveles de seguridad de las instalaciones proyectadas.