



Ministerio
de Ambiente

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DE LA CUENCA DE LA LAGUNA MERÍN

Período 2015-2019

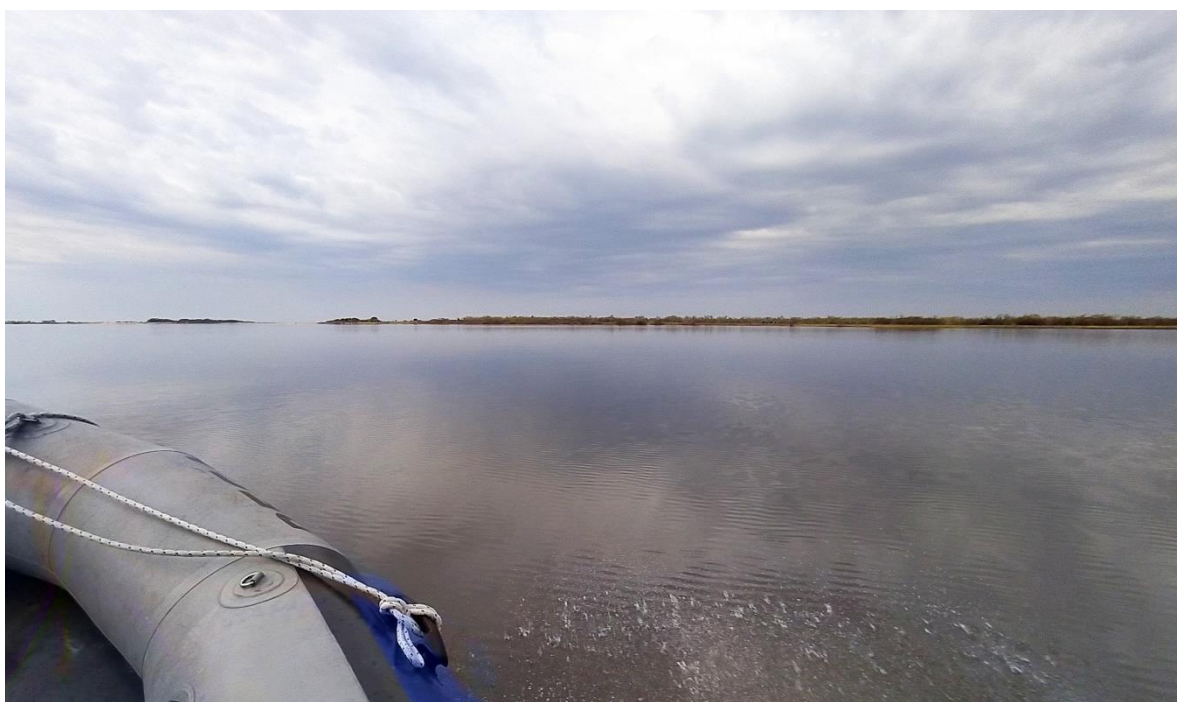


Foto: Carolina Ferrer / Desembocadura del río Tacuarí

Enero 2021

Ministro de Ambiente

Adrián Peña

Director Nacional de Medio Ambiente

Eduardo Andrés

Gerente del Área Información, Planificación y Calidad Ambiental

Ing. Quím. Marisol Mallo

División Calidad Ambiental

Ing. Luis Reolón - Director

Departamento Evaluación Ambiental Integrada

Biol. Mag. Lizet De León - Jefa

Departamento de Seguimiento de Componentes del Ambiente

Ing. Quím. Magdalena Hill - Jefa

Equipo de Monitoreo

Alejandro Cendón, Biol. Carolina Ferrer, Biol. Facundo Lepillanca, Bach. Fernanda Eugui, Oc. PhD. Guillermo Cervetto, Tec. Agrop. Javier Martínez, Jorge Rodríguez (Consultor), Biol. Mario Acosta (Consultor), Biol. Martín Pacheco, Biol. Mag. Natalie Corrales (Consultora) y Gerardo Balero.

División Laboratorio Ambiental

Q.F. Natalia Barboza

Autores del Informe

Bioq. Mag. Amelia Fabre (Consultora), Bach. Ing. Natalia Neighbor (Consultora), Biol. Mag. Mariana Nin (Consultora), Ing. Luciana Badano (Consultora), Biol. Mercedes Gelós (Consultora), Ing. Mag. Pablo Kok, Biol. Mag. Elena Rodó, Biol. Mag. Federico Quintans (Consultor) y Biol. Mag. Lizet De León.

ISBN: 978-9915-9377-5-5



Este documento se terminó de elaborar y revisar en diciembre de 2020.

DINACEA, Galicia 1133 Montevideo, CP 11100, Uruguay

Teléfono: 2917 0710 int. 4150

Primera edición, enero 2021.

Número de páginas: 65

Revisión y diseño: Ministerio de Ambiente

Imagen en portada: Carolina Ferrer

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. ÁREA DE ESTUDIO	3
3.1. Ubicación geográfica de la cuenca y población	3
3.2. Relieve, paisaje y ecosistemas	4
3.2.1. Ecosistemas	4
3.3. Relevancia para la conservación	6
3.3.1. Especies prioritarias para la conservación	6
3.3.2. Áreas de conservación a nivel internacional	6
3.4. Servicios ecosistémicos	8
3.5. Usos de suelo	10
4. METODOLOGÍA	13
4.1. Programa de monitoreo	13
4.2. Parámetros de calidad de agua	13
4.3. Parámetros hidroclimáticos	15
4.4. Estimación de carga de nutrientes aportada por la cuenca	17
4.4.1. Cargas difusas	17
4.4.2. Cargas puntuales	17
4.5. Índice estado trófico de las aguas	18
4.6. Análisis de datos	18
5. RESULTADOS	20
5.1. Evaluación espacial y temporal de la cuenca	20
5.1.1. Variables físicas y químicas, y nutrientes	20
5.1.2. Variables biológicas	22
5.1.3. Contaminantes orgánicos	23
5.1.4. Carga de nutrientes aportadas desde la cuenca	24
5.2. Evaluación espacial y temporal por subcuenca	26
5.2.1. Río Yaguarón (subcuenca 40)	26
5.2.2. Río Tacuarí (subcuenca 41)	28
5.2.3. Río Olimar Grande (subcuenca 43)	29
5.2.4. Río Cebollatí (subcuencas 44 y 43)	31
5.2.5. Río San Luis (subcuenca 45)	33
5.2.6. Arroyo San Miguel (subcuenca 45)	33
5.3. Evaluación integrada	36
5.3.1. Aportes desde la cuenca y calidad de agua	36
5.3.2. Cumplimiento de los estándares de calidad de agua	38
5.3.3. Índice de Estado Trófico	39
6. DISCUSIÓN	41
6.1. Principales características de la cuenca	41
6.2. Fitosanitarios	42
6.3. Subcuenca 40 (río Yaguarón)	43
6.4. Subcuenca 41 (río Tacuarí)	44
6.5. Subcuenca 43 (río Olimar Grande)	44
6.6. Subcuenca 44 (río Cebollatí)	44
6.7. Subcuenca 45 (arroyo San Miguel y río San Luis)	45
6.8. Laguna Merín	46
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	48
9. BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXO I	54
ANEXO II	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Cuenca de la Laguna Merín.....	3
Figura 3.2 Distribución y superficie de los distintos tipos de humedales.....	5
Figura 3.3 Distribución del bosque nativo	5
Figura 3.4 Número de especies prioritarias de fauna y flora.....	6
Figura 3.5 Áreas de conservación declaradas.....	7
Figura 3.6: Provisión de servicios ecosistémicos	8
Figura 3.7 Distribución de la provisión de servicios ecosistémicos	9
Figura 3.8: Usos del suelo	10
Figura 3.9 Porcentaje de los distintos usos de suelo.	11
Figura 3.10 Localización de embalses para riego	11
Figura 4.1. Localización de las estaciones de monitoreo.....	13
Figura 4.2 Caudales para el período 2015-2019	16
Figura 4.3 Precipitación acumulada mensual	16
Figura 5.1 Variación espacial de parámetros físicos y químicos.....	21
Figura 5.2 Variables biológicas	22
Figura 5.3 Fitosanitarios	23
Figura 5.4. Concentración de compuestos halogenados adsorbibles	24
Figura 5.5. Aporte estimado de nitrógeno y fósforo desde fuentes puntuales y difusas en 2015.....	25
Figura 5.6 Carga anual de fósforo y nitrógeno aportada desde fuentes puntuales 2015-2019.. ..	25
Figura 5.7. Variación temporal de parámetros físicos y químicos en el río Yaguarón.....	27
Figura 5.8. Variación temporal de parámetros físicos y químicos en el río Tacuarí	28
Figura 5.9. Variación temporal de parámetros físicos y químicos en el río Olimar Grande	30
Figura 5.10 Variación temporal de parámetros físicos y químicos en el río Cebollatí.....	32
Figura 5.11. Variación temporal de parámetros físicos y químicos en el río San Luis	34
Figura 5.12. Variación temporal de parámetros físicos y químicos en el A° San Miguel.....	35
Figura 5.13 Análisis de componentes principales para cargas puntuales (2015-2019)	36
Figura 5.14. Análisis de componentes principales para el año 2015 con las cargas difusas y puntuales.....	37
Figura 5.15 Porcentaje de cumplimiento de los parámetros legislados en el Decreto 253/79	38
Figura 5.16 Estado trófico.....	40
Figura 6.1 Imagen satelital de Landsat 8 y concentración de clorofila <i>a</i>	46

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACA: Asociación de Cultivadores de Arroz
ACP: Análisis de Componentes Principales
AMPA: Ácido aminometilfosfónico
AOX: compuestos orgánicos halogenados absorbibles
CMAP-IUCN: Comisión Mundial de Áreas Protegidas – Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
DCA: División Calidad Ambiental
DCAA: Departamento de Control Ambiental de Actividades
DEAI: Departamento de Evaluación Ambiental Integrada
DINAGUA: Dirección Nacional de Aguas
DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente
DSCA: Departamento de Seguimiento de Componentes Ambientales
ECHA: European Chemical Agency.
EGC: Establecimientos de ganado confinado
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler/RS-Brasil
GEMS: servicios de gestión ambiental global (por su sigla en inglés)
GESTA-Agua: Grupo de estándares ambientales-agua
IAO: Informe ambiental de operaciones
IBA: Área de Importancia para la Conservación de las Aves (por su sigla en inglés)
IBGE: Instituto brasileiro de geografia y estadística
IET: Índice de estado trófico
INE: Instituto Nacional de Estadística
INIA: Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
INUMET: Instituto Uruguayo de Meteorología
LC: Límite de cuantificación analítica
LD: Límite de detección analítica
MA: Ministerio de Ambiente
MGAP: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca
MTA: Mesa Técnica del Agua
MVOTMA: Ministerio de vivienda, ordenamiento territorial y medio ambiente
OAN: Observatorio Ambiental Nacional
OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS: Organización Mundial de la Salud
ONU: Organización de las Naciones Unidas
PROBIDES: Programa de Conservación de la Biodiversidad y Desarrollo Sustentable en los Humedales del Este
REDD+: Programa para la Reducción de Emisiones causadas por la Deforestación y la Degradación forestal
RIQ: Rango intercuartílico
SE: Servicios ecosistémicos

RESUMEN EJECUTIVO

Introducción

La Laguna Merín y su cuenca se ubican en el límite fronterizo entre Uruguay y Brasil y es una de las cuencas de mayor superficie de nuestro país. Está integrada por seis subcuencas: A° San Miguel, río San Luis, río Cebollatí, río Olimar Grande (incluida en la anterior), río Tacuarí y río Yaguarón (transfronteriza con 53% en territorio uruguayo).

La cuenca presenta amplia diversidad de humedales y gran extensión de bosque nativo en zonas riparias y en la zona de serranías. Dadas las áreas naturales que aún conserva, la cuenca cuenta con una declaración de Reserva de Biósfera (Bañados del Este), un Sitio Ramsar y cuatro Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves.

Sin embargo, la hidrografía natural de la cuenca ha sido modificada para ganar territorio apto para cultivos, mediante pequeños y grandes canales así como numerosos embalses. Con lo cual constituye una de las regiones con mayor volumen de agua extraído directamente desde cursos de agua superficiales. Dichas construcciones además eliminan o limitan el desarrollo de áreas naturales de amortiguación de impactos antrópicos, como los humedales.

El principal uso de suelo reportado para 2015 fue la cobertura de herbáceo natural y el suelo destinado a agricultura. La subcuenca con mayor porcentaje de herbáceo natural fue la del río Olimar Grande. Las actividades agrícolas más extendidas fueron las plantaciones de arroz, con campo inundado (17,4 %) y los cultivos de secano (7,9%), ambos forman parte de un sistema de rotación utilizado en gran parte de los terrenos.

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar de forma integrada la calidad del agua de los principales afluentes de la Laguna Merín entre los años 2015 y 2019.

Metodología

Se realizaron monitoreos bimensuales en el periodo 2015-2019 de los principales tributarios de la Laguna Merín dentro del territorio uruguayo (15 estaciones de monitoreo). Se incluyeron mediciones *in situ* y determinación de diferentes analitos en la matriz agua superficial, incluyendo fitosanitarios y sus derivados. También estimaron el caudal y las lluvias acumuladas en los días previos al monitoreo y se estimaron las concentraciones de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) aportadas por las principales actividades de la cuenca desde fuentes puntuales y difusas. Luego se relacionaron dichas variables con los parámetros de calidad de agua determinados durante los monitoreos. Se calcularon el índice de estado trófico anual y el porcentaje de cumplimiento de los límites establecidos por el Decreto 253/79 para cada estación de monitoreo.

Resultados y discusión

Las condiciones físicas y químicas observadas en la cuenca estuvieron, en general, dentro de lo esperado para este tipo de sistemas en Uruguay, encontrándose la mayoría de las estaciones dentro de un estado trófico de nivel mesotrófico. Las estaciones T1 y T2 del río Tacuarí fueron las únicas en alcanzar niveles de supereutrofia. En general, el estado trófico de las estaciones monitoreadas mejoró en los últimos años.

La mayoría de los cursos de agua estudiados son afluentes directos a la Laguna Merín, por lo que, además de la calidad de agua de cada uno, es importante evaluarlos en el contexto de la cuenca. Los valores de NT y PT propuestos por la Mesa Técnica del Agua para este tipo de cursos fueron superados en un 95% y 100%, respectivamente. Por lo tanto, a pesar del estado mesotrófico, la concentración de nutrientes de los afluentes monitoreados se consideró elevada por desembocar en un cuerpo de agua léntico.

El origen principal de los nutrientes que llegan a la laguna desde la cuenca, fue la agricultura. Se estimó que en 2015 la hemicuenca uruguaya exportó hacia la laguna una carga de 6855 t/año de NT y 1750 t/año de PT, de la cual el 97% del NT y el 96% del PT fueron de origen difuso (agricultura). La carga estimada de exportación desde la hemicuenca brasilera debida a aportes difusos (también estimada para 2015) fue de 7441 t/año de NT y 1946 t/año de PT. En concordancia con la gran actividad agrícola, en los ríos Yaguarón y Cebollatí la concentración de PT observada en el agua estuvo relacionada positiva y significativamente con el porcentaje de cultivo total en sus cuencas. Los aportes puntuales fueron también importantes en la cuenca alta de Tacuarí y Olimar Grande principalmente los de centros poblados e industrias. Además, la carga

aportada por establecimientos lecheros y de ganado confinado también fue un factor determinante en la calidad de agua para la zona media del río Cebollatí, río San Luis y arroyo San Miguel.

Otros contaminantes antrópicos estudiados, como los coliformes termotolerantes (TMF) y los compuestos halogenados adsorbibles (AOX), presentaron sólo eventos puntuales de concentraciones elevadas. La estación al cierre del A° San Miguel presentó la mayor frecuencia de ocurrencia y los mayores registros de AOX. Los fitosanitarios detectados en agua con mayor frecuencia y concentración fueron glifosato y su producto de descomposición, AMPA, en la gran mayoría de las estaciones monitoreadas (cierre de cuenca).

El análisis de la influencia de las cargas puntuales sobre la calidad del agua, evidenció que ésta es importante para algunas estaciones de monitoreo. En el análisis de componentes principales realizado al respecto, el eje 1 estuvo asociado a la concentración de PT y nitrato y las cargas puntuales aportadas por centros poblados e industrias. El eje 2 se correlacionó a la variable climática lluvia y la carga de PT aportada por la ganadería.

El porcentaje de cumplimiento de los estándares de calidad de agua establecidos en Decreto 253/79 (pH, turbidez, densidad de TMF y concentraciones de PT, amoníaco libre y oxígeno disuelto) varió entre estaciones de monitoreo. Las estaciones con mayor porcentaje de cumplimiento global fueron C0 y C3 en el río Cebollatí, y T1 en el río Tacuarí, que presentaron 100% de cumplimiento en 4 de los 6 parámetros evaluados. El parámetro de menor cumplimiento fue el PT, que tuvo un cumplimiento del 0% en todas las estaciones a excepción de O2 (en río Olimar) y en SM1 (en arroyo San Miguel).

Conclusión

Los contaminantes antrópicos más importantes que llegan desde la cuenca a la Laguna Merín, dentro de lo analizado en el presente trabajo, fueron los nutrientes en exceso. Las estaciones de monitoreo con mayor aporte de nutrientes se encontraron en el río Tacuarí (zona alta), el arroyo San Miguel y río San Luis. En Tacuarí, los principales aportes provendrían desde las industrias y centros poblados, mientras que en San Miguel y San Luis, la carga se debería a aportes desde la ganadería sobre herbáceo natural y desde cultivos de arroz. Sin embargo, el estado trófico de toda la cuenca, incluyendo dichas estaciones, ha mejorado en el último año.

La concentración de nutrientes en los cursos de agua fue elevada por tratarse de afluentes a una laguna, lo que pone en riesgo la integridad ecosistémica de la misma. Dicha carga provendría principalmente de las actividades agrícolas (cultivos de arroz y secano). El aporte sostenido de nutrientes desde la cuenca habría favorecido las floraciones de cianobacterias observadas en la laguna y el deterioro de la calidad de agua de la misma.

Es necesario plantear una mejora en el tratamiento de efluentes de industrias (grandes y pequeñas), así como de saneamiento público en varios puntos de la cuenca. Dicha acción es especialmente urgente en la cuenca de la estación T1. A su vez, sería recomendable establecer áreas de protección de los bañados naturales que actúan como zona de amortiguación y captación de nutrientes.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca de la Laguna Merín, compartida entre Brasil y Uruguay, es una de las mayores cuencas transfronterizas de Sudamérica (Sección 3.1). Su gran importancia radica en la presencia de ecosistemas complejos (entre ellos los denominados Humedales del Este). Dichos ecosistemas regulan la hidrología de la cuenca y son de gran belleza escénica y paisajística (Sección 3.2). Además, albergan gran biodiversidad animal y vegetal así como especies migratorias y en peligro de extinción, lo que la hacen una región de interés para la conservación tanto nacional (Sistema Nacional de Áreas Protegidas, SNAP) como internacional (Sección 3.3). Otro aspecto importante de la cuenca es la provisión de servicios ecosistémicos fundamentales para el sostén de las sociedades que habitan la región, como es la provisión de agua para consumo humano (Sección 3.4).

Los recursos hídricos de la cuenca, son esenciales para la conservación de los humedales y los demás ecosistemas y a la vez para el sustento de las ciudades, el desarrollo agropecuario y el turismo (Forni y Scasso, 2001 - PROBIDES). Por lo que dichos recursos son foco de conflicto entre las distintas actividades. La actividad con mayor uso del recurso es la producción de arroz, que usualmente se encuentra en rotación con cultivo de secano. Dicha actividad requiere de la desecación de humedales mediante el represamiento y drenaje del agua, acumulando grandes volúmenes. Incluso ha entrado en conflicto con otros emprendimientos productivos, como los estrictamente ganaderos (FAO, 2018).

La agricultura, tiene como desafío alimentar a las poblaciones en crecimiento y a la vez lograr prácticas que minimicen el deterioro ambiental y el cambio climático. Esto es, conseguir una alta producción sin poner en riesgo la salud humana y de la biota, que se ve amenazada por el uso de fitosanitarios (Aktar *et al.*, 2009; Beketov *et al.*, 2013). En Uruguay se han desarrollado planes de manejo para distintos tipos de cultivos, que disminuyen la degradación del suelo (por ejemplo MGAP, 2013), sin embargo el uso de químicos tóxicos o potencialmente tóxicos ha ido en ascenso (INIA, 2019; INIA, 2020). Al igual que otras cuencas del país, uno de los grandes desafíos de la cuenca de la Laguna Merín es compatibilizar el desarrollo agrícola con la preservación de los ecosistemas esenciales. Las prácticas agrícolas del arroz, principal actividad de la cuenca (sección 3.5), ha tenido importantes mejoras en ese sentido (ACA *et al.*, 2018). Sin embargo, las modificaciones en el territorio y la hidrodinámica de la cuenca han sido importantes y muchas no son reversibles en el corto o mediano plazo (sección 3.5).

En este sentido, para conocer la calidad de agua en la cuenca, es importante contar con monitoreos en periodos de tiempo prolongados, que permitan ver los cambios en la calidad del agua e identificar las principales presiones que la cuenca ejerce sobre los ecosistemas acuáticos. Para eso es necesario una visión integral (totalidad de la cuenca) e integrada (multidimensional, socio económica y ambiental).

La evaluación integrada interpreta el estado del ambiente como resultado del impacto de las actividades humanas en la cuenca y la respuesta del ambiente para recuperar o mantener sus condiciones de buena calidad (lo que se conoce como “resiliencia”; Jeppesen *et al.*, 2012). El estado del ambiente puede medirse con diferentes tipos de indicadores e índices, que consideran las características físicas, químicas, biológicas, productivas, de riesgo o de recuperación, entre otras. En este trabajo se seleccionaron varias herramientas para medir y analizar el estado ambiental de la cuenca de la Laguna Merín, buscando identificar los factores que determinan la calidad de las agua. Esto fue posible mediante el análisis y la integración de la información obtenida de los parámetros medidos y de los usos del suelo y otras actividades de la cuenca. A partir de esta evaluación ambiental se pretende sugerir acciones que preserven los cuerpos de agua en buen estado o propicien la recuperación de los que están en condiciones críticas.

El Ministerio de Ambiente (MA) es el organismo responsable de la evaluación y análisis de la calidad de agua de los cuerpos de agua del país, así como también de la comunicación de resultados. Este trabajo se enmarca en la divulgación de los resultados hacia técnicos y tomadores de decisión de forma de apoyar el desarrollo sostenible de la región.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar de forma integrada la calidad del agua de los principales afluentes de la Laguna Merín entre los años 2015 y 2019.

Los objetivos específicos fueron:

1. Evaluar la variación espacial y temporal de los parámetros de calidad de agua en las estaciones de monitoreo del programa de DINAMA.
2. Evaluar la presencia de determinados contaminantes provenientes de actividades antrópicas en el agua: fitosanitarios, compuestos halogenados adsorbibles y coliformes termotolerantes.
3. Evaluar la relación entre la calidad del agua observada en las estaciones de monitoreo y la carga de nutrientes aportada desde sus cuencas.
4. Determinar el porcentaje de cumplimiento de los estándares de calidad de agua nacionales.
5. Determinar el índice de estado trófico anual de los cursos de agua.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación geográfica de la cuenca y población

La Laguna Merín, ubicada en el límite fronterizo entre el sur-este de Uruguay y el sur de Brasil, es una laguna somera que tiene una extensión de 3750 km². La misma presenta conexión con la Laguna de los Patos, ubicada al nor-este, a través del canal San Gonzalo. La Laguna de los Patos está a su vez conectada con el Océano Atlántico, lo que define a la cuenca como exorreica (Wetzel, 2001).

Al igual que el cuerpo de agua, la cuenca hidrográfica de la laguna Merín es transfronteriza, y presenta una superficie de aproximadamente 62.250 km² de los cuales el 53% (33.000 km²) se encuentran en territorio uruguayo (Figura 3.1). Constituye una de las cuencas de mayor superficie del país, ocupando (la porción uruguaya) aproximadamente un 16% del territorio del país, distribuidos entre los departamentos de Treinta y Tres (en su totalidad), Cerro Largo, Rocha, Maldonado y Lavalleja.

En territorio uruguayo la cuenca de la Laguna Merín se encuentra integrada por seis subcuencas de orden 2, estructuradas en torno a los principales cursos de agua de su red fluvial: San Miguel, San Luis, Cebollatí (que drena sus aguas hacia el siguiente), Olimar Grande, Tacuarí y Yaguarón (que constituye el límite fronterizo entre los dos países y tiene el 47% de su subcuenca en territorio brasilero; Figura 3.1, Tabla 3.1).

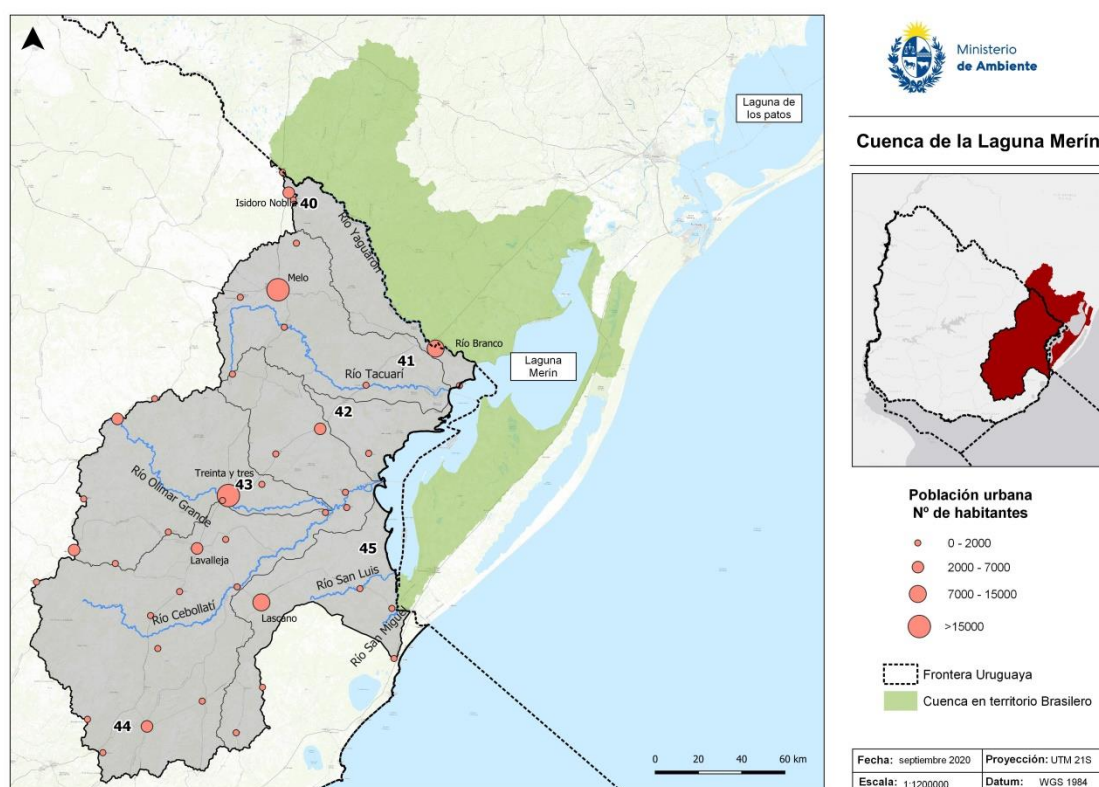


Figura 3.1. Cuenca de la Laguna Merín sobre los territorios uruguayo y brasilero, con las subcuencas de orden dos (40 a 45) y los principales centros urbanos (círculos rosados). Elaboración propia a partir de OAN e IBGE.

La hidrografía ha sido modificada para ganar territorio apto para cultivos; las más relevantes son: canal Coronilla, canal N°1, canal N°2, canal Andreoni y canal Laguna Negra. En particular el canal N°2, el canal Andreoni y el canal Laguna Negra, drenan hacia el océano Atlántico, modificando los límites de la cuenca (FAO, 2018). Además el canal San Gonzalo, de origen natural, que comunicaba las aguas Merín y de los Patos en ambas direcciones, fue modificado en 1977 para evitar el flujo que permitía el ingreso de agua hacia la primera.

De acuerdo al censo de población, hogares y viviendas del año 2011 (INE, 2012), la cuenca de la Laguna Merín contiene al 4,7 % de la población total del país (154.699 hab) y un 7,0 % de la población rural del país (Achkar *et al.*, 2012). El 92 % de la población de la cuenca se concentra en centros urbanos, donde la mayor

densidad se presenta en las tres localidades de más de 10.000 habitantes (Figura 3.1), Melo (51.830 hab), Treinta y Tres (25.476 hab) y Río Branco (14.604 hab; INE, 2012). La ciudad más importante del lado brasilero es Jaguarão (26.500 hab en 2010, IBGE). A su vez, la densidad promedio en el medio rural en territorio uruguayo es de 0,83 hab/km².

Tabla 3.1. Área de cada subcuenca de orden 2 de la cuenca de la Laguna Merín y sus ríos principales. Elaboración propia a partir de OAN.

Subcuenca	Curso principal	Área (km ²)
40	Río Yaguarón	1650
41	Río Tacuari	4604
42	sin río principal	1190
43	Río Olimar Grande	5283
44	Río Cebollatí	12005
45	A° San Miguel y río San Luis	3403

3.2. Relieve, paisaje y ecosistemas

La divisoria de aguas de la cuenca de la Laguna Merín se encuentra en la Cuchilla Grande, que conforma un arco en el sentido noreste-sureste, con una altura promedio 350 m, siendo su punto más alto de 516 m (Achkar *et al.* 2012). Dicha formación corresponde al denominado basamento cristalino de origen metamórfico e ígneo. En el otro extremo de altitudes, la parte baja se encuentra definida por la gran planicie de la laguna, con altitudes entre 0 y 50 m, que ocupa una gran extensión de la cuenca. Entre esta última y las sierras se desarrollan un conjunto de colinas y lomadas con altitudes promedio de entre 50 y 150 m (Bentancor *et al.*, 2015).

A nivel de paisaje, es posible diferenciar cinco unidades paisajísticas en la cuenca (Achkar *et al.*, 2012):

- **Serranías** (aproximadamente el 40% de la cuenca): sierras rocosas cristalinas y metamórficas con interfluvios aplanados. La vegetación natural predominante es pradera estival de tapiz abierto y en los valles se desarrolla el bosque fluvial.
- **Colinas y lomadas** (aproximadamente el 30% de la cuenca): hay de dos tipos, cristalinas y sedimentarias, encontrándose estas últimas en el centro y norte de la cuenca, con sedimentos limo-arcillosos de Formación Yaguarí y sedimentos limo-arcillosos de Formación Libertad. El ecosistema natural predominante es la pradera estival de tapiz denso con parque asociado. En las riberas de los cursos fluviales se desarrolla el bosque fluvial y en las colinas rocosas puede aparecer el bosque serrano.
- **Planicies:** es el área de planicies más extensa y continua del país y en el que también se desarrollan ecosistemas de bañados de extensión considerable entre los que se destacan los bañados de India Muerta, los de San Miguel y los de Rincón Bravo.
- **Cuerpo de agua** de la laguna.

3.2.1. Ecosistemas

De acuerdo al Inventario Nacional de Humedales (Sosa *et al.*, 2018), la cuenca de la Laguna Merín presenta poco más de 34.000 ha de humedales de diverso tipo, siendo los más abundantes los de tipos “pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos, que alcanzan casi la mitad de esta superficie (Figura 3.2). En segundo lugar en importancia, con superficies en torno a las 7.000 ha, se desarrollan humedales tipo bosque en torno a cursos de agua, y humedales modificados, probablemente asociados al cultivo de arroz. Finalmente, en superficies menores se encuentran los humedales tipo cuerpo de agua de distintas características.

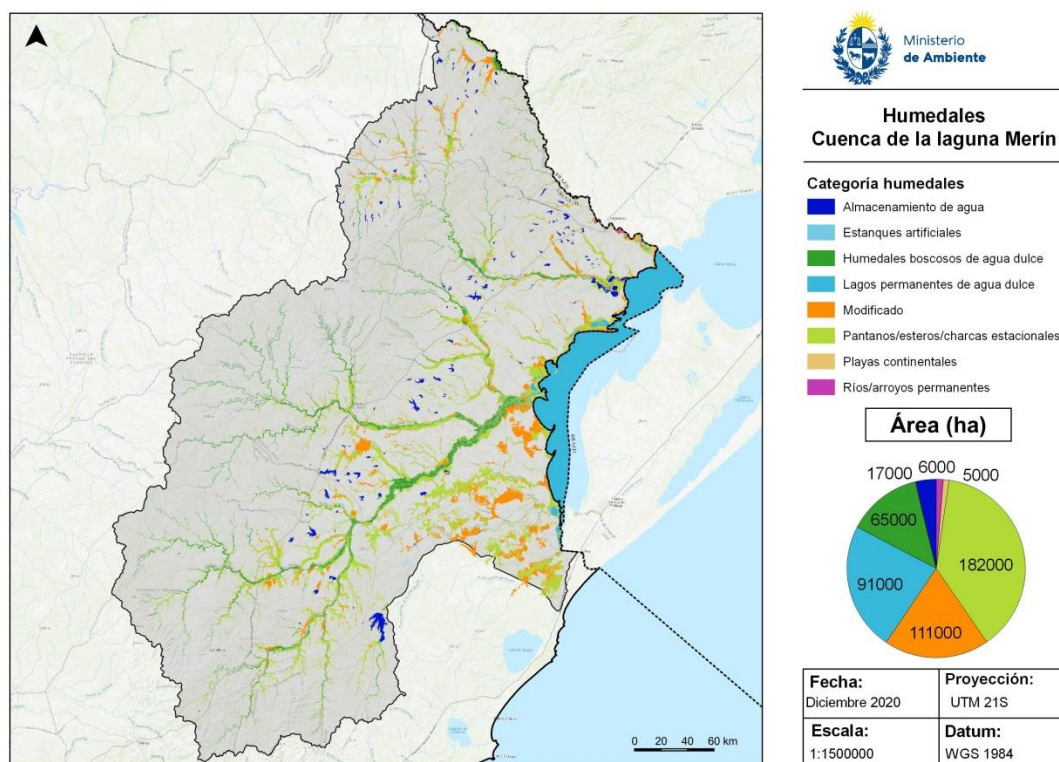


Figura 3.2 Distribución y superficie de los distintos tipos de humedales la cuenca de la Laguna Merín, según el Inventario Nacional de Humedales (Sosa *et al.*, 2018; elaboración propia a partir del OAN).

Por otro lado, de acuerdo al mapeo de bosque nativo elaborado por REDD+, en la cuenca de la Laguna Merín hay 171.693 ha de bosque nativo, que se distribuyen principalmente por zonas riparias y algunos grandes parches en la zona de serranías (Figura 3.3).

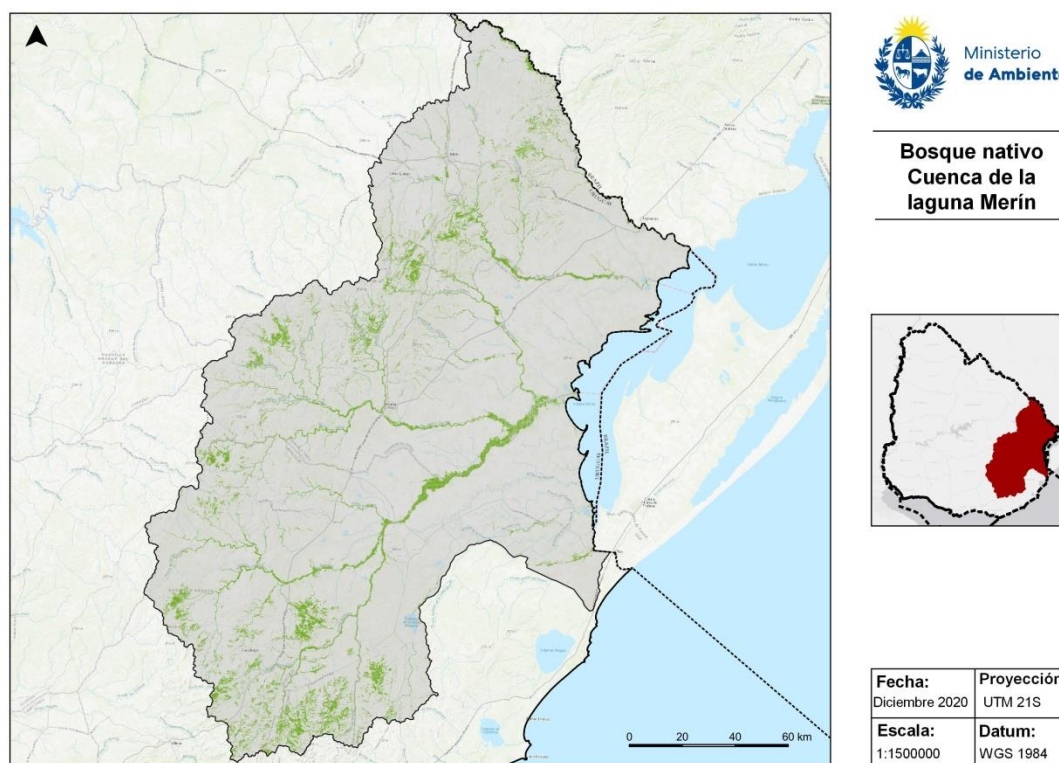


Figura 3.3 Distribución del bosque nativo en la cuenca de la Laguna Merín (elaboración propia a partir de REDD+ y OAN).

3.3. Relevancia para la conservación

3.3.1. Especies prioritarias para la conservación

En la cuenca de la Laguna Merín hay numerosas especies prioritarias para la conservación¹ (Soutullo y Bartesaghi, 2009). Respecto a la fauna, la mayoría de las celdas (correspondientes a las cartas topográficas del Sistema Geográfico Militar) de la cuenca presentan entre 21 y 30 especies animales prioritarias, mientras que el sector este de la cuenca presenta en general valores mayores (51 a 60 especies prioritarias; Figura 3.4). Las celdas que incluyen el Área protegida Paso Centurión presentan registros de fauna prioritaria aún mayores (61 a 82 especies prioritarias), al igual que algunas porciones ubicadas en el sector sur de la cuenca. Para flora, los valores de registros son más bajos, dado que la mayoría de las celdas de la cuenca o bien no presentan registro de ninguna especie prioritaria, o presentan entre 1 y 20 especies. Se destaca un sector en el límite entre Treinta y Tres y Cerro Largo, que presenta un registro de entre 31 y 50 especies prioritarias de flora.

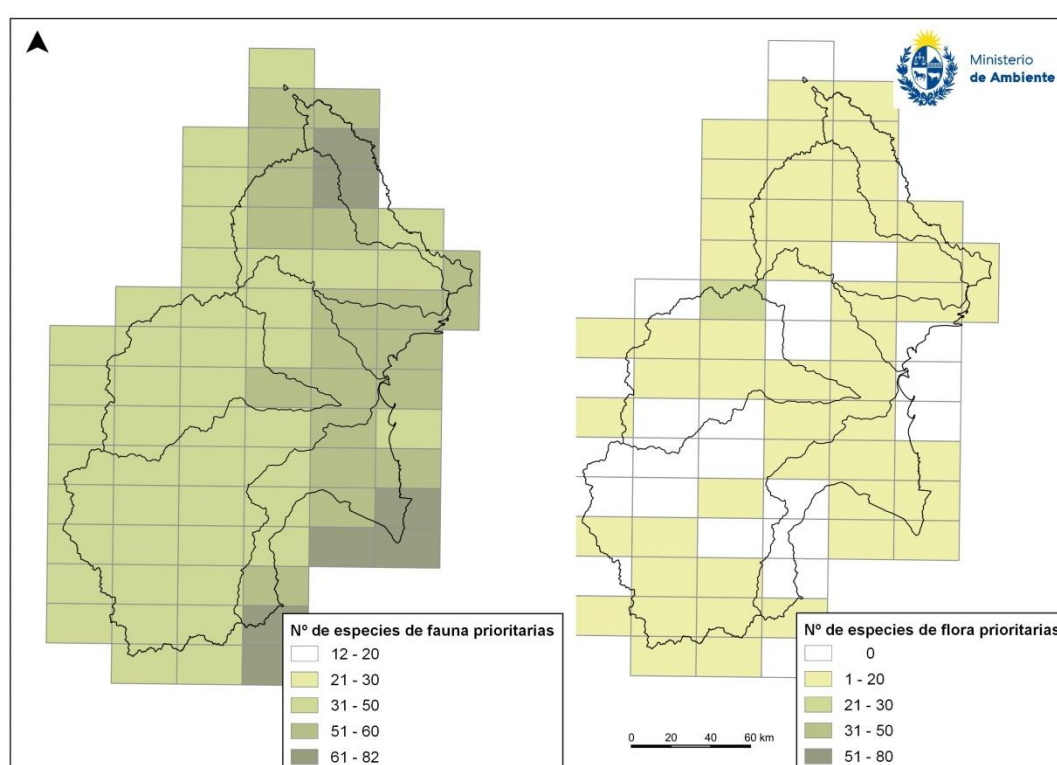


Figura 3.4 Número de especies prioritarias de fauna y flora en la cuenca de la Laguna Merín. Cada celda corresponde a una carta topográfica del Sistema Geográfico Militar (Modificado de Soutullo y Bartesaghi, 2009).

3.3.2. Áreas de conservación a nivel internacional

La cuenca en estudio ha sido y es foco de estrategias de conservación de distinto tipo, principalmente debido a su gran extensión de humedales que conforman un territorio de elevada diversidad de flora y fauna, además de brindar servicios ecosistémicos destacados (Sección 3.4). Esto ha generado que en la actualidad, gran parte de la cuenca cuente con una declaración de Reserva de Biósfera, un Sitio Ramsar y cuatro Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (IBAs por su sigla en inglés) (Figura 3.5). Estas tres estrategias territoriales de conservación responden a iniciativas internacionales tanto del ámbito estatal

¹ Son especies que por la relevancia de la contribución de Uruguay a su conservación, por la necesidad de implementar estrategias para evitar su deterioro, y/o por su contribución potencial o real al bienestar humano, han sido priorizadas por el SNAP para la implementación de medidas de conservación.

(las dos primeras) como del ámbito de la sociedad civil (la última) que buscan la conservación de la biodiversidad en dichas áreas.

La Reserva de Biósfera, llamada Bañados del Este integra el programa de Reservas de Biosfera de UNESCO, si bien fue declarada en 1997, la delimitación actual fue propuesta en 2004, y presenta una superficie de 1.250.000 ha que trascienden los límites de esta cuenca.

El Sitio Ramsar Bañados del Este también trasciende los límites de esta cuenca, son 431.536 ha que incluyen los humedales de la Cuenca de la Laguna Merín y de la Cuenca del Océano Atlántico. Abarca las lagunas costeras de agua dulce (Merín y Negra) y parte de las de agua salobre (Castillos), sus planicies de inundación y sus tributarios. Este Sitio Ramsar fue el primero de este tipo creado en Uruguay, en el momento en que el país adhirió a la Convención Ramsar (1984), con una superficie de 407.408 ha. Sin embargo, como consecuencia de las modificaciones a los ecosistemas que se desarrollaron con fines de uso agrícola, en los años 90 el sitio fue incluido, en el Registro de Montreaux donde se constata el incumplimiento de los compromisos asumidos. Recién en 2014 el estado Uruguayo presentó una propuesta que le reasignó el status al sitio y que incluyó, entre otras cosas, una ampliación de la superficie, y un compromiso de incorporación de Buenas Prácticas Agrícolas y monitoreo ambiental (Evia y Musitelli, 2015 -PROBIDES).

Las IBAs no constituyen, como en el caso de las anteriores, áreas declaradas mediante normativa, sino que son áreas identificadas como relevantes en base a un conjunto de criterios relacionados con la conservación de aves (particularmente amenazadas y migratorias) (Aldabe *et al.*, 2009). En esta cuenca de desarrollan cuatro IBAs, dos de ellas completamente comprendidas en los límites de la cuenca (Sierra de los Ríos en el departamento de Cerro Largo y Quebradas de Treinta y Tres en el referido departamento), y dos de mayor superficie, que trascienden las divisorias de aguas (Serranías del Este y Bañados del Este).

La cuenca posee actualmente tres áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP s/f, Figura 3.5):

- Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos, con una superficie de 4.413 ha, que se encuentra en proceso de ampliación a una superficie mayor (19.395 ha), ingresada al SNAP en 2008 (Dtos. 462/008; 524/008).
- Parque Nacional San Miguel, con una superficie de 1.542 ha, ingresada al SNAP en 2010 (Dto 54/010).
- Paisaje Protegido Paso Centurión y Sierra de Ríos, con una superficie de 25.836 ha, ingresada al SNAP en 2019 (Dto. 198/019)

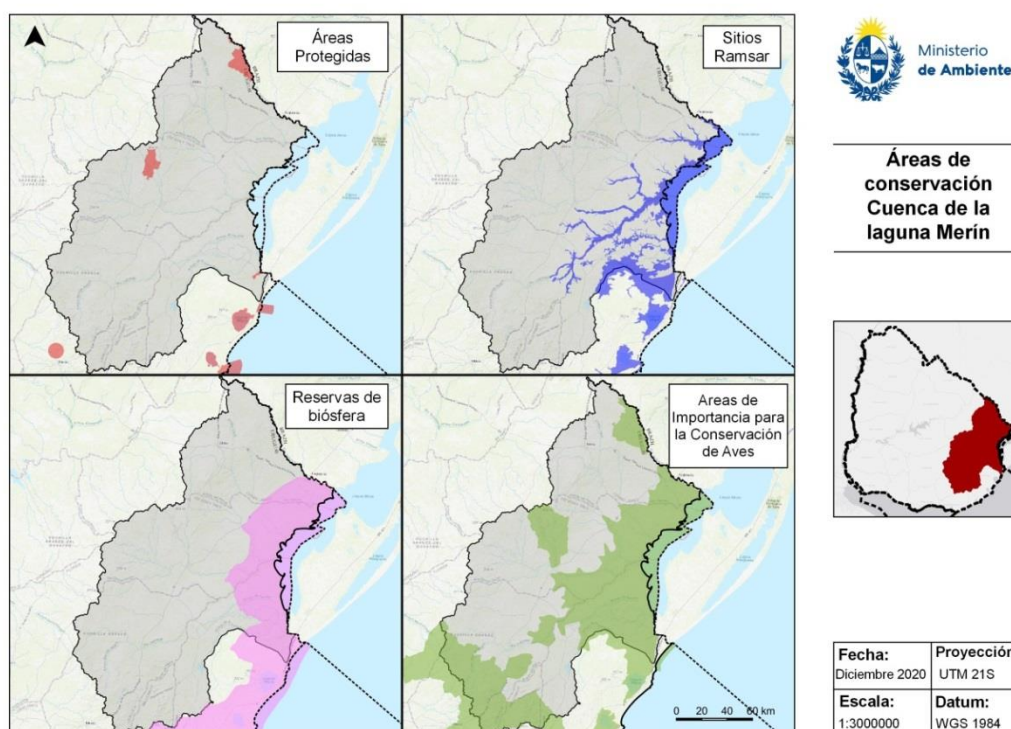


Figura 3.5 Áreas de conservación declaradas en la Cuenca de la Laguna Merín. Elaboración propia a partir de OAN, consulta noviembre 2020.

3.4. Servicios ecosistémicos

Otros aspectos a tomar en cuenta para el análisis de la cuenca es la provisión de los servicios ecosistémicos (SE). Un estudio realizado por Soutullo *et al.* (2012), permitió conocer cómo se distribuyen en el territorio la provisión de siete servicios ecosistémicos de interés para la sociedad: producción de alimentos, disponibilidad de agua para consumo, mantenimiento de recursos genéticos, mantenimiento de clima habitable, mantenimiento de la calidad del agua, amortiguación de eventos extremos y disminución de enfermedades y plagas (Figura 3.6). Dicho estudio elaboró un ranking de la contribución relativa de cada ecosistema a la provisión de cada servicio evidenciando la importancia de los distintos sectores de la cuenca a la provisión de los mencionados servicios. En el presente trabajo, para facilitar la representación gráfica de cada servicio, la contribución relativa de cada ecosistema se re-escaló a un valor acotado entre 0 y 1, dividiendo el valor observado para cada ecosistema por el valor del ecosistema con el valor más alto. Luego, los ecosistemas se agruparon en 6 categorías según su valor estandarizado y éstos se utilizaron para el mapeo.

La cuenca en estudio aporta principalmente a los SE producción de alimentos y mantenimiento de recursos genéticos (Figura 3.6), seguidos de disminución de enfermedades y plagas y amortiguación de eventos extremos. Además, el valor promedio de provisión de SE es relativamente alto para todo el conjunto analizados (todos > 0,6).

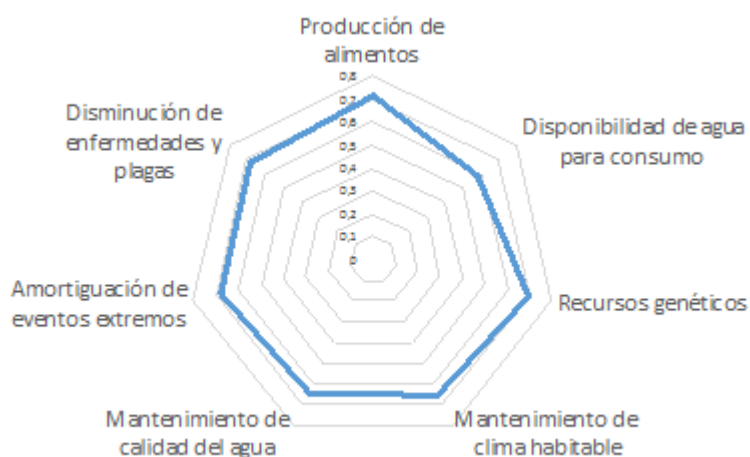


Figura 3.6: Provisión estimada promedio de cada servicio ecosistémico modelado en la Cuenca de la Laguna Merín (elaborado con datos de Soutullo *et al.* 2012).

En cuanto a la distribución geográfica de los distintos SE, los cursos de agua de la cuenca y la costa de la Laguna destacan como sitios con alta contribución a la provisión de todos los SE, mientras que la zona de nacientes del Río Cebollatí (subcuenca 44) y toda la subcuenca del A° San Miguel (dentro de la subcuenca 45) destacan como sitios de alta contribución para seis de los siete SE analizados (Figura 3.7). En particular, para los SE producción de alimentos y mantenimiento de recursos genéticos, se destaca también como área de alta contribución toda la cuenca media, así como la zona de nacientes de los ríos Yaguarón y Tacuarí (subcuencas 40 y 41 respectivamente).

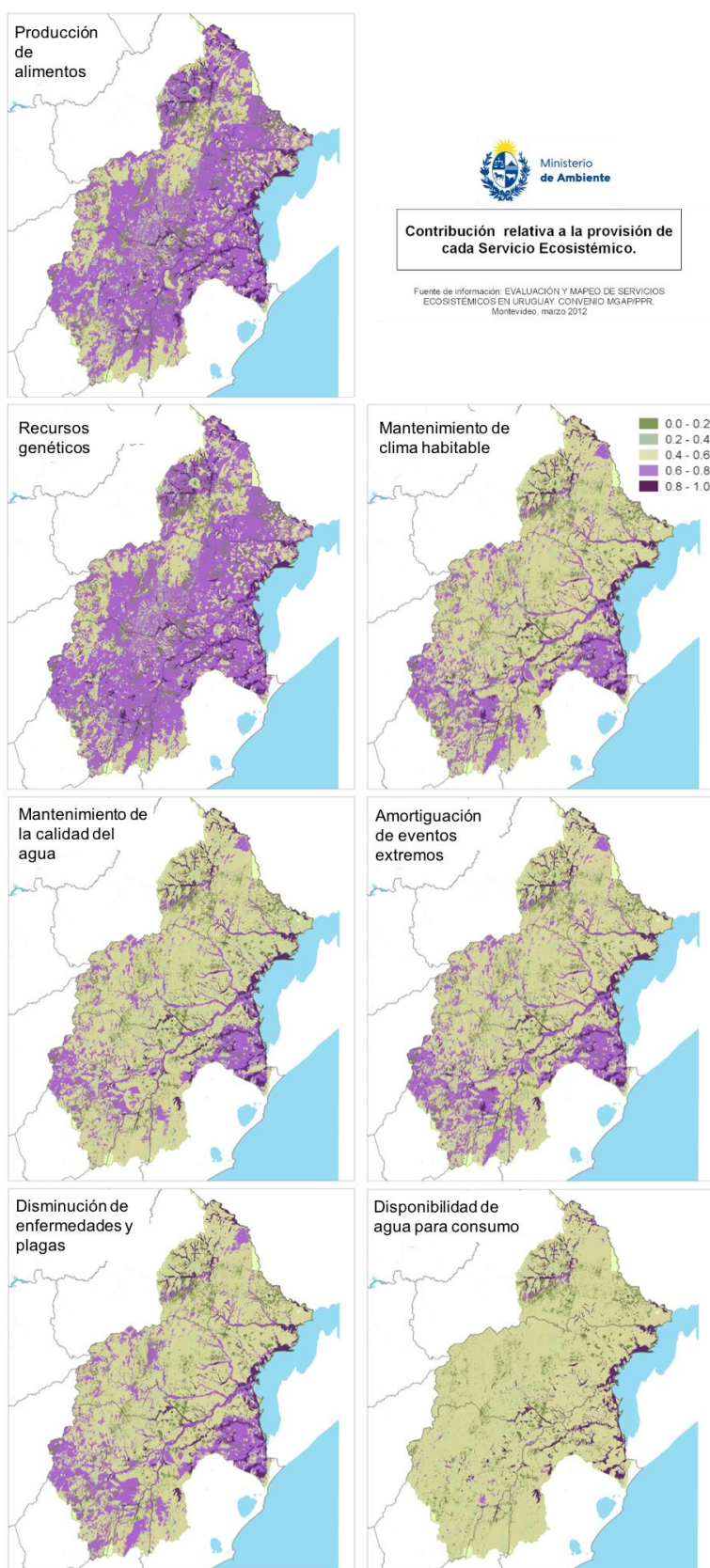


Figura 3.7 Distribución de la provisión estimada de servicios ecosistémicos en la Cuenca de la Laguna Merín (adaptado de Soutullo *et al.* 2012).

3.5. Usos de suelo

Dentro de los usos de suelo reportados para el 2015 en la cuenca en estudio, los principales fueron la cobertura de herbáceo natural (52,5 % de la cuenca) y la agricultura (22,6 %). A su vez, la forestación reportada no superó el 8 % de la cuenca (OAN; Figura 3.8).

Dentro de la categorización herbáceo natural están incluidos los pastizales, que también pueden desarrollarse dentro de las áreas naturales inundables y palmares. Los pastizales naturales templados como los que se encuentran en Uruguay son uno de los ecosistemas en mayor riesgo dado que tiene muy poca protección a nivel mundial (CMAP-IUCN) y en Uruguay por el aumento del área agrícola y el bajo porcentaje incluido en áreas con algún tipo de protección (GEO Uruguay, 2008). El área de cobertura de dicho ecosistema está en disminución desde el año 1961 (desde aproximadamente 13,5, a 11,5 millones de ha en el año 2000) a nivel nacional. Los pastizales naturales son un ecosistema dominante en el país, e integran una de las áreas de mayor riqueza de especies de gramíneas en el mundo (>2000 especies) y ofrecen gran variedad de servicios ecosistémicos (Soutullo *et al.*, 2012). Uno de los objetos focales de conservación del Paisaje Protegido Quebrada de los Cuervos y Sierras del Yermal es la conservación de dichos ecosistemas (sistema de información del SNAP, consulta diciembre 2020).

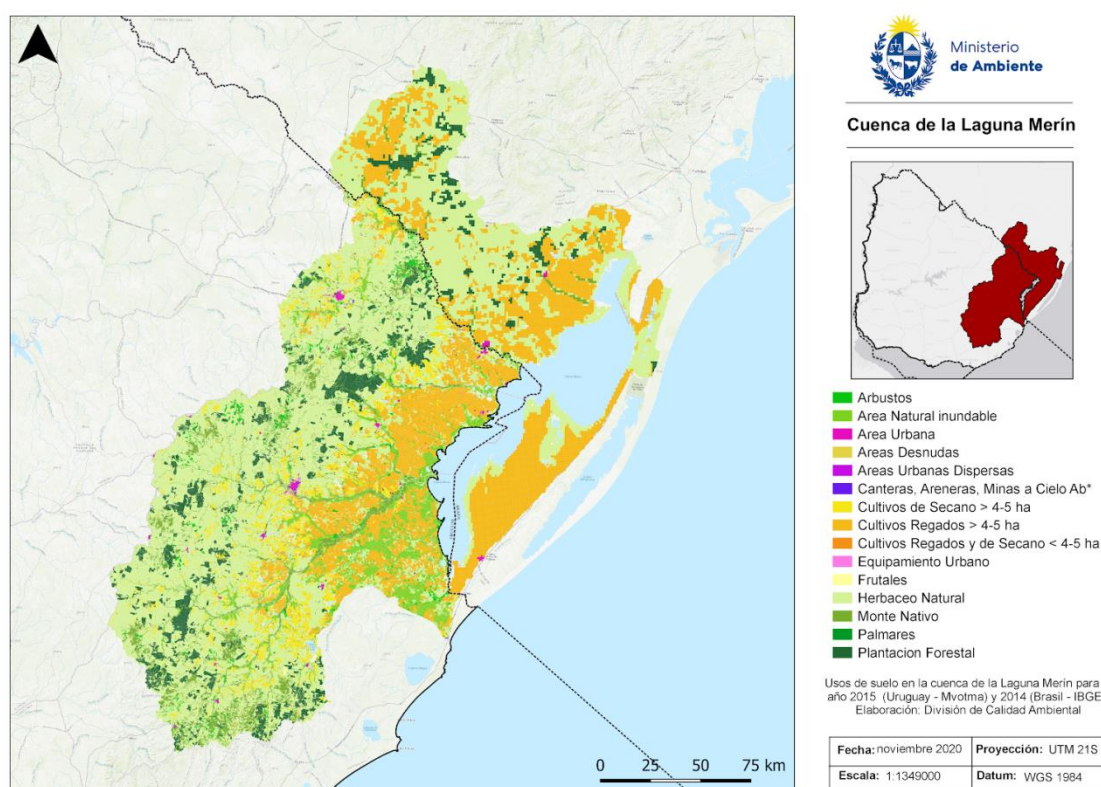


Figura 3.8: Usos del suelo en la cuenca de la Laguna Merín en el año 2015 (Uruguay) y 2014 (Brasil). Elaboración propia a partir de OAN (MVOTMA-DINAMA) e IBGE respectivamente.²

Dentro de la agricultura, el cultivo de mayor extensión en la cuenca fueron arroz (17,4 %) y secano (7,9%). Dichos cultivos no son independientes sino que es probable que muchos sean parte de un sistema de rotación. El 50% de la superficie cultivada de arroz en Uruguay se produce bajo un sistema de rotación con pasturas (INIA, 2020). En este esquema de rotación, el arroz ocupa un período de entre el 25 % y 30% de lo que dura la rotación, mientras que el resto del tiempo está ocupado por pasturas naturales regeneradas, siembra de praderas o provienen de un año de descanso. Los sistemas de producción basados en rotaciones

² Para compatibilizar la información de usos de suelo de Brasil con la de Uruguay en el mapa se consideraron como Cultivos Regados > 4 - 5 ha las categorías "Área Agrícola", "Mosaico de área Agrícola con Remanescientes Campestres" y "Mosaico de área Agrícola con Remanescientes Florestais". Además, "Mosaico de Vegetación Forestal con Actividad Agrícola" se consideró como Monte Nativo, el "Área Artificial" se consideró Área Urbana, "Área Descubierta" como "Áreas Desnudas", "Pastura Natural", "Pastura con Manejo" y "Vegetación Campestre" como Herbáceo Natural, "Silvicultura" como bosque artificial.

de monocultivos de arroz, es decir arroz sobre rastrojo de arroz, varían entre el 35-45% mientras que el arroz cultivado sobre rastrojo de soja varía entre el 5 y el 8% (INIA, 2020).

Dichos usos de suelo varían en las distintas regiones de la cuenca y en particular entre las distintas subcuencas de orden 2 (Figura 3.9). La subcuenca con mayor porcentaje de herbáceo natural fue la 43 mientras que la de menor cobertura natural fue la 42, con un alto porcentaje de cultivos regados. Esta última es la subcuenca de menor extensión y está íntegramente ubicada en la zona baja, cercana a la laguna.

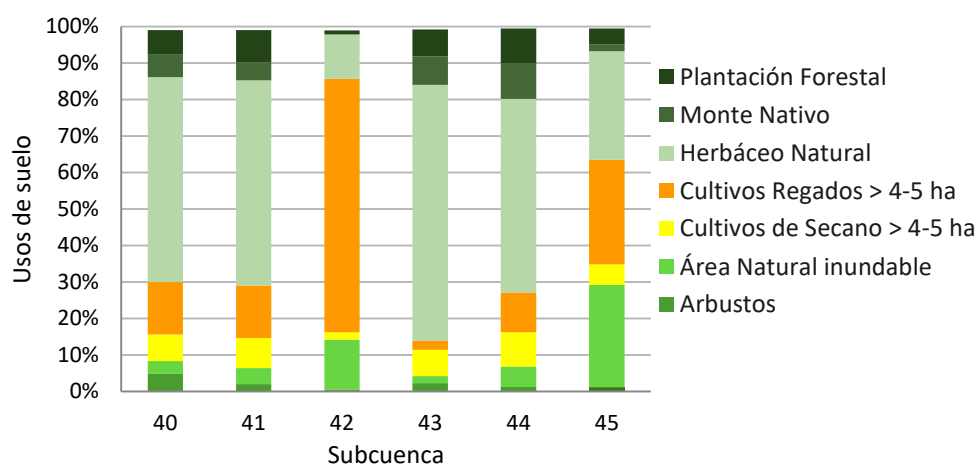


Figura 3.9 Porcentaje de los distintos usos de suelo en cada subcuenca de orden 2 (ver Figura 3.1) en la cuenca de la Laguna Merín para el año 2015 (Uruguay) y 2014 (parte brasilera de la cuenca 40). Elaboración propia a partir de OAN (MVOTMA-DINAMA) e IBGE respectivamente².

Los cultivos y principalmente el arroz, están asociados a modificaciones en la hidrología del ambiente para riego. Los cultivos de arroz requieren de canalizaciones para controlar la inundación de los mismos, que pueden ser complementados con pequeños o medianos embalsamientos de los ríos o arroyos. Dichos embalses pueden ser también utilizados para el riego de los cultivos de secano o abrevadero de ganado.

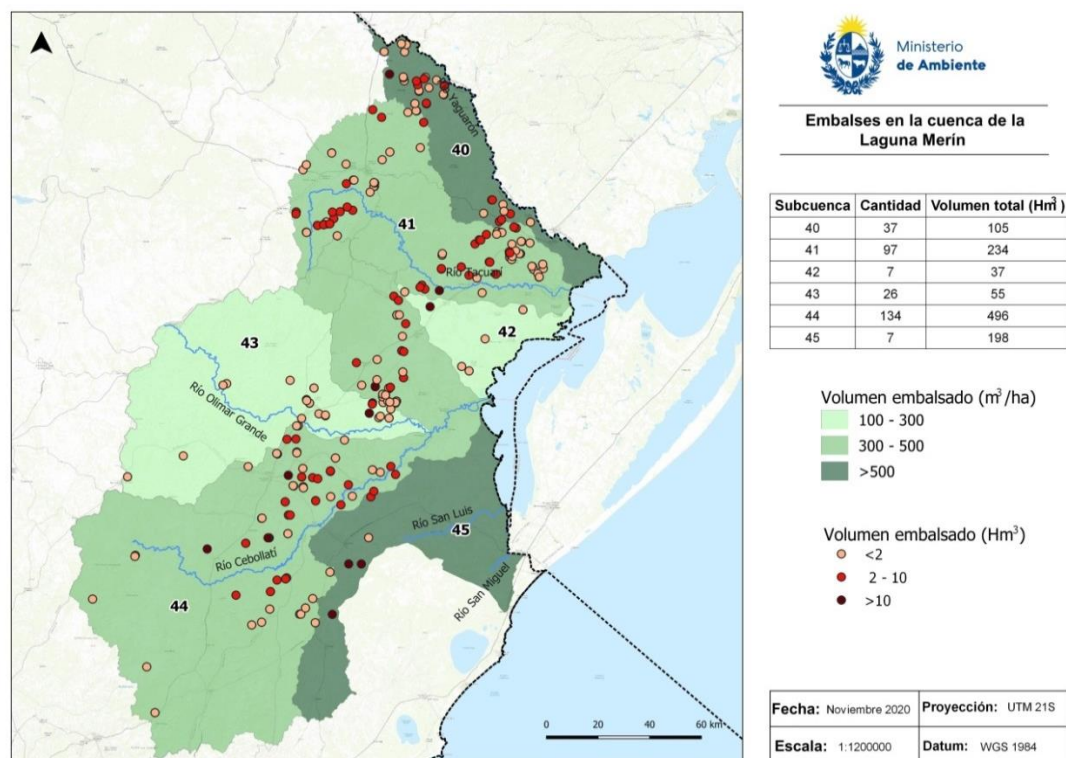


Figura 3.10 Localización de embalses para riego en la cuenca de la Laguna Merín, la escala de colores verdes informa el volumen embalsado por subcuenca de orden 2 y los puntos de colores el volumen contenido en cada embalse.

Por otro lado, la cuenca de la Laguna Merín (a excepción de la subcuenca 43) es de las regiones con mayor volumen de agua extraído directamente desde cursos de agua superficiales del país, mediante embalses y tanques (MVOTMA-DINAMA, 2013; Figura 3.10). A la vez la extracción de agua subterránea es baja (información de DINAMA, 2012).

La extracción superficial supera los 6 mm por unidad de área (volúmenes anuales asignados a cada obra dentro de cada subcuenca dividido por el área de la subcuenca, para el año 2012). A su vez, las zonas con mayor volumen embalsado dentro de cada subcuenca se concentran en la cuenca media, donde se concentra la agricultura (Figura 3.8). La extracción de agua más allá de un nivel sostenible pone en riesgo su disponibilidad futura, la integridad de los ambientes dulceacuícolas y los servicios ambientales que proveen (Soutullo *et al.*, 2012).

4. METODOLOGÍA

4.1. Programa de monitoreo

El programa se centró en los principales tributarios de la Laguna Merín en el territorio uruguayo, estos son los ríos Yaguarón, Tacuarí, Cebollatí, Olimar Grande y San Luis y el A° San Miguel (Figura 4.1) según el plan de monitoreo de DSCA. Hubo 15 estaciones de muestreo que incluyeron la zona próxima a la desembocadura de los tributarios de la laguna, la zona media y de la cuenca alta. Asimismo en la localización de las estaciones se buscó captar la influencia de las principales ciudades: Melo (T1), Treinta y Tres (O1) y Río Branco (Y3; Figura 3.1), así como de las actividades productivas predominantes en la cuenca de cada curso.

La metodología de trabajo utilizada se basó en el Programa internacional del Sistema Global de Monitoreo Ambiental (GEMS/Agua) y está documentada en el protocolo de monitoreo de la cuenca en estudio. Dichos protocolos se adaptaron a las capacidades nacionales disponibles de recursos humanos, equipos, materiales, técnicas, condiciones climáticas durante las campañas, etc. (descripción en detalle en Anexos I y II).

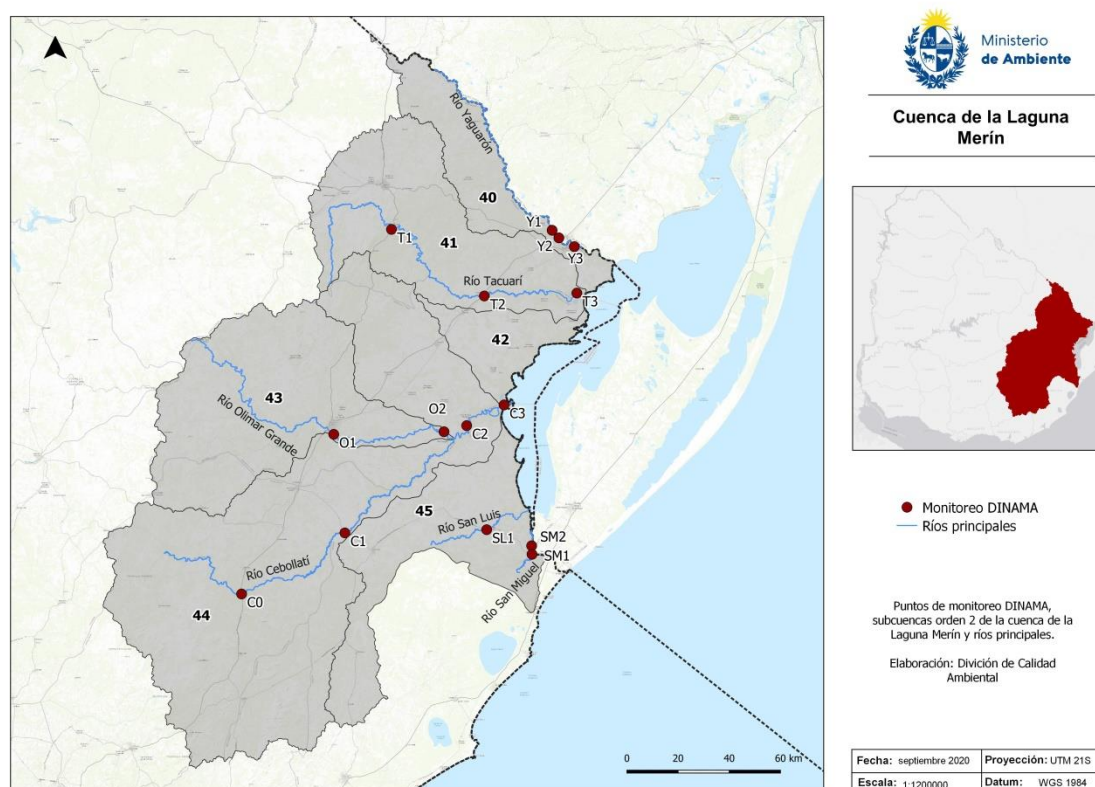


Figura 4.1. Localización de las estaciones de monitoreo en la cuenca de la Laguna Merín. Las líneas azules corresponden a cauces de agua, la línea punteada la división de los territorios uruguayo y brasileiro. Los números y líneas grises indican las subcuencas de orden dos (40 a 45) del lado uruguayo. Las estaciones de muestreo Y1-3 se ubican sobre el Yaguarón (fronterizo), T2-3 sobre el Tacuarí, O1-2 sobre el Olimar Grande, C0-3 se ubican sobre el río Cebollatí, SL1 sobre el río San Luis y SM1-2 sobre el A° San Miguel. Descripción de las estaciones en ANEXO I.

4.2. Parámetros de calidad de agua

Durante el período 2015-2019 en la cuenca en estudio se realizaron medidas *in situ* y se determinaron diferentes analitos en la matriz agua superficial, entre los cuales se incluyeron fitosanitarios y sus derivados. Para el presente informe se seleccionaron 16 parámetros³ priorizando los más relevantes para la calidad de agua (Tabla 1) y todos los fitosanitarios analizados.

³ La totalidad de los parámetros y sus resultados están disponibles en OAN y presentados en los informes anuales de esta cuenca (MVOTMA-DINAMA, 2017 y MA, 2021).

Se tomaron en cuenta los estándares de calidad de agua establecidos por la normativa, Decreto 253/79 y valores guía para los parámetros no incluidos en éste. Los valores guía de nitrógeno total (NT) se fijaron según la Mesa Técnica del Agua (2016), donde los cursos se clasifican en tres categorías según su caudal y desembocadura. Según la clasificación de MTA, todos los cursos de agua de esta cuenca se clasifican como “curso que desemboca en un ambiente léntico”, a excepción del río Olimar Grande que se clasifica como “curso de agua de orden 3 o mayor” (Tabla 1). Para otros parámetros se utilizó el valor guía propuesto por CARU (2019), que refiere al rango de valores observado en el río Uruguay (Tabla 1). Si bien los ríos de la cuenca en estudio pueden ser diferentes a los del río Uruguay y aún así tener buena calidad de agua, se los tomó a modo comparativo.

Las variables biológicas clorofila *a* (componente natural de las aguas) y coliformes termotolerantes (contaminantes biológicos) fueron determinadas en las estaciones de cierre de cuenca (Y3, T3, C3, O2, SM2 y SL1) y en el caso de TMF también las nacientes (T1, C0, O1). Para clorofila *a* se utilizó como valor guía la concentración que la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 1982) establece como con alta probabilidad de que el cuerpo de agua se encuentre en estado trófico de nivel eutrófico.

Tabla 1: Parámetros analizados en el programa de monitoreo de la cuenca de la Laguna Merín. Nombre de la variable, abreviatura, unidad y normativa vigente (valores del Decreto 253/79) o el valor guía considerado (todos los demás valores) con su referencias. Los parámetros sin valor de cumplimiento establecido se indican con “-”.

Parámetro		Abreviatura	Unidad	Normativa/Guía	
				Valor de cumplimiento	Referencia
Físicos y químicos	Oxígeno disuelto	OD	mg/L	≥ 5	Decreto 253/79
	Saturación de oxígeno	SatO2	%	-	-
	Potencial de hidrógeno	pH	-	> 6,5 y < 8,5	Decreto 253/79
	Conductividad	Cond	μS/cm	-	-
	Temperatura	Temp	°C	-	-
	Turbidez	Turb	NTU	≤ 50	Decreto 253/79
	Sólidos totales	ST	mg/L	≤ 100	CARU (2019)
	Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	≤ 30	CARU (2019)
Nutrientes	Nitratos	NO ₃	mg-N/L	-	-
	Nitritos	NO ₂	mg-N/L	-	-
	Amoníaco libre ⁽²⁾	NH ₃	mg-N/L	≤ 0,02	Decreto 253/79
	Nitrógeno total	NT	mg/L	< 0,5 en estaciones lénticos o desembocadura de sus tributarios < 1,0 en cursos de agua de orden 3 o mayor (Olimar Grande)	Mesa Técnica del Agua (2016)
	Ortofosfato	PO ₄	μg-P/L	-	-
	Fósforo total	PT	μg/L	≤ 25	Decreto 253/79
Biológicas ⁽¹⁾	Clorofila <i>a</i>	Cloa	μg/L	≤ 26	OCDE (1982)
	Coliformes termotolerantes	TMF	UFC/100mL	≤ 2000	Decreto 253/79

⁽¹⁾ Determinados en las estaciones cierre de cuenca más las de cabeceras en el caso de TMF.

⁽²⁾ Calculado a partir del nitrógeno amoniacal según CCME (2010).

Con respecto a los fitosanitarios, éstos fueron monitoreados en las estaciones de cierre de cuenca, al igual que los parámetros biológicos. Entre enero de 2015 y setiembre de 2019 se monitorearon 24 principios

activos, algunos incluidos en la normativa (Decreto 253/79) o en los documentos que sugieren valores guía (CARU, 2019 y GESTA Agua, 2016; Tabla 2). Los activos analizados que no están incluidos en dichos documentos fueron: AMPA (ácido aminometilfosfónico, producto de degradación de glifosato), dos productos de degradación del DDT (p'p'DDD y p'p'DDE), endosulfán sulfato, etión, y malatión. En particular AMPA no presenta valor guía en la literatura por su baja toxicidad en los niveles de concentración encontrados en agua potable (OMS, 2017).

Además, en la última campaña del período (diciembre de 2019) se agregaron 8 fitosanitarios más: fipronil, trifloxistrobina, diazinon, α cipermetrina, azoxistrobina, fluroxipir meptil, alaclor y trifluralin. De los cuales sólo alaclor tiene valor guía en la literatura (Tabla 2).

Tabla 2 Contaminantes orgánicos analizados con valor establecido en la normativa (Decreto 253/79) o guía en (A) CARU, 2019 y (B) GESTA Agua 2014).

Valor del Decreto 253/79 ($\mu\text{g/L}$)	
Aldrín y Dieldrín	La suma de ambos $\leq 0,004$
Clarodano cis y trans ⁽¹⁾	La suma de ambos $\leq 0,01$
DDT	$\leq 0,001$
Endosulfan α y β ⁽¹⁾	La suma de ambos $\leq 0,02$
Endrin	$\leq 0,004$
Heptacloro y Heptacloro epoxi ⁽¹⁾	La suma de ambos $\leq 0,01$
Lindano	$\leq 0,01$
Metoxicloro	$\leq 0,03$
Mirex	$\leq 0,001$
Valor guía ($\mu\text{g/L}$): CARU (A), 2019 y GESTA Agua 2014 (B)	
Alaclor ^B	$\leq 0,7$
Atrazina ^B	$\leq 1,8$
Clorpirifos ^B	$\leq 0,035$
Metil-paratión ^B	$\leq 0,04$
Glifosato ^B	≤ 65
Compuestos halogenados adsorbibles (AOX) ^A	≤ 25

⁽¹⁾ Isómeros conformacionales

4.3. Parámetros hidroclimáticos

Para evaluar la relación entre la calidad de agua y el caudal del cuerpo de agua, se utilizaron los datos de las 5 estaciones de monitoreo que cuentan con aforo de DINAGUA (T1, T2, O1, C0 y C1, Figura 4.2). El caudal de las demás estaciones fue estimado a partir del método de proporción de áreas, tomando como referencia los aforos del mismo curso de agua. No se contó con ningún aforo para los ríos Yaguarón y San Luis, ni el A° San Miguel, y por ende no se incluyeron tampoco valores estimados.

También se evaluó la influencia de las lluvias en la calidad de agua a partir del volumen acumulado de precipitaciones calculado a partir de los registros de 22 estaciones pluviométricas y meteorológicas de INUMET (especificaciones en ANEXO II) comprendidas en el área de interés. En una primera aproximación se calculó el volumen de precipitaciones acumulado mensual en el centroide de la cuenca para el periodo de

estudio (Figura 4.3). Luego dicho volumen fue calculado para el centroide de la cuenca de cada estación de monitoreo, mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado, para los 5, 10 y 30 días previos al muestreo de calidad de agua.

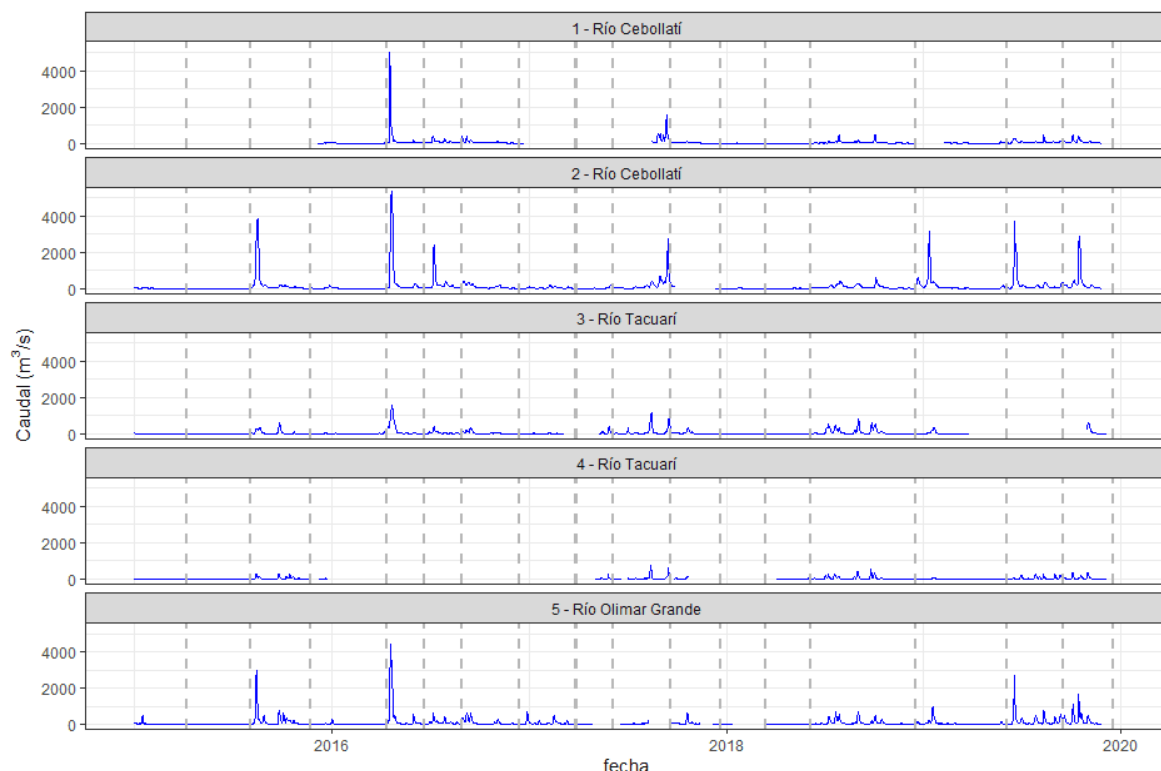


Figura 4.2 Caudales en la cuenca de la Laguna Merín para el período 2015-2019 en base a los aforos de DINAGUA, que corresponden a las estaciones C0, C1, T2, T1 y O1, aforos del 1 al 5 respectivamente. Las líneas puntuadas verticales indican los días de monitoreo. Especificaciones en Anexo II.

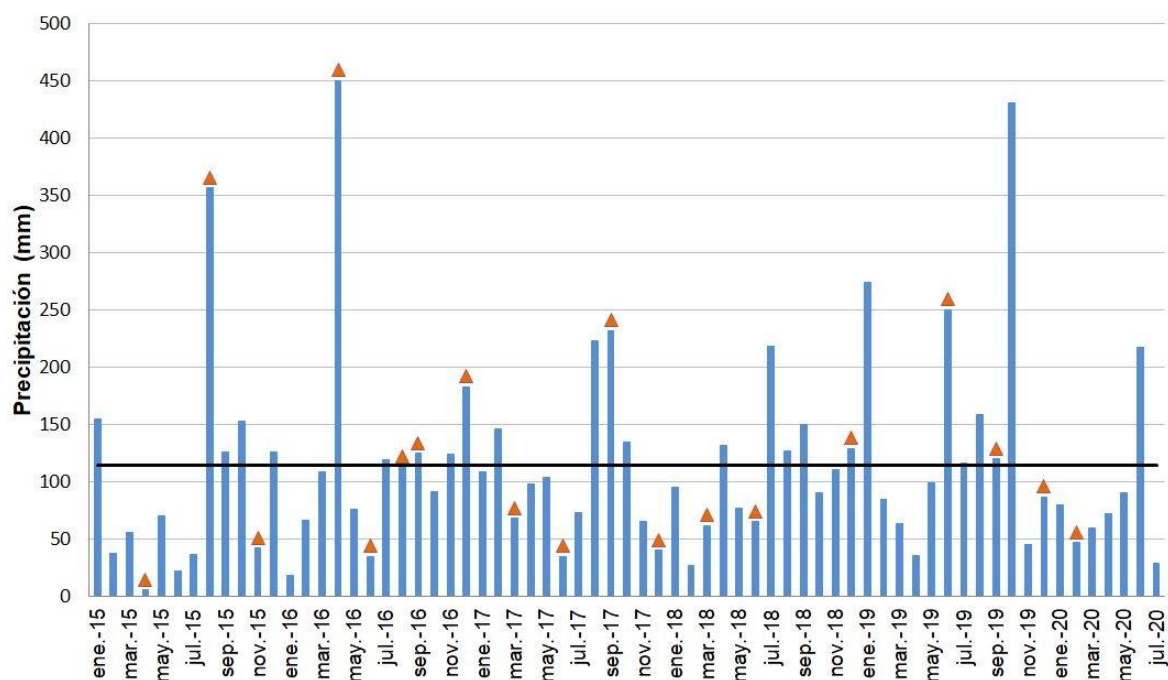


Figura 4.3 Precipitación acumulada mensual en el centroide de la cuenca de la Laguna Merín. La línea horizontal negra indica el promedio para los años con registro; los triángulos indican los meses donde se realizaron monitoreos de calidad de agua. Especificaciones en Anexo II.

4.4. Estimación de carga de nutrientes aportada por la cuenca

Se estimaron las cargas de NT y PT aportadas por las principales actividades de la cuenca para relacionarla con la calidad de agua en las estaciones de monitoreo. Se tomaron en cuenta los aportes difusos provenientes de los distintos usos de suelo, y los aportes puntuales provenientes de industrias, ciudades (domésticos) y actividades pecuarias (tambos y de establecimientos de ganado confinado, EGC).

4.4.1. Cargas difusas

Las cargas difusas se estimaron a partir del mapa de usos de suelo de los años 2015 (MVOTMA-DINOT, 2015) y el método de coeficientes de exportación (Perdomo, 2013). Dicho método calcula la carga a partir de el área destinada a un uso, multiplicado por un coeficiente de exportación empírico para cada uso. En este trabajo, de la sumatoria de los productos de los usos de suelo por sus correspondientes coeficientes de exportación, se calculó la carga total de NT y PT aportada a cada estación de monitoreo y a cada cierre de subcuenca orden 2. Por las características de la cuenca, los coeficientes de exportación utilizados para la cobertura agrícola fueron "cultivo de verano" para la categoría cultivos de secano < 4-5 ha y cultivos de secano y regados < 4-5 ha y "arroz" para cultivos regados > 4-5 ha.

Para las estaciones del río Yaguarón se incluyeron los aportes de la hemicuenca brasilera, calculados con la misma metodología antes descrita, a partir del mapa de usos de suelo de 2014 (IBGE, s/f). Para compatibilizar la información de usos de suelo de los mapas de Brasil y Uruguay, se consideraron como agrícolas las siguientes categorías: "Mosaico de área Agrícola com Remanescentes Campestres", "Mosaico de área Agrícola com Remanescentes Florestais" y "Mosaico de Vegetación Florestal com Atividade Agrícola". Además, el "Área Artificial" se consideró como "suelo desnudo urbano", "Pastagem com Manejo" como pastura, "Pastagem Natural" como campo natural y "Silvicultura" como bosque artificial.

Dado que en la hemicuenca brasiera no estuvieron diferenciados los tipos de cultivos, el porcentaje de agricultura arroceras se estableció en 22%, que fue valor reportado durante la zafra 2014/2015 para los municipios pertenecientes a la subcuenca del Yaguarón (IRGA, s/f).

4.4.2. Cargas puntuales

Las fuentes de nutrientes puntuales se calcularon sólo para la cuenca uruguaya y estas fueron: las industrias, los vertimientos de tratamiento de efluentes domésticos de centros poblados y los establecimientos pecuarios que cuentan con control de vertido por parte de DINAMA. Los establecimientos pecuarios incorporados fueron: cría intensiva de ganado vacuno confinado con destino a producción de carne (establecimientos de ganado confinado, EGC) y establecimientos lecheros (tambos).

Las cargas aportadas por las industrias fueron obtenidas de los informes ambientales de operación (IAOs) presentados a DINAMA por industrias ubicadas en la cuenca, que tuvieran vertido a curso de agua y que reportaran concentración de NT y PT. De las 28 industrias consideradas, 7 cumplieron con los criterios mencionados.

El aporte doméstico de nutrientes se obtuvo de los IAOs presentados por OSE ante DINAMA. Se seleccionaron aquellos centros poblados que reportaran el caudal y las concentraciones de PT y NT del vertido, éstos fueron: Melo, Río Branco, Treinta y Tres, José Pedro Varela, Lascano y Vergara, y fueron incluidas en el presente trabajo.

La estimación de aportes de los establecimientos lecheros se realizó a partir la información reportada por DICOSE 2015 y 2019 (MGAP, 2019). La carga de nutrientes se estimó a partir de la cantidad de animales por establecimiento y por código de enumeración, el tiempo de permanencia de los mismos en la sala de ordeño y datos teóricos de generación diaria de caudal y concentraciones de NT y PT (MVOTMA-DINAMA, 2008). Se asumió que los establecimientos con menos de 100 animales no realizan ningún tratamiento a sus efluentes, mientras que el resto realiza un tratamiento que remueve un 50% de NT y 0% de PT (MVOTMA-DINAMA, 2019).

La carga de los EGC fue estimada para cada subcuenca a partir del área de cada EGC, la concentración de nutrientes exportada reportada para este tipo de establecimientos en el país y una estimación del caudal. La concentración de nutrientes por animal utilizada fue el promedio de 6 establecimientos del país (MVOTMA-DINAMA, 2017a). Cabe destacar que el nitrógeno, reportado como nitrógeno total Kjeldahl, fue considerado equivalente a NT a pesar de que podría implicar una subestimación (no incluye nitratos ni nitritos). La estimación de caudal (Q , m^3 /mes) se estimó a partir del producto del escurrimiento por unidad de superficie (esc), la cantidad de animales por corral (n) y el área promedio de corral por animal (A , m^2).

$$Q = (esc / 1000) \times n \times A$$

El n se obtuvo de DICOSE 2016 y 2019 y el A se estimó a partir de la superficie por animal promedio (datos no publicados de DINAMA). El esc se estimó a partir de un balance hidrológico mediante el método de Témez (1977) utilizando la lluvia interpolada en el baricentro de cada subcuenca para el año correspondiente.

4.5. Índice estado trófico de las aguas

Para evaluar el estado trófico de cada estación de monitoreo se calculó el Índice de Estado Trófico (IET) para sistemas lóticos según Lamparelli (2004), para cada año, en base al fósforo total expresado en μg (PT) con la siguiente ecuación:

$$IET = 10^{\left\{6 - \left[\ln \left(\frac{80,32}{PT} \right) / \ln(2) \right] \right\}}$$

Se calculó el IET para cada dato de fósforo total y luego se realizó la media geométrica anual de cada estación de monitoreo, a partir de la cual se la clasificó en una de las 6 categorías establecidas (Tabla 3).

Tabla 3 Niveles tróficos definidos por el Índice de Estado Trófico (IET; Lamparelli, 2004) y la escala cromática correspondiente.

Nivel trófico	IET	Escala cromática
Ultraoligotrófico	≤ 47	
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$	
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$	
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$	
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$	
Hipereutrófico	> 67	

4.6. Análisis de datos

Algunos de los parámetros presentaron valores por debajo del rango de cuantificación de la técnica analítica utilizada, para facilitar el tratamiento de datos, éstos fueron transformados según: “<LD” sustituido por el valor de LD y “<LC” sustituido por LC/2, donde LD es el límite de detección y LC es el límite de cuantificación de la técnica analítica. Cuando el porcentaje de resultados no cuantificados en un set de datos dado fue mayor al 75% de los datos, éstos no fueron tomados en cuenta para el cálculo de promedios ni medianas (Croghan y Egeghy 2003). Los límites de cada técnica analítica están descritos en el Compendio de Metodologías Analíticas de Referencia y Preservación de Parámetros Ambientales, MVTOMA-DINAMA (2018). Los parámetros con resultados no cuantificables fueron: clorofila a , NH_4 (fueron transformados para el cálculo de NH_3), NO_3 , NO_2 , SST y fitosanitarios (se explicita cada caso en la sección de resultados). Para las tendencias de PO_4 no se consideraron los valores <LC.

Para describir el sistema en estudio se determinaron los rangos, el promedio y el desvío estándar de cada set de datos. Los resultados se representaron como diagramas de cajas, donde cada caja representa los

percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera del mismo señalan datos que posiblemente estén fuera de rango.

Para evaluar diferencias entre grupos de datos se realizaron ANOVAs de una vía cuando se cumplieron los supuestos de homocedasticidad (test de Levene) y distribución normal de los residuales (test de Shapiro-Wilk). De lo contrario se realizó el test no paramétrico de Kruskal Wallis y pos-hoc de Dunn. Mientras que para evaluar la relación entre dos variables continuas se realizaron regresiones lineales y correlaciones mediante el método de Rangos de Spearman dado que la gran mayoría de las variables no tuvo distribución normal; en la sección resultados se presentan el valor de la correlación (r_s) y su significancia, establecida en $\alpha = 0,05$ (significativo) y $\alpha < 0,01$ (altamente significativo). Para las regresiones se testeó además la autocorrelación (diagrama ACF).

Para evaluar qué variables ambientales explican la mayor parte de la variabilidad de los datos y poder inferir cuáles son las más influyentes sobre la calidad de agua, se realizaron análisis de componentes principales (ACP). Para dichos análisis se utilizaron las variables físicas y químicas determinadas en agua y la lluvia, las cargas estimadas en la cuenca de cada estación de monitoreo. Se partió de una selección de parámetros (pH, Cond, Turb, PT, PO_4 , NT, nitrato, ST y SOD) y luego fueron seleccionados aquellos cuyo aporte superara la media de aporte total y significativo a alguno de los dos ejes principales. Además, se quitaron las variables redundantes (con alta correlación entre ellas que se evidencia en igual o similar peso y significancia respecto al eje principal). Las cargas de NT y PT para cada tipo de aporte fueron en general redundantes y se seleccionó aquella de mayor aporte al eje. A su vez, las cargas de tambos y EGC (tanto de NT como de PT) fueron redundantes por lo que se sumaron y fueron incluidas como “carga de ganado”. No se consideró el dato extremo de PT en SL1 en 2016 (860 $\mu\text{g/L}$) ya que el ACP es sensible a este tipo de datos (Zuur *et al.*, 2007).

En un primer ACP se incluyeron todos los años y las cargas puntuales, mientras que en un segundo análisis se incluyó sólo el año 2015 y las cargas puntuales y difusas. En el ACP de 2015, para EGC se utilizaron las cargas de 2016, dado que no se contó con reportes de DICOSE para el 2015. En ambos ACP se incluyó además la lluvia acumulada en los 30 días previos al monitoreo.

Todos los análisis y gráficos fueron realizados en el software estadístico R (paquete tidyverse), los ACP se hicieron según la metodología de Husson *et al.* (2013; paquetes FactoMineR y factoextra).

5. RESULTADOS

5.1. Evaluación espacial y temporal de la cuenca

5.1.1. Variables físicas y químicas, y nutrientes

Dentro de las variables físicas y químicas, la **conductividad** en la cuenca de la Laguna Merín presentó valores en el rango de 43 y 376 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más elevados de la cuenca se registraron en el río Cebollatí, principalmente en las estaciones C0 y C1, y los menores en el río Yaguarón. Las demás estaciones fueron similares en cuanto a su conductividad (Figura 5.1).

El **pH** se mantuvo en el rango del estándar establecido por la normativa (límite superior = 8,5, límite inferior = 6,5) a excepción de algunos valores fuera de rango en los cursos Yaguarón, Olimar Grande y San Miguel que estuvieron por debajo del límite inferior (Figura 5.1). Mientras que el **oxígeno disuelto**, estuvo más comprometido en las estaciones del A° San Miguel, donde se observaron valores menores al límite del estándar del Decreto 253/79 y la menor mediana de la cuenca (6,7 $\mu\text{g}/\text{L}$).

Los **sólidos totales** (determinados únicamente en los años 2017-2019) superaron el valor guía para el río Uruguay sugerido por CARU (2019), de 100 mg/L , en la gran mayoría de las observaciones. Además, tuvieron una tendencia similar a la conductividad, las mayores medianas fueron observadas en la cuenca alta del Cebollatí (C0 y C1) y en San Miguel (Figura 5.1).

Con respecto a la concentración de nutrientes, hubo diferencias importantes entre subcuencas. La subcuenca del río Tacuarí se destacó por las altas concentraciones de nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y ortofosfato (PO_4 , Figura 5.1). La concentración de **PT** en dicha subcuenca fue significativamente superior a las demás ($X= 46,2$; $gl = 5$, $p < 0,001$), a excepción de la subcuenca del río San Luis, cuya mediana fue similar (140 y 150 $\mu\text{g}/\text{L}$ para San Miguel y Tacuarí respectivamente). Dentro de la subcuenca del Tacuarí, la concentración de PT en T1 fue significativamente mayor que en la estación T3 ($X= 71,8$; $gl = 14$; $p < 0,001$). Los menores valores registrados de PT tuvieron lugar en agosto de 2016 en el río Olimar Grande (O2, 10 $\mu\text{g}/\text{L}$) y en A° San Miguel (SM1, 23 $\mu\text{g}/\text{L}$), estas fueron las únicas dos observaciones que no superaron el máximo establecido en el Decreto 253/79 (25 $\mu\text{g}/\text{L}$). Mientras que el río San Luis presentó la máxima concentración de PT del periodo, 860 $\mu\text{g}/\text{L}$ en agosto de 2016.

El **PO_4** tuvo un comportamiento similar al de PT, con los máximos en la estación T1 del Tacuarí y en San Luis (Figura 5.1). La estación T1 se diferenció significativamente de todas las demás estaciones a excepción de las que están aguas abajo (T2 y T3) y de SL1 ($X= 101,0$; $gl = 14$; $p < 0,001$).

Además se observó que, a nivel de toda la cuenca, ambas formas de fósforo disminuyeron en 2019 respecto a 2018 (lo que también se observó en cada subcuenca, mostrado más adelante). La concentración de PT en 2019 fue la menor del periodo ($X= 17,1$, $gl = 4$; $p < 0,01$). Mientras que la concentración de PO_4 en 2019 fue similar a las de los años 2015-2017 y menor a la de 2018 ($X= 12,3$; $gl = 4$; $p < 0,05$).

En las cuencas de Yaguarón, Cebollatí y Olimar Grande se observaron valores más elevados de PT desde las nacientes hacia la desembocadura (aumentó la mediana), sin embargo en la cuenca del Tacuarí y en San Miguel sucedió lo opuesto (Figura 5.1).

La concentración de **NT** no presentó diferencias tan importantes como el fósforo entre las subcuencas, aunque también fue más elevada en Tacuarí (mediana=1,1 $\mu\text{g}/\text{L}$; Figura 5.1). El río San Luis (mediana=1,3 $\mu\text{g}/\text{L}$) y el arroyo San Miguel (mediana = 1,2 $\mu\text{g}/\text{L}$) presentaron concentraciones similares a las del Tacuarí, mientras que los ríos Olimar Grande y del Cebollatí presentaron medianas menores (0,63 y 0,65 $\mu\text{g}/\text{L}$ respectivamente). Asimismo, la concentración de NT no presentó diferencias entre los años analizados a nivel general de toda la cuenca.

De las formas disueltas de nitrógeno (no incluidos en el gráfico), la forma que más contribuyó al NT fue el **nitrito** (NO_2), que varió de forma importante entre las subcuencas. En San Miguel y San Luis un alto porcentaje de los resultados fueron menores al límite de cuantificación del método (41 y 29 % respectivamente). Mientras que en los demás ríos dicho porcentaje no superó el 25%. La máxima concentración de NO_2 observada fue de 1,4 mg/L en la estación T1, donde también se observó la mayor mediana de la cuenca (0,26 mg/L).

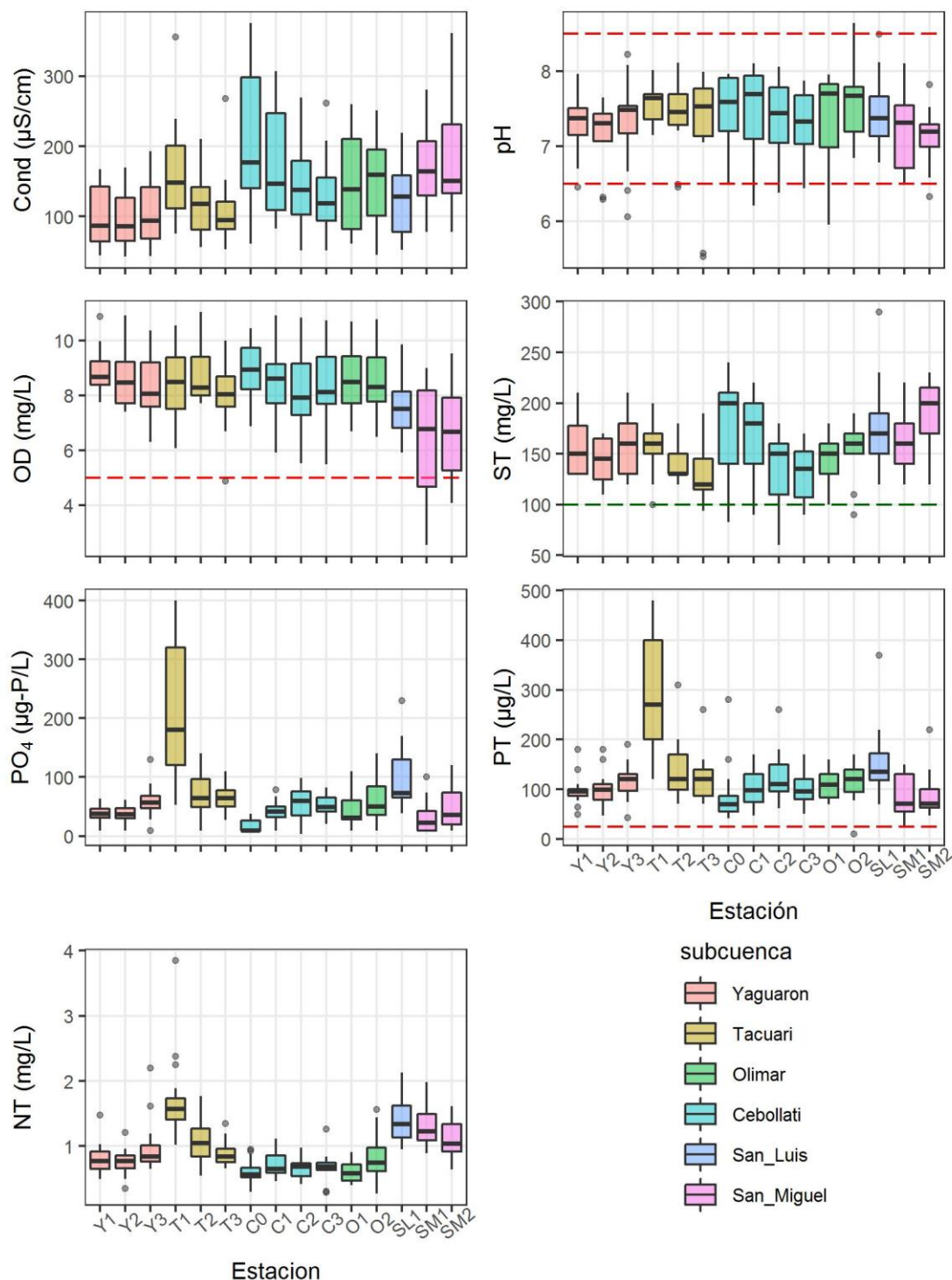


Figura 5.1 Variación espacial de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en la cuenca. De izquierda a derecha: Conductividad (Cond), pH, Oxígeno disuelto (OD), Sólidos totales (ST), Ortofosfato (PO_4), Fósforo total (PT; se excluyó el dato fuera de rango de SL1 de $860 \mu\text{g/L}$) y Nitrógeno total (NT). Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el $\text{RIQ} \times 1,5$ (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79, y las verdes valores guías sugeridos por CARU (2019). Los colores corresponden a las subcuencas.

El **nitrato** estuvo en bajas concentraciones en todos los casos (máximo = $87 \mu\text{g/L}$ en Tacuarí) y fue menor al límite de cuantificación del método en el 60 y 97 % de las observaciones, en Tacuarí y Cebollati respectivamente. Por el contrario, los valores más elevados fueron observados en diciembre de 2017 en

SM1, O1 e Y3 (75, 61 y 57 $\mu\text{g/L}$ respectivamente) y en 2018 y 2019 en la estación T1 (50 y 85 $\mu\text{g/L}$ respectivamente). A su vez, Tacuarí presentó la mayor mediana de la cuenca (11 $\mu\text{g/L}$).

Por último, el **amoníaco** libre estuvo entre 0 y 13 $\mu\text{g/L}$ (mediana = 0,49 $\mu\text{g/L}$), el máximo fue registrado en Y3 y es posiblemente sea un dato fuera de rango, dado que la mediana en esta estación fue de 0,45 $\mu\text{g/L}$.

5.1.2. Variables biológicas

La clorofila *a* estuvo siempre por debajo de 10 $\mu\text{g/L}$ (media = 2,14 $\mu\text{g/L}$) y por lo tanto, por debajo del máximo sugerido por OCDE (26 $\mu\text{g/L}$), a excepción de la estación O2 en el monitoreo de agosto de 2015 (27,6 $\mu\text{g/L}$; Figura 5.2).

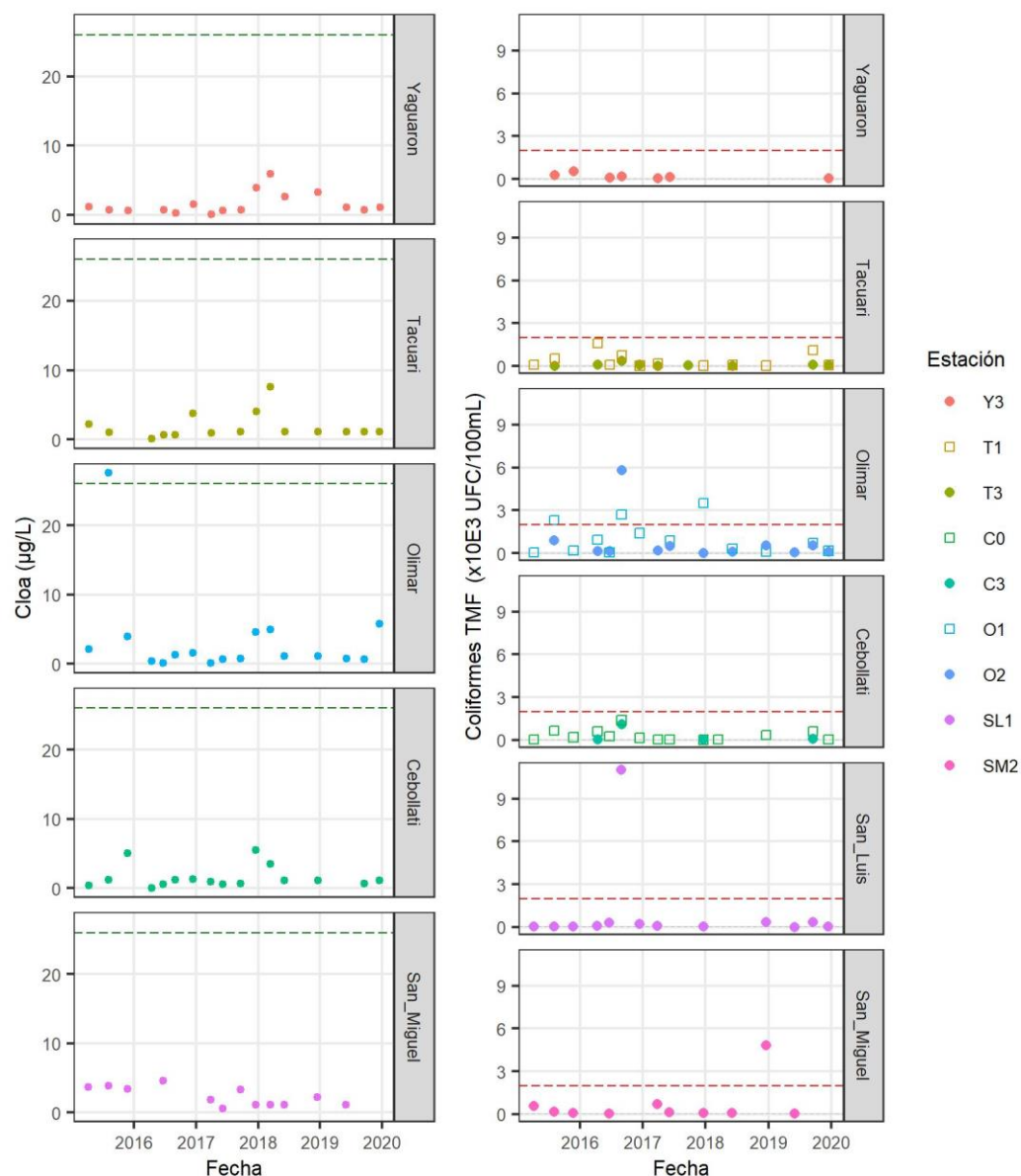


Figura 5.2 Variables biológicas en las estaciones de monitoreo de la cuenca de la Laguna Merín en el período 2015-2019. Clorofila *a* (Cloa, izquierda) y coliformes termotolerantes (TMF, derecha). La línea roja entrecortada indica el estándar del Decreto 253/79, y la verde el valor guía sugerido por OCDE (1982). Ambos parámetros se transformaron cuando no fueron cuantificables según se describe en metodología: para Cloa LD = 0,7 $\mu\text{g/L}$ y LC = 2,2 $\mu\text{g/L}$; para TMF LD = 3 UFC/100mL y LC = 20 UFC/100mL.

Por otro lado, los coliformes termotolerantes (TMF) estuvieron por lo general por debajo del máximo admitido por el estándar (2000 UFC/100mL; Figura 5.2). Sin embargo, hubo valores muy elevados en algunas

ocasiones. El máximo fue observado en SL1 (11000 UFC/100mL) superando ampliamente la mediana global (toda la cuenca, todo el periodo, mediana = 125 UFC/100mL). Dicho valor extremo fue acompañado del máximo valor de PT para la cuenca durante el periodo de monitoreo (agosto 2016; Figura 5.1). También fueron observados valores mayores al máximo permitido en O1, O2 y SM2.

5.1.3. Contaminantes orgánicos

Dentro de los compuestos orgánicos contaminantes, todos los activos correspondientes a fitosanitarios fueron detectados (valores >LD, límite de detección) al menos una vez durante los monitoreos (listado completo en sección 4.2), sin embargo muy pocos alcanzaron concentraciones mayores al límite de cuantificación del método (LC). Los activos cuantificados fueron: glifosato y su derivado AMPA, clorpirifos, metoxicloro y p'p' DDE (Figura 5.3), sin superar el límite estándar o los valores guía (Tabla 2). También se cuantificaron puntualmente fipronil y diazinon.

El glifosato presentó valores detectables⁴ en un 59 % del total de muestras analizadas (y cuantificable el 13 %), que ocurrieron en todas las estaciones de monitoreo, con excepción de Y3. El AMPA⁵, se detectó en el 22 % de los casos en todas las estaciones y el clorpirifos⁵ se detectó en un solo caso (T3 en agosto de 2015; 0,05 µg/L) de un total de 76 muestras, donde el 87 % fue menor al límite de detección y el 12 % menor al límite de cuantificación. El producto de degradación de DDT, p'p'DDE⁶ fue cuantificado en las 4 estaciones de monitoreo con un máximo de 0,01 µg/L en la campaña de diciembre de 2019. El metoxicloro⁷ alcanzó concentraciones cuantificables sólo en una ocasión en SM2 (0,032 µg/L). A su vez, en la campaña de diciembre de 2019 también se detectaron y cuantificaron fipronil (0,015 µg/L) y diazinon (0,052 µg/L) en la estación Y3.

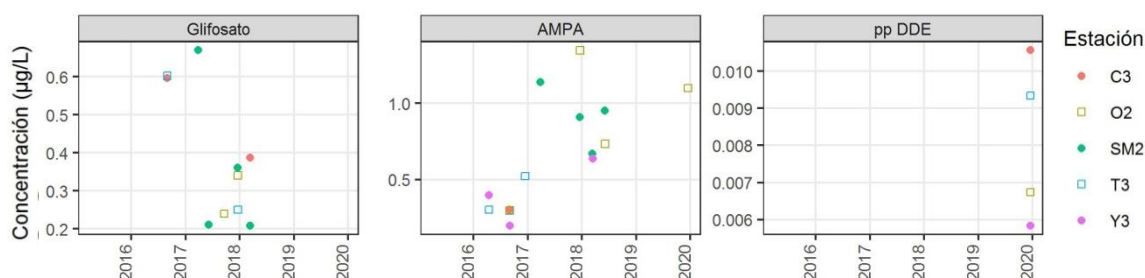


Figura 5.3 Fitosanitarios cuantificados (mayores al límite de cuantificación del método) en la cuenca de la Laguna Merín, en las estaciones monitoreadas, entre 2015 y 2019. Las observaciones por debajo del límite de cuantificación no se muestran y se describen en el texto.

Por otro lado, la concentración de **compuestos halogenados adsorbibles (AOX)** determinada en las estaciones al cierre de cuenca fue variable. A nivel general, dicha concentración superó el límite de cuantificación o detección del método (17 µg/L y 10 µg/L respectivamente) sólo en el 26% de las observaciones. Dentro de las estaciones monitoreadas, SM2 fue la que presentó mayor número de valores cuantificables e incluso la mayoría fueron superiores al máximo propuesto por CARU (2019; Figura 5.4). En dicha estación también se dio el máximo de la cuenca para el periodo de estudio (73 µg/L). Por el contrario, la estación T3 fue la de menor proporción de datos cuantificables, hubo sólo un valor cuantificado y fue mayor al máximo sugerido por CARU (2019).

Para AOX, 2015 fue el año con más casos cuantificados de todo el período, aunque el valor máximo se registró en 2017 (SM2; Figura 5.4). Dicho máximo fue observado en el mes de junio, mientras que los máximos en las demás estaciones ocurrieron en noviembre.

⁴ Glifosato y AMPA: LD = 0,1-10 µg/L y LC = 0,2-4,5 µg/L

⁵ Clorpirifos: LD 0,001-0,02 y LC = 0,002-0,003 µg/L

⁶ p'p'DDE: LD = 0,0004-0,0007 y LC=0,001 µg/L

⁷ Metoxicloro: LD = 0,008 y LC = 0,001 µg/L

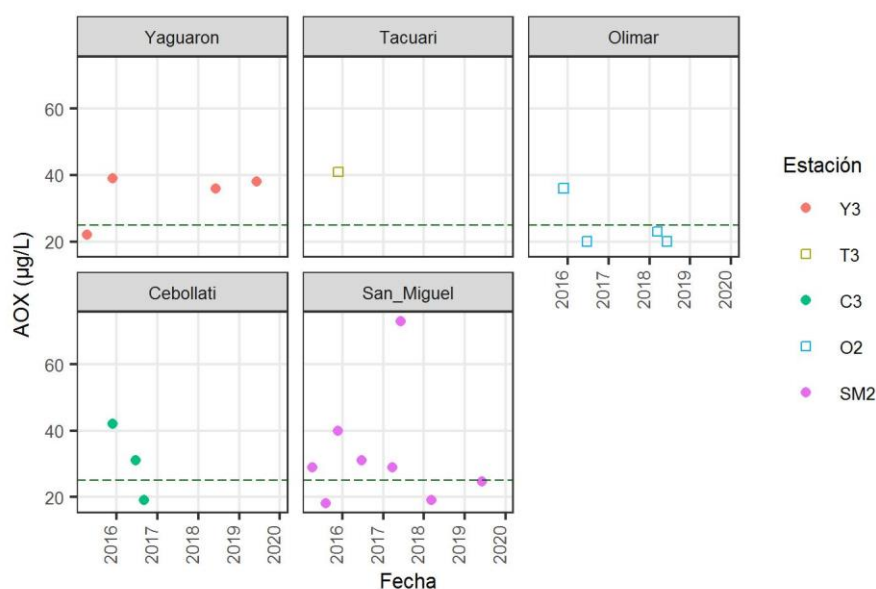


Figura 5.4. Concentración de compuestos halogenados adsorbibles (AOX) cuantificados en la cuenca de la Laguna Merín, en las estaciones monitoreadas, durante el periodo 2015-2019. La línea verde punteada corresponde al máximo sugerido por CARU (2019). Las observaciones por debajo del límite de cuantificación no se muestran y se describen en el texto.

5.1.4. Carga de nutrientes aportadas desde la cuenca

La **carga total** exportada por el territorio uruguayo hacia la Laguna Merín fue de 6855 t/año de NT y 1750 t/año de PT en 2015 (estimación de difusas más puntuales). A su vez, la carga total exportada varió entre subcuencas (datos no mostrados), siendo la de menor exportación la 42 (con 77 t/año de PT) y la de mayor exportación la 44 (río Cebollati) con 3108 t/año de NT y 786 t/año de PT, lo cual está muy influenciado por el área de las subcuencas. La subcuenca con mayor **carga exportada por unidad de superficie** fue la 41 (río Tacuarí), con 27 t/ha/año de NT y 7 t/ha/año de PT.

Del total de carga exportada, el aporte mayoritario fue el de origen **difuso**, que constituyó un 97 % (6649 t/año) del NT y un 96 % del PT (1680 t/año; Figura 5.5) en la hemicuenca uruguaya. Mientras que la carga difusa exportada desde la hemicuenca brasilera fue de 7441 t/año de NT y 1946 t/año de PT (estimado para 2014). Las subcuencas que exportaron mayor carga difusa de PT, en el año estudiado, fueron la 44 (754 t/año; río Cebollati) seguida de las cuencas 41 (283 t/año; río Tacuarí) y 43 (270 t/año; río Olimar Grande). Las cargas difusas de NT tuvieron un patrón similar, con mayor carga en la subcuenca 44 (3062 t/año) y luego en las subcuencas 43 (1221 t/año) y 41 (1130 t/año).

La carga total de nutrientes de aportes **puntuales** en la hemicuenca uruguaya, fue de 226 t/año de NT y 75 t/año de PT (mediana del periodo 2015-2019; Figura 5.6).

La carga puntual debido a aportes **domésticos** fue especialmente importante en aquellas subcuencas con grandes ciudades, la 41 (río Tacuarí; ciudad de Melo) y la 43 (río Olimar Grande, ciudad de Treinta y Tres) con 11,3 y 5,0 t/ha/año respectivamente (Figura 3.1; Figura 4.1). Dentro de estas subcuencas las estaciones especialmente afectadas fueron T1 y O1 (ubicadas aguas debajo de las ciudades), donde las cargas máximas de PT fueron de 11,8 y 11,2 t/año en el año 2019 y 2017 respetivamente. Otras estaciones afectadas por este tipo de aporte, pero con menores concentraciones fueron C1, C3 e Y3.

La intensidad de carga debida a los aportes de las **industrias** tuvo el mismo patrón que el de cargas domésticas, con el máximo en la subcuenca 42 (74,2 t/ha/año de NT y 9,3 t/ha/año de PT). La subcuenca 43 también presentó carga de industrias pero en menor medida (1,2 t/ha/año de NT y 0,4 t/ha/año) y las demás no presentaron industrias de aporte significativo.

La subcuenca con mayor carga debida a los **EGC** fue la 44 (río Cebollatí) y coincidió con la de mayor carga aportada por tambos. Ambas actividades sumaron un total de PT exportado de 30,7 t/ha/año en dicha subcuenca.

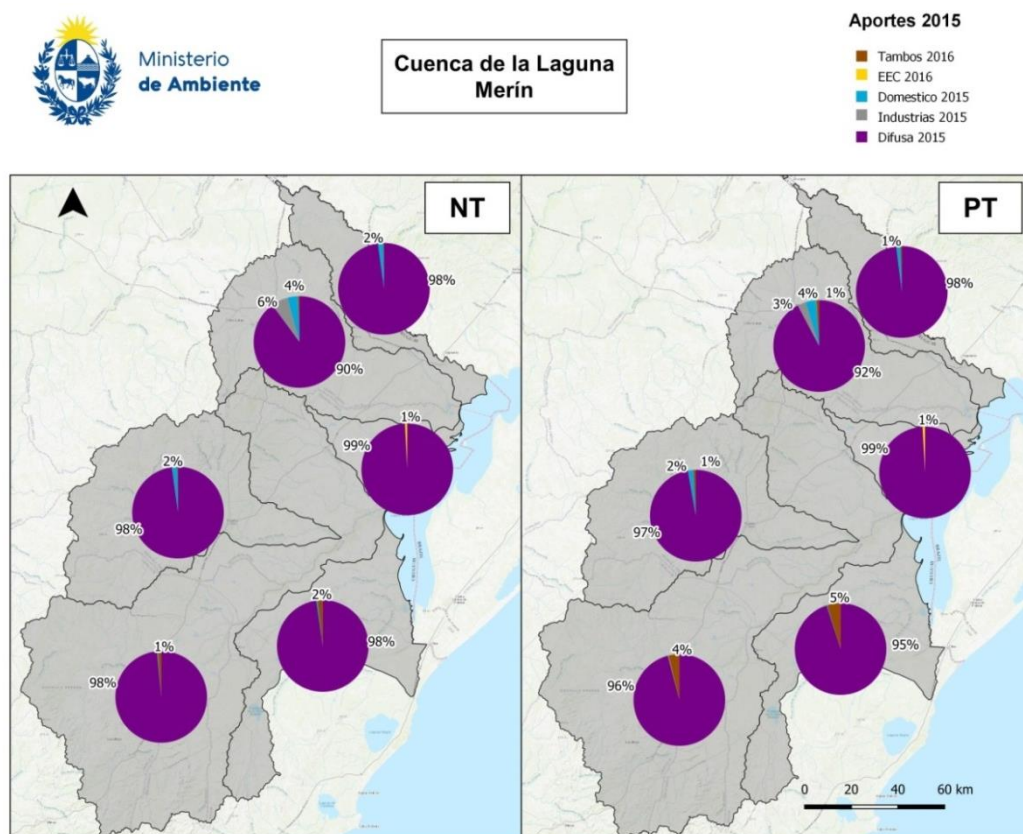


Figura 5.5. Aporte estimado de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) desde fuentes puntuales y difusas, en cada subcuenca orden 2 de la cuenca de la Laguna Merín, para el año 2015.

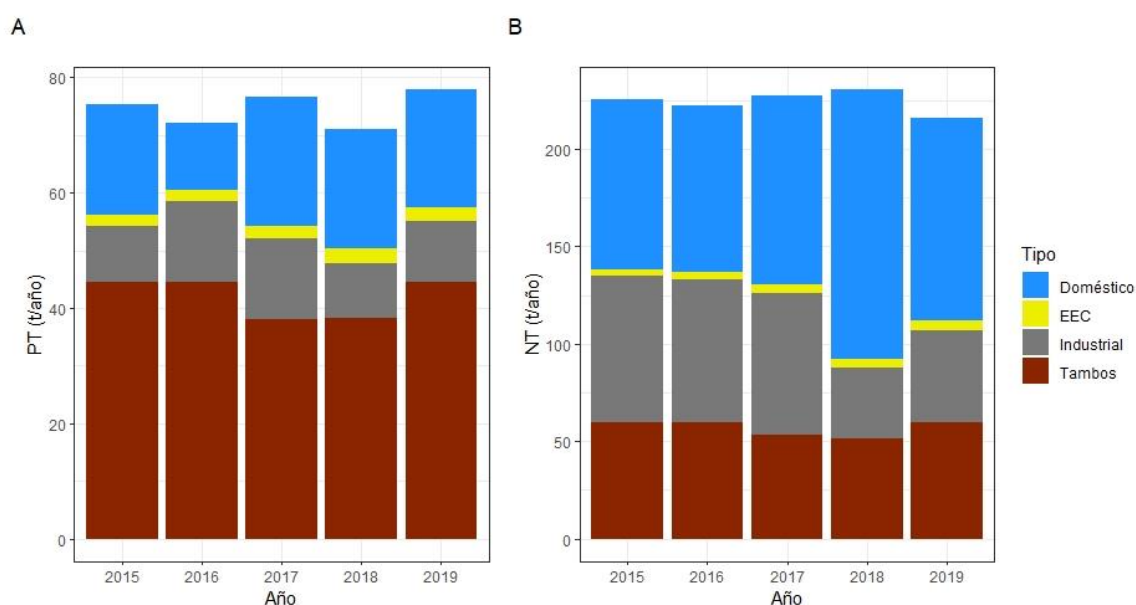


Figura 5.6 Carga anual de fósforo total (PT; A) y nitrógeno total (NT; B) aportada desde fuentes puntuales de la cuenca uruguaya a la Laguna Merín en el período 2015-2019. Los aportes de los EGC y de tambos en 2015 son los calculados a partir de datos de 2016.

No hubo variaciones importantes en las cargas puntuales entre años (mín-máx = 217-230 t/año de NT y 71-78 t/año de PT; Figura 5.6). Sin embargo, hubo pequeños cambios en la carga de PT aportada por los establecimientos de ganado confinado (EGC), ésta fue mayor en los últimos años (2,5 t/año en 2018 y 2019) respecto a 2016 (1,9 t/año). Los aportes domésticos también aumentaron en 2019 respecto a 2015 aunque en menor medida (19,3 y 20,3 t/año de PT en 2015 y 2019 respectivamente) y este fue más pronunciado en NT (87,0 y 104,0 t/año de NT en 2015 y 2019 respectivamente). La carga aportada por las industrias fue 14 t/año de PT y 74 t/año de NT (medianas 2015-2019).

5.2. Evaluación espacial y temporal por subcuenca

5.2.1. Río Yaguarón (subcuenca 40)

La **conductividad** en el río Yaguarón varió entre 43 y 193 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y fue donde se observó el mínimo valor de toda la cuenca, que correspondió a la estación Y2 en abril de 2016 (Figura 5.7 A). Mientras que el **pH** estuvo comprendido entre 6,06 y 8,22, los valores por fuera del rango de la normativa del Decreto 253/79 se observaron en las tres estaciones de monitoreo en los años 2017 y 2019. El último año el pH presentó la menor mediana del periodo de estudio (6,67).

El **oxígeno disuelto** (OD) presentó un rango de 6,3 a 10,9 mg/L (Figura 5.7 C) y estuvo siempre por encima del mínimo del Decreto 253/79. En cambio la **turbidez** presentó valores que superaron el máximo de dicha normativa en los dos años en que fue monitoreada, con valores de hasta 73,9 UNT (Figura 5.7 D).

Por otro lado, el rango de concentración de **sólidos totales** (ST) para esta subcuenca fue de 110-210 mg/L (Figura 5.7 E). Dicho parámetro estuvo siempre por encima del máximo recomendado por CARU (2019) de 100 mg/L.

Ninguno de los parámetros antes mencionados presentó diferencias significativas entre los años.

Respecto a los nutrientes, la concentración de **ortofosfato** (PO_4) estuvo entre valores muy bajos (menores al límite de cuantificación, LC, de 18 $\mu\text{g}/\text{L}$) y elevados (130 $\mu\text{g}/\text{L}$) respecto a la mediana general de la cuenca (49 $\mu\text{g}/\text{L}$; Figura 5.7). Los valores más bajos fueron observados durante los primeros años del período, los valores <LC se dieron en abril de 2016, en las tres estaciones de monitoreo y en 2017 en Y2. Mientras que los valores más altos de PO_4 fueron observados en los últimos años, en 2018 la concentración de este nutriente fue significativamente mayor que los demás años ($X=14,2$; $gl=4$; $p<0,01$).

Por otro lado, la concentración de **fósforo total** (PT) no se diferenció entre años ni presentó tendencias significativas en el tiempo, en ninguna de las estaciones del río Yaguarón (Figura 5.1 G). Mientras que la concentración de **nitrógeno total** (NT) estuvo en el rango de 0,4 y 2,2 mg/L y fue significativamente superior en los años 2018 y 2019 ($X=21,5$; $gl=4$; $p<0,01$; Figura 5.7 H).

La temperatura, tuvo una variación estacional y se mantuvo en un rango esperable para estas latitudes (11,1 a 26,6 °C; Figura 5.7 I).

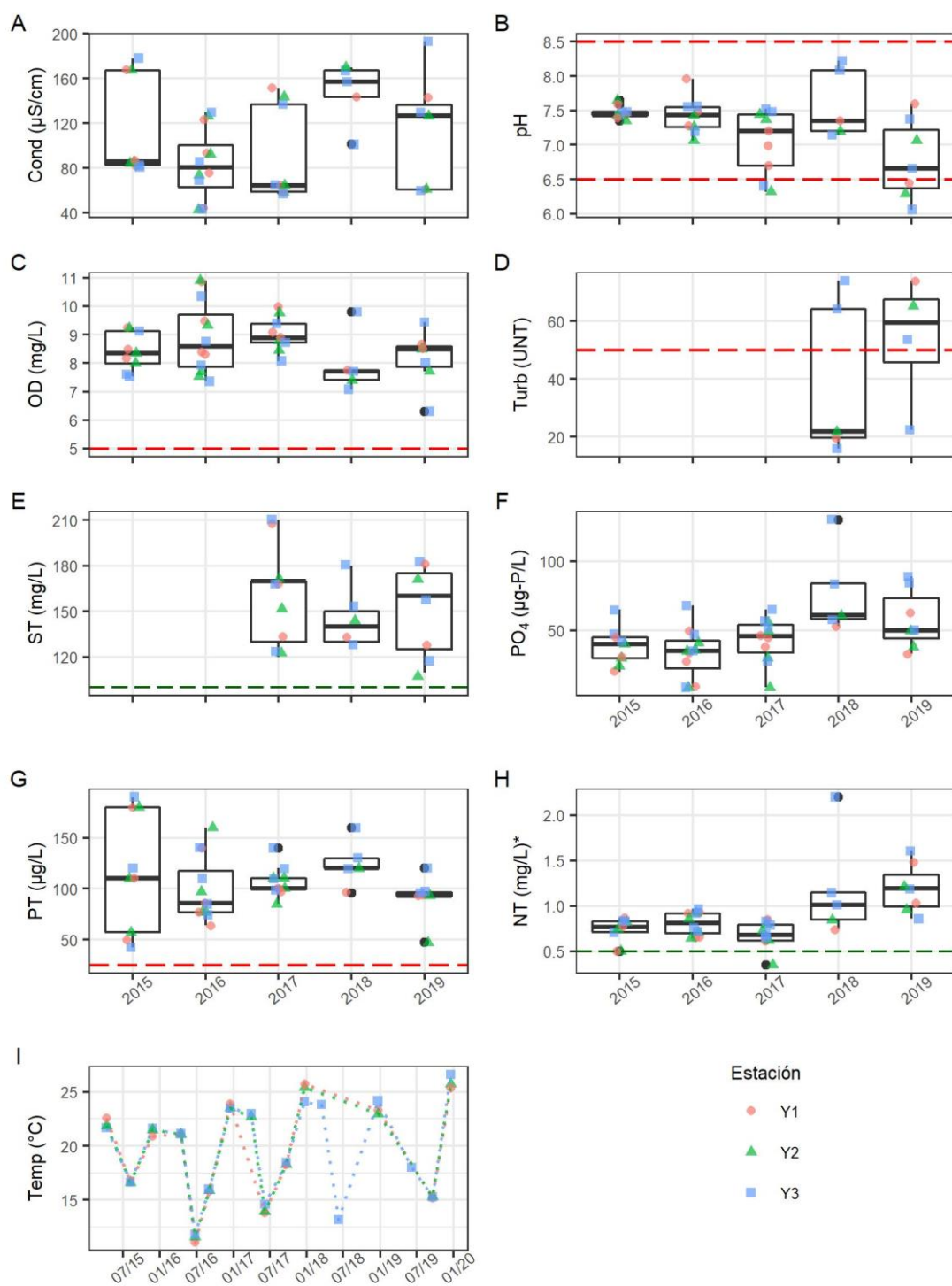


Figura 5.7. Variación temporal de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en el río Yaguarón. A) Conductividad, B) pH, C) Oxígeno disuelto, D) Turbidez, E) Sólidos totales, F) Ortofosfato, G) Fósforo total, H) Nitrógeno total, I) Temperatura. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el $\text{RIQ} \times 1,5$ (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 y las verdes los valores-guía descritos en la Tabla 1.

5.2.2. Río Tacuarí (subcuenca 41)

La **conductividad** en el río Tacuarí varió entre 50 y 356 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los máximos valores fueron observados en los años 2016 a 2019 en la estación T1, sin embargo, no hubo diferencias significativas entre estaciones (Figura 5.8).

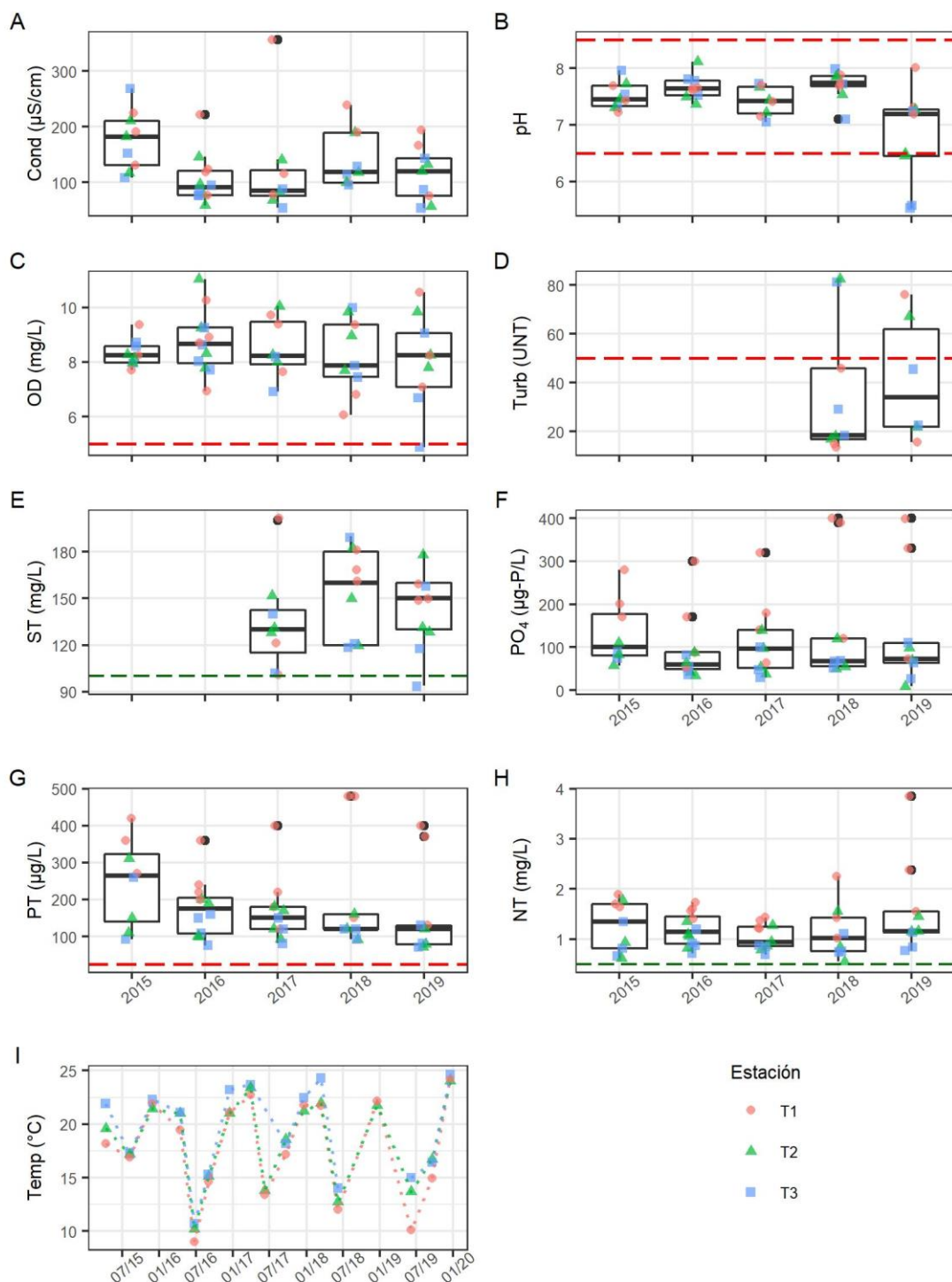


Figura 5.8. Variación temporal de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en el río Tacuarí. A) Conductividad, B) pH, C) Oxígeno disuelto, D) Turbidez, E) Sólidos totales, F) Ortofosfato, G) Fósforo total, H) Nitrógeno total, I) Temperatura. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el $\text{RIQ} \times 1,5$ (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 y las verdes los valores guía, descritos en la Tabla 1.

En cambio, hubo diferencias significativas entre los años, siendo en 2015 mayor que en 2016 ($X = 11,1$; $gl=4$; $p<0,05$), los demás años no se diferenciaron entre sí.

El **pH** también tuvo cambios importantes en el tiempo, a pesar de mantenerse en valores similares entre los años 2015 y 2018, en 2019 se observaron valores dentro del rango establecido por la normativa, en las estaciones T2 y T3 (muestreos de setiembre y diciembre; Figura 5.8 B). De forma similar, la concentración de **OD** fue similar entre 2015 y 2018, mientras que en 2019 el rango de valores fue más amplio, con un valor similar al mínimo establecido por la normativa (≤ 5 mg/L) en la estación T3 (4,88 mg/L en diciembre).

La **turbidez** (determinada en 2018 y 2019) estuvo generalmente acorde a la normativa (<50 UNT; Decreto 253/79) y en algunas ocasiones fue más elevada (Figura 5.8 D). Los máximos en T2 y T3 se registraron en noviembre, mientras que en T1 fue en diciembre. La turbidez del periodo analizado fue significativamente mayor en T1 que en T3 ($X = 5,10$; $gl=1$; $p<0,05$). A su vez, este parámetro no estuvo correlacionado con ST, pero sí con los sólidos suspendidos totales ($S = 22$; $\rho = 0,74$; $p<0,05$).

Por su parte, la concentración de **ST** fue similar en todos los años y en todas las estaciones y estuvo por encima del valor máximo de referencia de CARU (2019) de 100 mg/L (Figura 5.8 E), a excepción de T3 en diciembre de 2019 (94 mg/L). También hubo dos valores cercanos al valor guía en setiembre de 2017 (T1 y T3). El máximo fue observado en T1 en diciembre de 2017.

Los nutrientes en esta subcuenca fueron elevados respecto a las demás, la concentración de **PO₄** varió entre 27 y 400 $\mu\text{g/L}$ y el **PT** entre 71 y 480 $\mu\text{g/L}$ (Figura 5.8 F y G). El máximo de **PO₄** fue observado en 2019, mientras que la mayor mediana fue en 2015. De forma similar el máximo observado de **PT** fue en 2018 mientras que la mayor mediana se dio en 2015. A su vez, la concentración de **PT** en T2 y T3 estuvo correlacionada con la concentración de **ST** ($S=231,34$; $\rho=0,72$; $p<0,01$).

En cuanto a la variación temporal, el **PT** presentó una tendencia a la baja en la estación T2 ($F_{1,15}=5,7$; $R^2_{aj}=0,23$; $p<0,05$), aunque ésta estuvo fuertemente influenciada por el máximo observado (310 $\mu\text{g/L}$ en agosto de 2015). Los días previos al monitoreo donde se registró dicho máximo tuvo una lluvia acumulada elevada (50,6 mm^3) en comparación a la mediana para esta estación (6,0 mm^3).

Por otro lado, cabe destacar que en las tres estaciones de este río, ambas formas de fósforo estuvieron asociadas de forma lineal positiva (T1: $F_{1,15}=40,29$; $p<0,001$; $R^2_{aj}=0,71$; T2: $F_{1,15}=8,76$; $p<0,01$; $R^2_{aj}=0,33$ y T3: $F_{1,13}=8,45$; $p<0,05$; $R^2_{aj}=0,33$). A su vez, T1 fue la estación con mayor concentración de ambas formas de fósforo (**PO₄**: $X = 20,0$; $gl=2$; $p<0,01$ y **PT**: $X = 22,4$; $gl=2$; $p<0,001$). Las demás estaciones no presentaron diferencias entre ellas.

La concentración de **NT** varió entre 0,55 y 3,85 mg/L (Figura 5.8 H) y su mediana fue disminuyendo desde 2015 a 2017 para luego volver a aumentar en 2018 y ser máxima en 2019 (2,38 mg/L). A nivel de estaciones, T1 fue, al igual que en el caso del fósforo, la estación con mayores concentraciones de **NT** ($X = 25,88$; $df=2$; $p<0,001$) siendo ésta donde se observaron todos los máximos anuales.

Finalmente, la **temperatura** mostró un ciclo estacional esperable para estas latitudes y se encontró un rango natural, entre 9 y 24,7°C (Figura 5.8 I). No hubo diferencias entre años ni entre estaciones.

5.2.3. Río Olimar Grande (subcuenca 43)

El rango de **conductividad** para esta subcuenca fue entre 44,8 y 260 $\mu\text{S/cm}$ (mediana = 145 $\mu\text{S/cm}$; Figura 5.9 A). Los máximos para las tres estaciones fueron observados en 2015.

El **pH** presentó valores por fuera del rango de la normativa, por encima del máximo admitido en 2015 (8,64 mg/L en agosto) y por debajo del mínimo en 2019 (5,95 mg/L; O1 en setiembre; Figura 5.9 B). A su vez, hubo diferencias significativas entre esos dos años, siendo el pH en 2015 superior al del 2019 ($X = 7,5$; $gl=1$; $p<0,01$). Las estaciones no presentaron diferencias significativas en cuanto a este parámetro.

La concentración de **OD** estuvo siempre por encima de 5 mg/L (mínimo establecido en el Decreto 253/79), el máximo (10,2 mg/L) fue observado en O2 en noviembre de 2015 (Figura 5.9 C). Este parámetro no presentó variaciones entre años ni entre las estaciones.

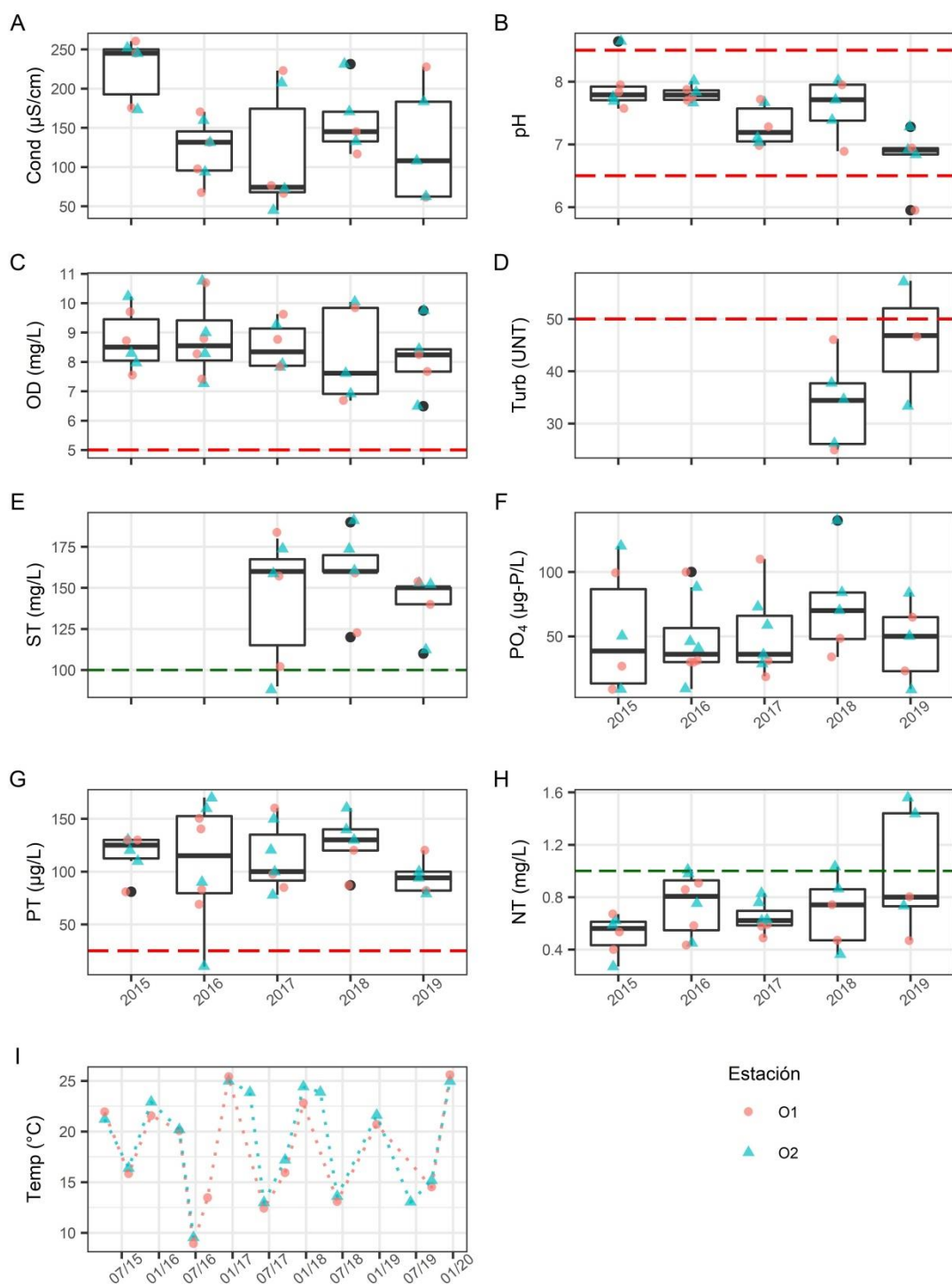


Figura 5.9. Variación temporal de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en el río Olimar Grande. A) Conductividad, B) pH, C) Oxígeno disuelto, D) Turbidez, E) Sólidos totales, F) Ortofosfato, G) Fósforo total, H) Nitrógeno total, I) Temperatura. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 y las verdes los valores guía, descritos en la Tabla 1.

La **turbidez** estuvo comprendida entre 25 y 57 UNT (mediana = 36 UNT) y fue en general menor al máximo establecido en la normativa a excepción de la estación O2 en setiembre de 2019 (57,3 UNT; Figura 5.9 D). La mediana obtenida en el año 2019 fue mayor a la del 2018 (34,4 y 46,8 UNT respectivamente) aunque no se diferenciaron significativamente. No hubo diferencias significativas entre estaciones respecto a la turbidez.

La concentración de **ST** estuvo comprendida entre 90 y 190 mg/L, todos los valores, a excepción de O2 en setiembre de 2017, estuvieron por encima del valor guía propuesto por CARU (2019; Figura 5.9 E). Éste parámetro tampoco no varió entre año ni entre estaciones.

Los nutrientes del río Olimar Grande fueron bajos en relación a toda la cuenca. El rango de concentración de **PO₄** fue de 18 a 140 µg/L, con una mediana de 46 µg/L (Figura 5.9 F). El máximo se observó en O2 en junio de 2018. El **PT** presentó un máximo de 170 µg/L y un mínimo menor de 10 µg/L, éste último cumplió con el Decreto 253/79 de 25 µg/L (Figura 5.9 F). Ninguna de las formas de fósforo presentó diferencias entre años ni entre estaciones en esta subcuenca.

La concentración de **NT** estuvo comprendida entre 0,27 y 1,56 mg/L y presentó cambios a lo largo del período. La mediana de este nutriente aumentó un 43 % entre 2015 y 2019 ($F_{1,9}=5,73$; $p<0,05$; $R^2_{aj}=0,32$; Figura 5.9 H). En el último año se observaron valores muy por encima del valor guía propuesto por la Mesa Técnica del Agua (1 mg/L; Tabla 1) en la estación O2. A su vez, dicha estación presentó una tendencia al aumento de NT, a una tasa de 0,15 mg/L anual ($F_{1,15}=10,0$; $p<0,01$; $R^2_{aj}=0,36$).

La **temperatura** estuvo comprendida entre 8,9 y 25,6 °C y presentó la variabilidad estacional esperada (Figura 5.9 I).

5.2.4. Río Cebollatí (subcuencas 44 y 43)

La **conductividad** en el Río Cebollatí en el periodo de estudio varió entre 51,3 y 376 µS/cm (Figura 5.10 A). La mediana de dicho parámetro disminuyó desde las nacientes hacia la desembocadura. En el mismo sentido, la conductividad en C0 fue significativamente mayor a la observada en C3 ($X = 4,23$; $df=1$; $p<0,05$; Figura 5.1).

El **pH** varió entre 6,21 y 8,1 (Figura 5.10 B), los valores fuera del rango del Decreto 253/79 se observaron en C2 y C3 en 2017 y en C1 en 2019, este último correspondió al mínimo del periodo. La menor mediana, al igual que el mínimo, fue observada en el año 2019.

La concentración de **OD** estuvo siempre por encima del mínimo establecido por el Decreto 253/79 y varió entre 5,5 y 10,9 mg/L (Figura 5.10 C).

La **turbidez** estuvo en general por debajo del límite superior establecido en el Decreto 253/79, los dos valores superiores a éste fueron en C1 en 2018 y 2019 (Figura 5.10 D). El máximo valor de turbidez observado se apartó de la media más de dos desvíos estándar, por lo que podría llegar a ser un dato fuera de rango.

Los **sólidos totales** estuvieron generalmente por encima del límite superior recomendado por CARU (2019), con un máximo en C0 de 240 mg/L en 2017. Las estaciones más cercanas a las nacientes, C0 y C1 tuvieron mayor mediana que las ubicadas aguas debajo de la desembocadura del río Olimar Grande (C2 y C3) pero no se diferenciaron significativamente.

Ninguno de los parámetros anteriores (cond, pH, OD y ST) presentó diferencias entre años ni entre estaciones.

El **PO₄** presentó valores por debajo del límite de cuantificación del método (LC) en las estaciones C0 (65% <LC, con 1 valor <LD), C1 (12%) y C2 (6%, que corresponde a un sólo valor < LD). Los valores <LC fueron observados en todos los meses, por lo que no presentaron un patrón particular. A su vez, la concentración de PO₄ estuvo asociado significativamente con PT ($F_{1,50}=10,77$; $p<0,001$; $R^2_{aj}=0,16$; intercepto=4,3; pendiente=0,01; se usó Ln(PT) y no se consideraron los valores <LC).

La concentración de **PT** varió entre 41 y 280 µg/L, los máximos en las tres estaciones fueron observados en el año 2016, aunque en distintas campañas de monitoreo. La mediana en 2018 fue mayor que los años anteriores, sin embargo sólo se diferenció significativamente del año 2019 ($X = 5,19$; $gl=1$; $p<0,05$; Figura 5.10 F), que presentó la menor mediana del periodo. A su vez, hubo diferencias importantes también entre las estaciones de monitoreo, la concentración de PT en C0 fue menor que en las demás estaciones ($X = 27,87$; $gl=3$; $p<0,01$; Figura 5.1).

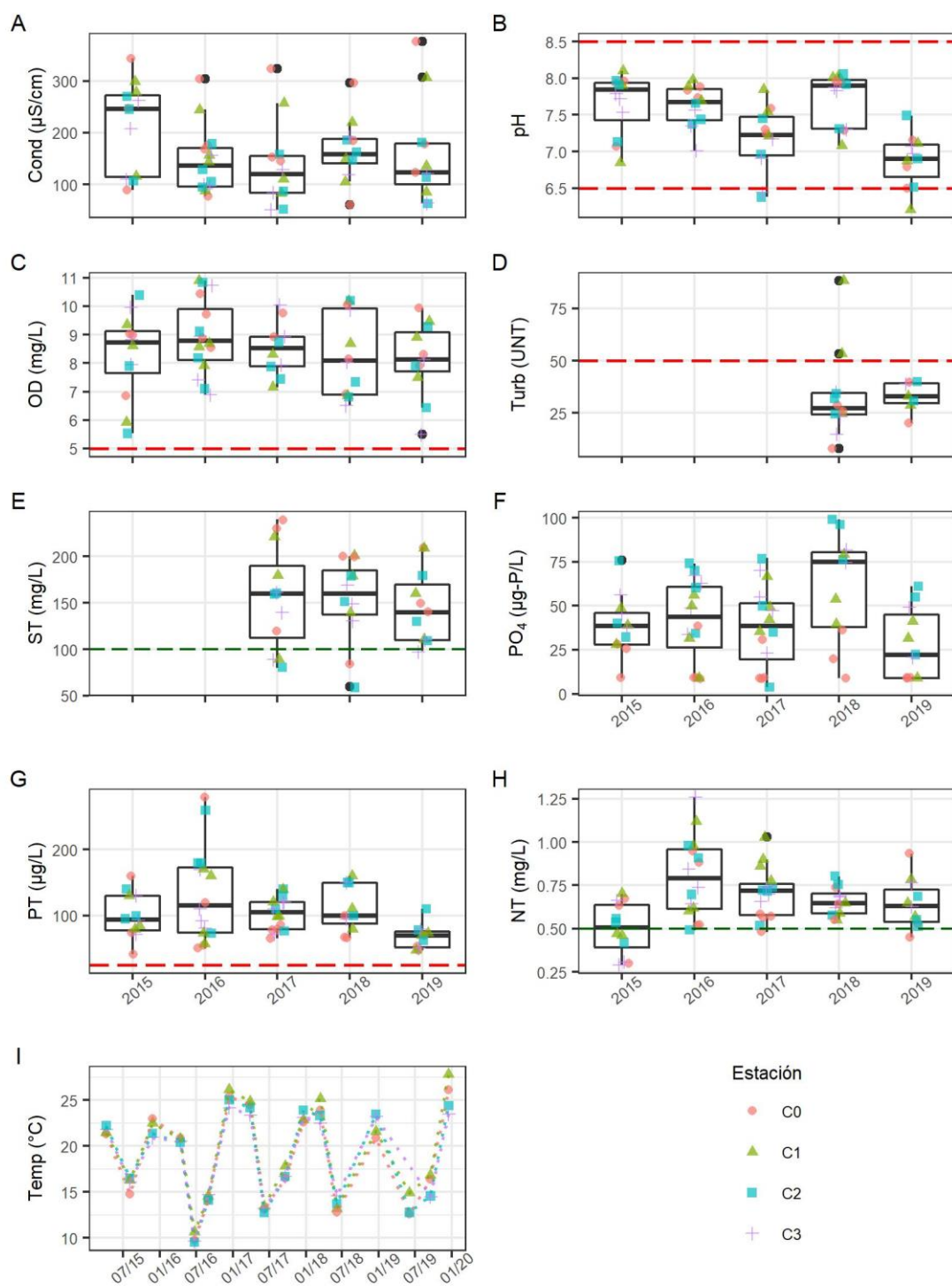


Figura 5.10 Variación temporal de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en el río Cebollatí. A) Conductividad, B) pH, C) Oxígeno disuelto, D) Turbidez, E) Sólidos totales, F) Ortofosfato, G) Fósforo total, H) Nitrógeno total, I) Temperatura. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 y las verdes los valores guía, descritos en la Tabla 1.

Por otro lado, la concentración de **NT** presentó un rango amplio, entre 0,3 y 1,3 mg/L. La concentración de dicho nutriente en 2015 fue menor a las observadas en 2016 y 2017 ($X = 15,14$; $gl=4$; $p<0,01$; Figura 5.10 H). Si bien en 2018 y 2019 las medianas fueron superiores a la del 2015, éstos no se diferenciaron

significativamente. A su vez, fue en 2015 el único año donde se observaron valores que cumplieron con el valor guía propuesto por la MTA (Tabla 1).

La **temperatura** fue similar en todas las estaciones y presentó variabilidad estacional, con máximos en diciembre y mínimos en julio (Figura 5.10 I).

5.2.5. Río San Luis (subcuenca 45)

La **conductividad** estuvo comprendida entre 52 y 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo mayor en 2018 que en los demás años ($F_{3,9}=6,54$; $p<0,05$; $R^2_{aj}=0,58$; Figura 5.11 A). El **pH** estuvo siempre en el rango reglamentado y no presentó variación entre años, el máximo de 8,49 fue observado en junio de 2016 y el mínimo (6,78) en diciembre de 2019 (Figura 5.11 B).

La concentración de **OD** varió entre 5,91 y 9,85 mg/L (mediana = 7,51 mg/L), el máximo fue observado en junio de 2016 y el mínimo en diciembre de 2019 (Figura 5.11 C). Todos los datos observados cumplieron con la normativa del Decreto 253/79.

Por otro lado, para evaluar la **turbidez**, se contó con sólo 2 valores al año y éstos estuvieron por encima del límite superior establecido en el Decreto 253/79 en el 2018 y por debajo del mismo en 2019. El máximo observado fue de 77,9 UNT.

La concentración de **ST** observada estuvo en el rango de 120 a 290 mg/L , con el máximo en junio de 2018. Todos los valores obtenidos estuvieron por encima límite superior recomendado por CARU (2009) de 100 mg/L .

En cuanto a los nutrientes, el **PO₄** presentó valores entre 39 y 230 $\mu\text{g}/\text{L}$, el máximo se registró en abril del 2016 (Figura 5.11 F). Mientras que el **PT** estuvo entre 69 y 860 $\mu\text{g}/\text{L}$, siendo siempre superior al máximo legislado en el Decreto 253/79. El máximo valor ocurrió en agosto de 2016. A su vez, la concentración de **NT** estuvo en el rango de 0,95 a 2,13 mg/L y el máximo ocurrió, al igual que el de PT en agosto de 2016 (Figura 5.11 H). Sin embargo las formas disueltas de nitrógeno en esa muestra, no fueron más elevadas que la mediana (datos no mostrados). Dicho evento estuvo asociado también al máximo valor de TMF de la cuenca (Figura 5.2) y a alta lluvia acumulada en los 5 días previos al día de monitoreo (67,5 mm^3 ; Figura 4.3), mientras que la media acumulada en 5 días para esta estación, en todo el periodo, fue de 18,0 mm^3 .

La temperatura presentó variación estacional con máximos en los muestreos de verano y el mínimo en julio 2016 (Figura 5.11 I).

5.2.6. Arroyo San Miguel (subcuenca 45)

La **conductividad** en el A° San Miguel fue similar en las dos estaciones de monitoreo presentes en este río, la mediana fue de 156 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el rango fue de 78-362 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 5.12 A). El pH presentó valores menores al límite inferior de la normativa en ambas estaciones, en junio de 2019. Dicho parámetro no se diferenció entre años ni entre estaciones.

La concentración de **OD** presentó los valores más bajos de toda la cuenca (Figura 5.1 C) con un rango desde 2,54 a 9,54 mg/L , y valores menores al mínimo legislado en ambas estaciones todos los años (Figura 5.12 A).

La **turbidez** (mediana global = 22,1 UNT) presentó mayor dispersión en 2018 que en 2019 (Figura 5.12 D). A su vez, los valores altos que excedieron el máximo admitido en el Decreto 253/79, fueron observados en diciembre (monitoreado en 2019 y no en 2018).

La concentración de **ST**, con un rango entre 120 y 230 mg/L , fue siempre mayor al máximo sugerido por CARU (2019). Los máximos de ambas estaciones fueron observados en junio de 2018. Dicho parámetro no se diferenció significativamente entre estaciones ni entre años.

Por otro lado, la concentración de **PO₄** observada en el A° San Miguel estuvo comprendida entre valores menores al LC (18 $\mu\text{g}/\text{L}$) y 120 $\mu\text{g}/\text{L}$ (Figura 5.12 F). Si bien los valores menores a LC fueron observados todos los años, se dieron con mayor frecuencia en 2019 y SM1. A su vez, la concentración máxima de PO₄ fue observada en SM2 en diciembre de 2018. En general, los mayores valores de PO₄ (>50 $\mu\text{g}/\text{L}$) se dieron en los

meses de marzo y diciembre. Cabe destacar que las altas concentraciones de 2018 coincidieron con alta turbidez (64 y 122 UNT) y los valores menores a LC coincidieron con baja turbidez (16,8-25,8 UNT).

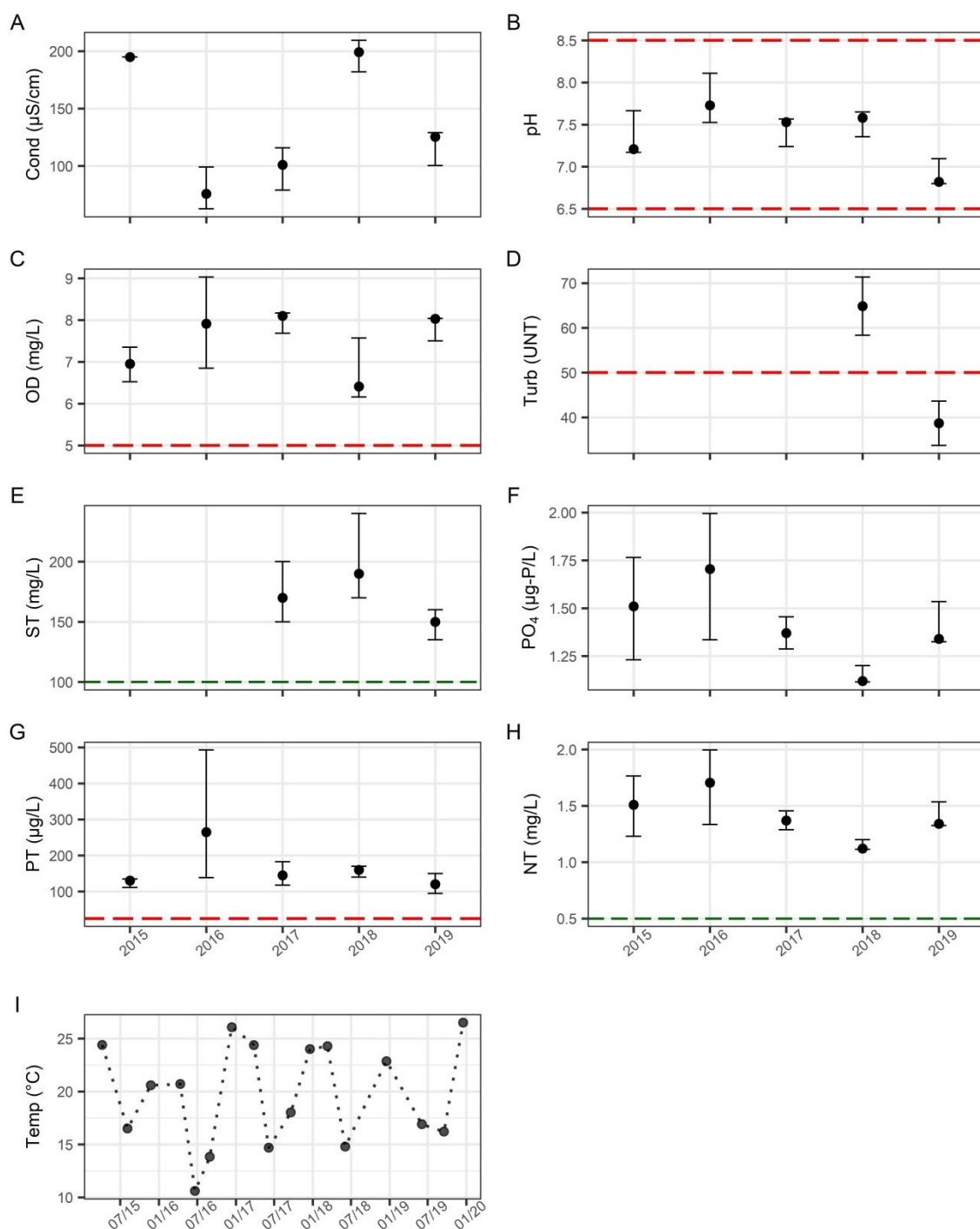


Figura 5.11. Variación temporal de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en el río San Luis. A) Conductividad, B) pH, C) Oxígeno disuelto, D) Turbidez, E) Sólidos totales, F) Ortofosfato, G) Fósforo total (sin el dato extremo de 860 µg/L en 2016), H) Nitrógeno total, I) Temperatura. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 y las verdes los valores guía, descritos en la Tabla 4.1.

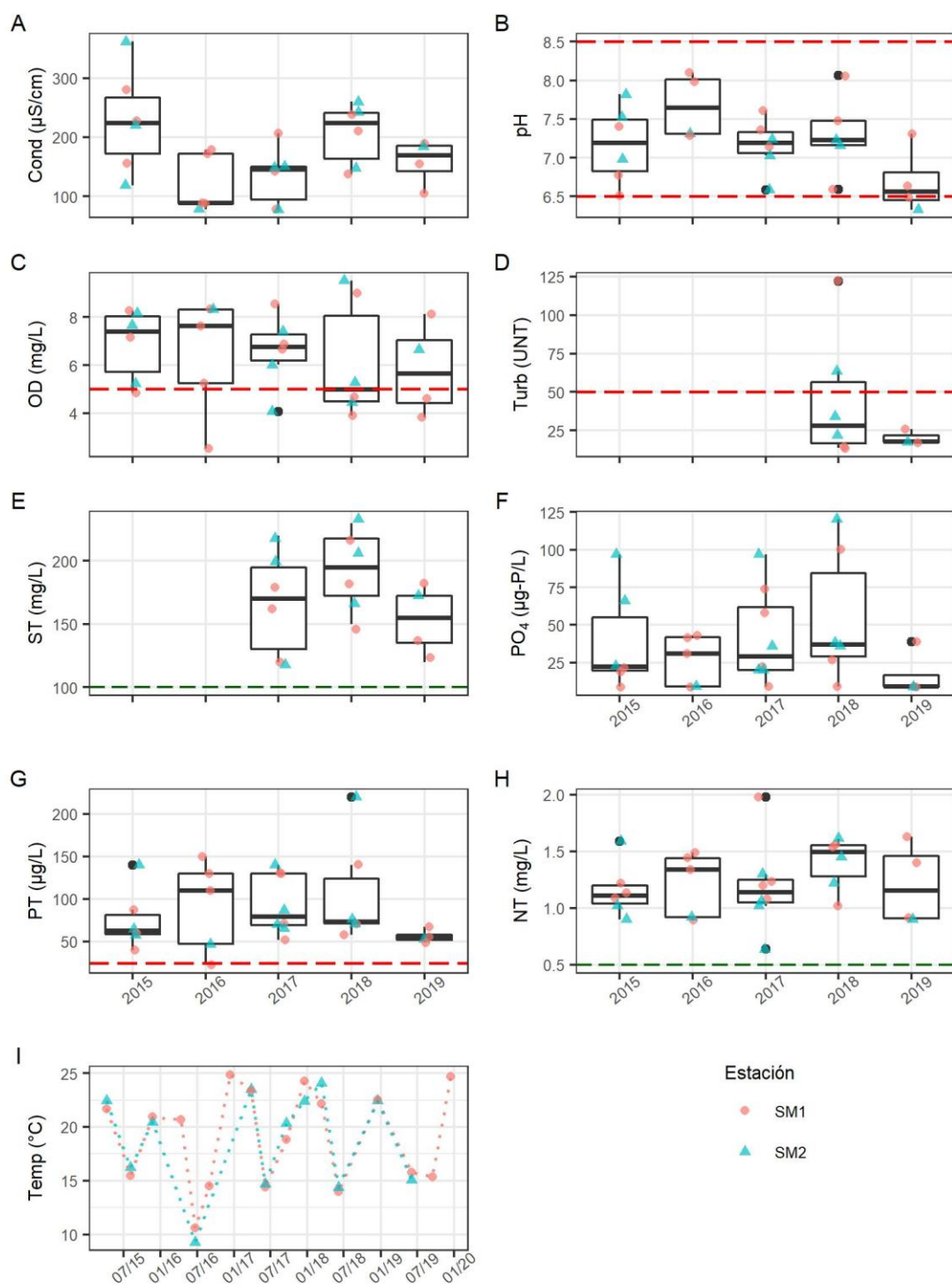


Figura 5.12. Variación temporal de parámetros físicos y químicos entre 2015 y 2019 en el A° San Miguel. A) Conductividad, B) pH, C) Oxígeno disuelto, D) Turbidez, E) Sólidos totales, F) Ortofosfato, G) Fósforo total, H) Nitrógeno total, I) Temperatura. Las cajas indican los percentiles 25 y 75 %, la línea horizontal la mediana, las líneas verticales representan el RIQ*1,5 (RIQ: rango intercuartílico), los puntos por fuera señalan posibles datos fuera de rango. Las líneas rojas entrecortadas indican los estándares del Decreto 253/79 y las verdes los valores guía, descritos en la Tabla 4.1.

La concentración de **PT**, comprendida entre 23 y 220 $\mu\text{g/L}$, presentó el máximo en SM2 en diciembre de 2018, coincidiendo con el máximo de PO_4 (Figura 5.12 G). A excepción del mínimo observado en SM1 en julio de 2016 (que coincidió con una concentración de PO_4 menor al LC), todos los demás valores superaron el máximo establecido por la normativa. En cuanto a la variación en el tiempo, el PT fue menor en 2019 que

en 2017 y 2018 ($X = 6,22$; $gl=2$; $p<0,05$; los años 2017 y 2018 no fueron diferentes entre ellos). Por otro lado, las estaciones presentaron concentraciones similares, medianas de 71,0 y 70,5 $\mu\text{g/L}$ para SM1 y SM2 respectivamente.

La concentración de **NT** presentó un rango de variación entre 0,4 y 2,0 mg/L (Figura 5.12 H). El máximo fue observado en SM1 en diciembre de 2017. Este nutriente no presentó diferencias entre estaciones ni entre años (Figura 5.1; Figura 5.12). En junio de 2016, cuando el fósforo fue bajo en todas sus formas en SM2, el NT presentó el mínimo valor para esta estación de monitoreo.

La temperatura presentó variación estacional con máximos en los muestreos de verano y el mínimo en julio 2016 (Figura 5.12 I).

5.3. Evaluación integrada

5.3.1. Aportes desde la cuenca y calidad de agua

En el Análisis de Componentes Principales (ACP) considerando sólo los **aportes puntuales**⁸ (todo el periodo de estudio), las variables que quedaron seleccionadas como explicativas de la variabilidad de los datos fueron: las concentraciones de PT y de NO_3 determinadas en el agua, la carga de PT aportada por el ganado (EGC y tambos, Ganado-PT), la carga de NT aportada por las industrias (Ind-NT), la carga de PT aportada por los efluentes domésticos (Dom-PT) y la lluvia acumulada en los 30 días previos al monitoreo (Lluvia; Figura 5.13). El total de varianza explicada fue de 81,1 % entre los dos primeros componentes y todas las variables seleccionadas estuvieron significativamente correlacionadas a uno de ellos.

Otras variables que también fueron seleccionadas pero se extrajeron por ser redundantes con otras de mayor aporte, fueron: PO_4 (correlacionada con PT), NT (correlacionada con NO_3) y las cargas de PT o NT de los distintos aportes (Industrias, tambos, EGC y domésticos).

El eje 1 se correlacionó de forma positiva con las concentraciones de PT y de NO_3 , y las cargas Ind-NT y Dom-PT (Figura 5.13). Mientras que se correlacionó negativamente con la carga de ganadería (Ganado_PT). El segundo eje se correlacionó negativamente con la variable climática lluvia y positivamente con la carga de PT de la ganadería.

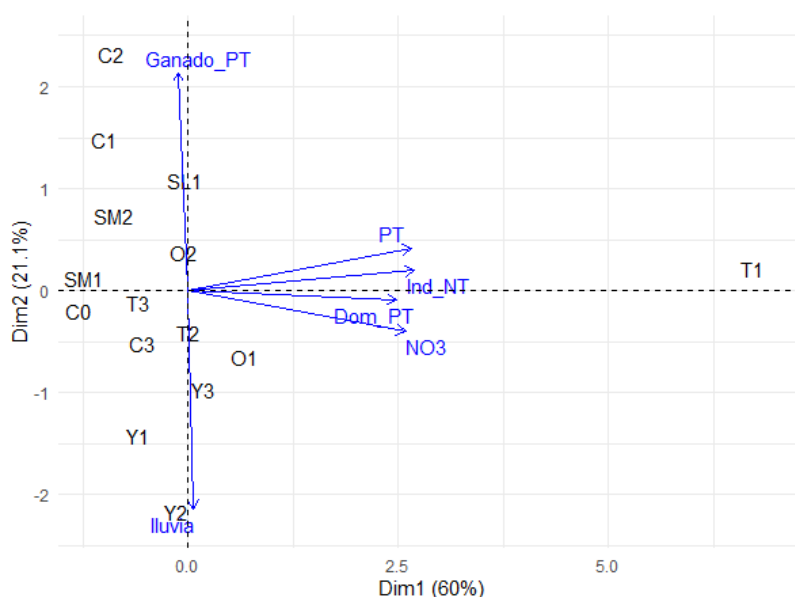


Figura 5.13 Análisis de componentes principales de la Laguna Merín para cargas puntuales (2015-2019), incluye los parámetros seleccionados por el análisis. Ganado incluye tambos y EGC; Dom_PT es el aporte doméstico de PT; Ind_NT el aporte de NT de las industrias.

⁸ Las cargas difusas se consideraron en el siguiente ACP porque fueron estimadas sólo para el año 2015.

Los ejes principales 1 y 2 ordenaron las estaciones por tipo de aporte, en el eje 1 hacia valores positivos se ubicaron las estaciones afectadas por los aportes industriales y domésticos, T1, O1 e Y3, ubicadas aguas abajo de las ciudades de Melo, Treinta y Tres y Río Branco respectivamente (Figura 3.1). La estación T1 se diferenció ampliamente del resto de las estaciones y estuvo asociada a los aportes industriales y domésticos. A su vez estos aportes estarían relacionados a las altas concentraciones de nutrientes (NT, NO₃, PO₄ y PT) observadas en el cuerpo de agua. Las estaciones afectadas por la presencia de ganado para carne y lechería, C2, SL1, SM2, SM1 y O2, estuvieron cercanas entre sí.

Y2 fue la que estuvo más influenciada por la lluvia y no por las cargas puntuales, dado que dichas estación no presentó este tipo de aportes (en el set de datos realizado).

Por otro lado, en el ACP con **aportes difusos** (para el año 2015), el total de varianza explicada fue 72,1 %, todas las variables seleccionadas aportaron de forma significativa a uno de los dos ejes principales. Las variables seleccionadas fueron: las concentraciones de PT, NO₃, NH₃ y NT y el pH del agua y los aportes de nutrientes desde los Tambos, los EGC, las ciudades y las industrias. Si bien las cargas de EGC y Tambos tuvieron la misma dirección y sentido, así como un peso similar, no ocurrieron de forma superpuesta como en el caso del ACP anterior, por lo que no fueron agrupadas.

El nitrógeno estuvo vinculado a distintas actividades según su forma. Por un lado el NT así como el NO₃ estuvieron asociados a los vertidos que han pasado por un tratamiento de efluentes, los de las industrias y los domésticos, que son mayores en T1. Sin embargo, el NH₃ se asoció a las estaciones con mayor carga pecuaria (tambos y EEC), lo cual podría estar asociado a la orina animal.

El pH quedó seleccionado entre las variables significativas que aportaron al ACP y correlacionada positivamente con las cargas difusas. Dicha correlación estuvo muy influenciada por un bajo valor de pH en SM1 el 4/8/2015. A su vez, en 2015 las estaciones SM1, SM2 y SL1 presentaron valores de pH bajos respecto a los demás (mediana de las tres estaciones = 7,21; mín-máx = 6,51-8,12).

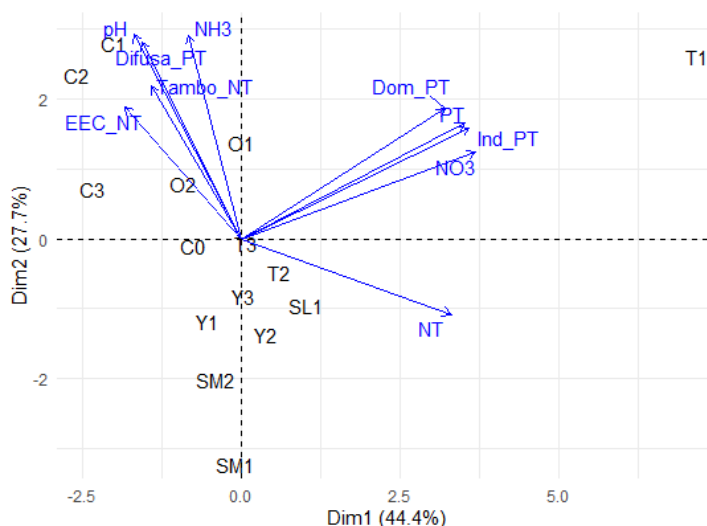


Figura 5.14. Análisis de componentes principales para el año 2015 con las cargas difusas y puntuales. Incluye los parámetros seleccionados por el análisis. Dom_PT es el aporte doméstico de PT; Ind_NT el aporte de NT de las industrias, Difusa_NT el aporte difuso de NT, EEC_NT el aporte de establecimientos de ganado confinado.

Las estaciones sobre los cursos San Miguel y San Luis estuvieron asociadas a alta concentración de NT y baja carga difusa, a pesar de que el porcentaje de uso de suelo para cultivos fue elevado (entre el 25 y el 30%), sin embargo, estas áreas cultivadas son pequeñas en comparación con las de las cuencas de las estaciones C1, C2 e Y1.

Las estaciones más influenciadas por carga difusa fueron aquellas con mayor área con cultivo de secano: C1, C2, C3 y O1 (100% secano). Si bien las estaciones del Yaguarón y T3 también tuvieron gran área cultivada, ésta fue principalmente arroz (Sección 3.5), que tiene un menor coeficiente de exportación y por ende una menor carga aportada a los cursos de agua. A su vez, en las subcuencas de Yaguarón y Cebollatí la

concentración de PT observada en el agua estuvo relacionada positivamente con el porcentaje de cultivo total en la cuenca ($R^2 = 0,84$).

La estación SM2 es principalmente herbáceo natural y no presenta influencia de industrias ni domésticos. Su elevada concentración de NT podría provenir desde un canal de riego de arroz que está influenciando directamente el sitio de monitoreo o del uso de la pradera para ganadería.

5.3.2. Cumplimiento de los estándares de calidad de agua

Hubo diferencias importantes entre los parámetros en cuanto al cumplimiento del estándar establecido por Decreto 253/79. Las estaciones con mayor porcentaje de cumplimiento global fueron C0, C3 y T1 (la suma de todos los porcentajes fue de 493), presentaron 100% de cumplimiento en cuatro parámetros (OD, Turb, NH_3 y TMF en Cebollatí y OD, pH, NH_3 y TMF en T1; Figura 5.15).

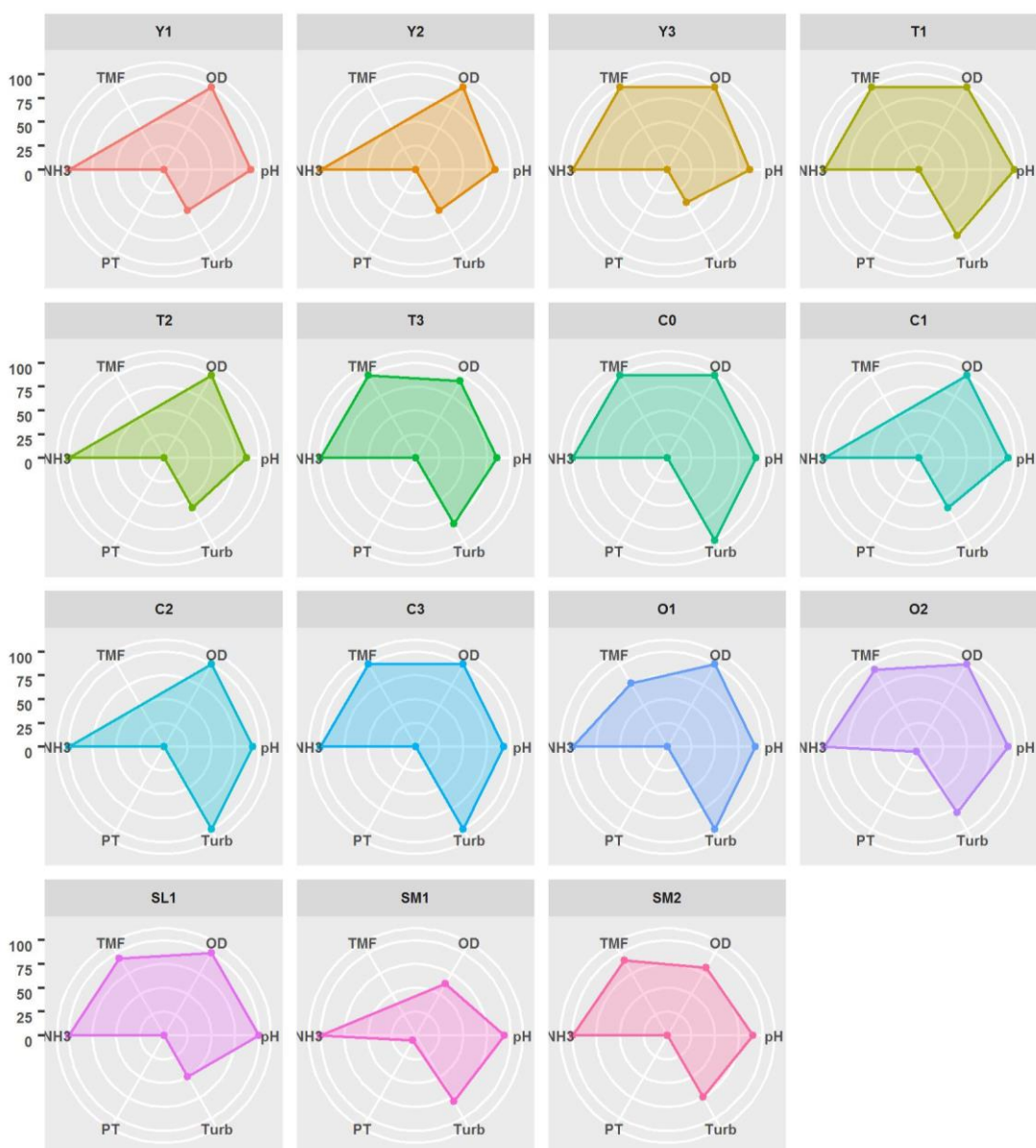


Figura 5.15 Porcentaje de cumplimiento de los parámetros legislados en el Decreto 253/79: Coliformes termotolerantes (TMF), Oxígeno Disuelto (OD), pH, turbidez (Turb), fósforo total (PT) y amoníaco libre (NH_3). Los límites del Decreto 253/79 se presentan en la Tabla 1).

La concentración de NH_3 fue el único parámetro para el cual se cumplió el estándar en el 100 % de las observaciones en todas las estaciones de monitoreo. El estándar del OD se cumplió en el 100 % de las observaciones de la gran mayoría de las estaciones de monitoreo, sólo T3, SM1 y SM2 incumplieron en una proporción variable (6,5; 37,5 y 18,2 % de incumplimiento respectivamente).

Los coliformes termotolerantes tuvieron también un alto porcentaje de cumplimiento en general, el 100 % de las observaciones cumplieron en la mayoría de las estaciones a excepción de O1, O2, SL1 y SM2.

El pH presentó cumplimiento en todo el periodo sólo en dos estaciones (T1 y SL1), las demás presentaron algún valor fuera del rango establecido por la normativa y un porcentaje de cumplimiento elevado (> 83 %).

La turbidez presentó un cumplimiento variable, entre el 40 y el 100% de las observaciones por estación de monitoreo. El río Yaguarón fue el de menor porcentaje de cumplimiento (40 en Y1 y 50 % en Y2 e Y3). En el otro extremo, el río Cebollatí fue el de mayor cumplimiento (100 % en C0, C2 y C3, y 60 % en C1).

El parámetro de menor cumplimiento fue el PT, que presentó valores por debajo del máximo sólo en O2 y en SM1. Para todas las demás estaciones el cumplimiento fue 0%.

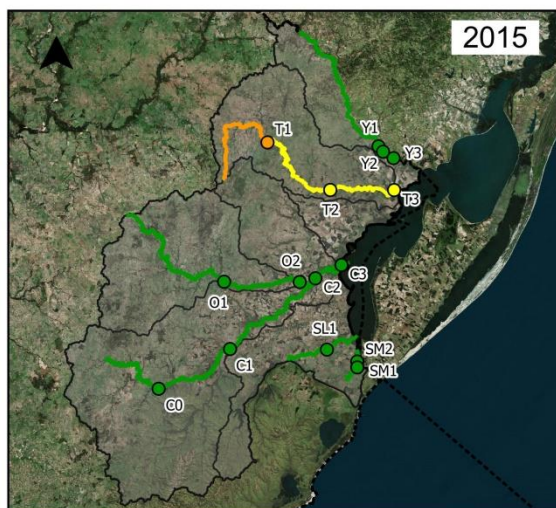
5.3.3. Índice de Estado Trófico

La mayoría de las estaciones presentaron un estado trófico mesotrófico (color verde) en el periodo de estudio (Figura 5.16). Incluso los cursos Yaguarón y San Miguel se mantuvieron mesotróficos durante todo el periodo.

El río Tacuarí fue el más variable en cuanto a su estado trófico, y el único en alcanzar niveles de supereutrofia (color naranja) en las estaciones T1 y T2 en algunos años del periodo (Figura 5.16). Las estaciones de este río estuvieron más comprometidas en el año 2015 y presentaron una mejora en el estado trófico en 2019, donde dos de las tres estaciones fueron mesotróficas.

Las estaciones del río Olimar Grande estuvieron la mayor parte del periodo en estado mesotrófico, a excepción de O2 en 2018 que estuvo en estado eutrófico (color amarillo) y luego recuperó el estado mesotrófico. De forma similar, las estaciones del río Cebollatí fueron principalmente mesotróficas, pero la estación C2 pasó a eutrófica en los años 2016 y 2018.

La estación ubicada en el río San Luis estuvo en estado eutrófico en 3 de los 5 años monitoreados (Figura 5.16). En 2019 fue mesotrófica como la mayoría de las estaciones de la cuenca. Por su parte las estaciones ubicadas en el A° San Miguel, estuvieron siempre en estado mesotrófico. Es de destacar que para SM2 se contó con un solo monitoreo en 2016 (20/06/2016) y en 2019 (03/06/2019), por lo tanto el IET podría no ser representativo de todo el año en estos casos.



Ministerio
de Ambiente

Índice de Estado Trófico
Cuenca de la Laguna Merín

Nivel trófico	IET Lóticos	Escala cromática
Ultraoligotrófico	≤ 47	
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$	
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$	
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$	
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$	
Hipereutrófico	> 67	

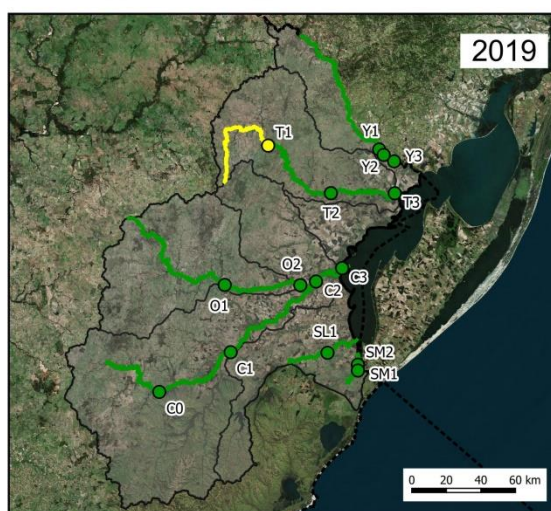
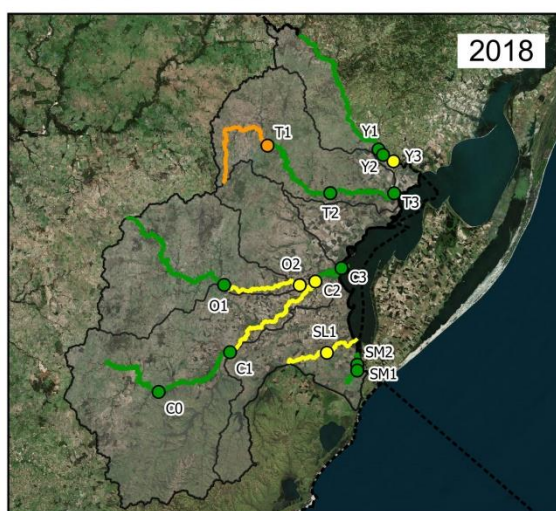
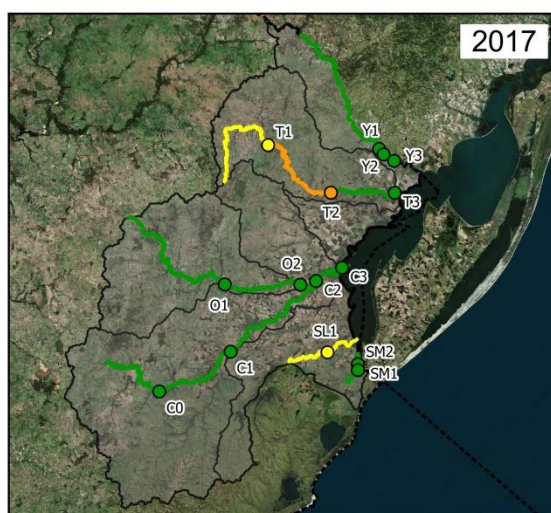
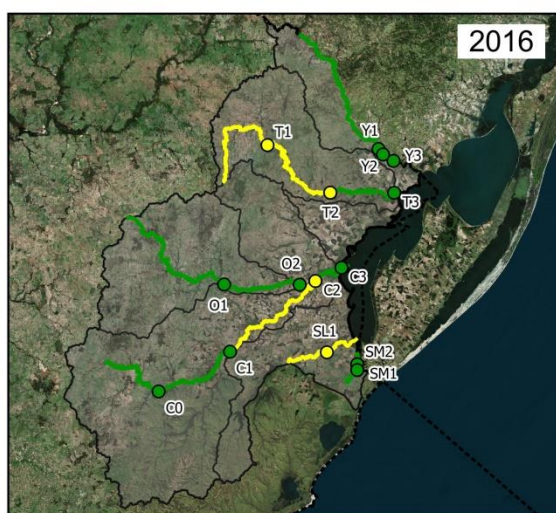


Figura 5.16 Estado trófico de las estaciones de monitoreo de la Laguna Merín, en cada año en el periodo 2015-2019. La escala de colores se explica en la leyenda. Los tramos aguas arriba de cada estación se consideraron del mismo estado trófico que la estación.

6. DISCUSIÓN

6.1. Principales características de la cuenca

En este trabajo se analizó por primera vez la relación entre el uso del suelo y la calidad del agua de la cuenca de Laguna Merín, buscando un acercamiento a los factores determinantes de la calidad de agua. El estudio comprendió 5 años de monitoreo trimestral en los principales afluentes de la cuenca.

Las condiciones físicas y químicas observadas en la cuenca durante el período analizado se encontraron dentro de lo reportado para estos sistemas en Uruguay (por ej. Forni y Scasso 2001; CARU, 2019; Goyenola *et al.*, 2015; Arocena, 2016; MVOTMA-DINAMA 2016; 2017a y 2020b; MA 2021). Según el IET todos la mayoría de los cursos son mesotróficos, lo cual está relacionado a una buena calidad de agua (Wetzel, 2001). Sin embargo, dado que los cursos de agua estudiados en el presente trabajo, son afluentes directos de la laguna Merín (a excepción del río Olimar Grande), además de la calidad de agua de cada uno, es importante evaluarlos en el contexto de cuenca. La concentración de nutrientes de los afluentes de la laguna fue elevada dado que se trata de ríos y arroyos que desembocan a un cuerpo de agua léntico.

La Mesa Técnica del Agua (MTA) propone niveles de NT y PT para los afluentes a cuerpos lénticos buscando proteger estos últimos (MTA, 2017), basándose en literatura nacional e internacional (por ejemplo Bonilla *et al.* 2015, Smith *et al.*, 1999). El valor de NT propuesto por MTA es de 0,5 mg/L y éste es superado en el 95% de las observaciones en los afluentes de la Laguna Merín. A su vez, el valor propuesto para PT (30 µg/L) fue también superado en todos los casos (a excepción de un valor en San Miguel). Por lo tanto, **si bien la condición trófica de los cursos de agua estudiados es principalmente mesotrófica, éstos presentan valores elevados de nutrientes por tratarse de afluentes de una laguna.**

Por lo tanto, al evaluar la calidad de agua de esta cuenca, se deben tomar en cuenta diferentes indicadores y herramientas de forma de poder hacer una evaluación más integral del estado de los ambientes. En el presente trabajo se contemplaron el IET, el porcentaje de cumplimiento de los estándares, los valores de referencia de la MTA y las imágenes satelitales de floraciones en la laguna.

Otro indicador que se ha utilizado en DCA-MA es el referente al Objetivo de Desarrollo Sostenible de la ONU ODS 6.3.2, sobre la proporción de masas de agua de buena calidad, que toma en cuenta la conductividad, el pH y las concentraciones de OD, PO₄ y de nitrógeno oxidado total (NO₂ y NO₃). Para la cuenca de la Laguna Merín dicho indicador reveló que un 80,65% de los cursos monitoreados presentaba buena calidad de agua, para el periodo de 2018 a 2020 (155 observaciones).

Mediante diversas fuentes se han registrado eventos de floraciones en la laguna (denuncias ambientales, imágenes satelitales, comunicaciones de prensa). Dentro de esos eventos, en algunos casos se ha observado que son floraciones de cianobacterias. La presencia de floraciones frecuentes en la laguna afecta los diferentes usos y actividades que allí se desarrollan, como el turismo y la recreación. Además disminuyen la provisión de varios servicios ecosistémicos que brinda el cuerpo de agua. Los ecosistemas lénticos dominados por fitoplancton son los que proveen menor cantidad de servicios de soporte, regulación y de aprovisionamiento (Janssen *et al.*, 2020). La eutrofización por excesivo aporte de nutrientes desde la cuenca, es la causa de esos eventos en la laguna y las vías por las cuales llegan los nutrientes a la laguna son los afluentes y la cuenca inmediata.

El origen de los principales aportes de nutrientes desde la cuenca de cada río sería la agricultura. Los demás aportes variaron según el uso de suelo de la zona. En la cuenca alta de Tacuarí y Olimar Grande, los centros poblados y las industrias ejercerían gran presión sobre la calidad del agua, principalmente por el aporte de fósforo y nitrógeno disueltos. La ganadería (lechera y EGC) también fue un factor determinante en la calidad de agua para la zona media del río Cebollatí y los cursos San Miguel y San Luis. Por otro lado, la región baja de la cuenca (bioma de humedales y bañados; sección 3.2.1) estuvo fuertemente afectada por la actividad agrícola, predominantemente arrocería, que aporta la mayor carga de fósforo y nitrógeno.

Respecto a las **cargas domésticas**, llama la atención la variabilidad de los aportes de algunas ciudades. Sería esperable que las variaciones interanuales fueran despreciables dado que éstas dependen del número de habitantes y esto no ha sufrido cambios importantes (INE, 2019). De todas formas, al no ser la principal fuente de aporte en la mayoría de las estaciones de monitoreo, dicha variabilidad no tendría mayor efecto sobre las conclusiones del presente trabajo.

Es de destacar que las **cargas industriales y de establecimientos ganaderos** (tambos y EGC) estuvieron muy condicionadas por la disponibilidad de datos desde las industrias a DINAMA, y esto incluye a aquellos emprendimientos que se consideran de impacto significativo. Por lo tanto, los pequeños emprendimientos no están considerados, si éstos realizaran un manejo de efluentes poco eficiente, podrían estar influenciando la calidad de agua tanto o más que los grandes emprendimientos que presentan IAO.

El porcentaje de suelo destinado a **agricultura** en la cuenca de la Laguna Merín (máximo de 20,3% en la subcuenca 44), es menor que otras cuencas del país. Una de las cuencas más intensivas es la del río San Salvador (Departamento de Soriano), donde la agricultura alcanza hasta el 79% en la subcuenca baja (MVOTMA-DINAMA, 2020b). Además, a diferencia de la cuenca de la Laguna Merín, donde predominaron los cultivos de arroz en rotación con secano, en la cuenca del San Salvador predominaron los cultivos de soja (MVOTMA DINAMA, 2020; Couto, 2019). Dichas diferencias se reflejaron en las concentraciones de PT en las aguas, la mayoría de las estaciones del río San Salvador fueron catalogadas como eutróficas o supereutróficas (MVOTMA-DINAMA, 2020b), mientras que en la cuenca de la Laguna Merín fueron principalmente mesotróficas. Si en cambio, se compara la cuenca de la Laguna Merín con otra poco agrícola, como la del río Casupá (afluente del río Santa Lucía, en cuenca 60), cuyo suelo es poco apto para ese uso por su aridez, el IET fue similar entre ambas. La estación de monitoreo allí ubicada fue mesotrófica en el mismo periodo de estudio, pero las concentraciones de PT fueron menores a las observadas en la cuenca de la Laguna Merín (mediana = 99 µg/L; MVOTMA-DINAMA, 2020a).

El **cultivo de arroz** tiene un menor coeficiente de exportación que los cultivos de secano, como puede ser la soja, sin embargo, tiene un alto impacto en cuanto a la modificación del territorio por la construcción de canales de riego o evacuación necesarios para inundar los cultivos (ACA *et al.*, 2018). Dichas construcciones no sólo cambian la hidrología natural del ecosistema sino que también eliminan o limitan el desarrollo de áreas naturales de amortiguación de impactos antrópicos, en particular humedales. Esto genera una pérdida significativa de ecosistemas valiosos para la conservación y con ellos su biodiversidad (incluyendo especies prioritarias de flora y fauna), funcionalidad y capacidad de proveer múltiples servicios ecosistémicos. Dentro de los servicios ecosistémicos que se pierden junto con los humedales se destacan el mantenimiento de la calidad de agua y provisión de recursos genéticos, entre otros (Soutullo y Barthesaghi, 2009; 2020; Evia y Musitelli, 2015).

El aumento de la eutrofización de los cuerpos de agua causado por la pérdida de nutrientes desde las actividades agrícolas ha sido ampliamente demostrada (ejemplos: Aubriot *et al.*, 2017; Ekholm *et al.*, 2000). La llegada de los nutrientes excedentes al agua depende de las características geotopográficas (pendiente, área) e hidroclimáticas y de la capacidad de retención de nutrientes de la cuenca, así como también de las prácticas agrícolas (Arocena *et al.*, 2018). Los nutrientes disponibles para el fitoplancton (incluyendo las cianobacterias) son el nitrato y el fósforo disuelto (Bonilla *et al.*, 2015). El NO₃ es retenido y se da el proceso de mineralización, por lo que no estaría tan asociado con la erosión (Ekholm *et al.*, 2000).

La calidad de agua en cada estación en cada monitoreo está determinada por las actividades de su cuenca pero también puede estar afectada por eventos puntuales, que pueden llegar a tomar mucha relevancia dada la baja frecuencia del monitoreo. Sin embargo, las grandes afectaciones a los cursos de agua quedaron evidenciadas en los parámetros analizados. Estos son, el aporte excesivo de nutrientes que llega a la laguna desde fuentes tanto puntuales como difusas.

Si bien este trabajo exploró la relación entre el uso de suelo y la calidad de agua, dado que se trabajó sólo con un año de coberturas de suelo, no fue posible observar cambios en el uso. Además, el diseño de monitoreo no está planteado para ese fin específico. Aun así, fue posible observar que la principal fuente de nutrientes hacia la laguna fue la agricultura (en 2015) y que éstos afectaron de forma importante la calidad de agua en algunas de las estaciones de monitoreo.

6.2. Fitosanitarios

A pesar de la gran actividad agrícola de la cuenca, los **fitosanitarios** estuvieron presentes en bajas concentraciones respecto a la normativa. Sin embargo, se detectó el derivado de DDT (p'p'DDE), un compuesto orgánico persistente (COP) y podría ser un riesgo para la vida acuática y la salud humana aún en bajas concentraciones. Los destinos de dicho compuesto y sus derivados son amplios y van más allá del sitio

donde se aplica, por ejemplo, han sido detectados incluso en leche materna en la región de Montevideo en 2009 (PNUMA-GEF, 2012).

El glifosato ha clasificado como clase III según la OMS, lo que implica que es de riesgo bajo para la salud humana y animal. Los efectos a la salud humana han estado en discusión entre otras cosas porque el glifosato en sí mismo sería menos riesgoso que el glifosato en su forma comercial (con adyuvantes). La mayoría de este compuesto se mineraliza y en el suelo y tiene baja movilidad, por lo que resulta menos probable encontrarlo en los cuerpos de agua. En cambio el AMPA, tiene gran solubilidad en agua y gran adsorción a las partículas, con lo que es frecuente que llegue a los cuerpos de agua por escorrentía y sea detectado (Silva *et al.*, 2020). Tanto el glifosato como en AMPA han sido detectados en altas concentraciones en sedimentos y organismos bentónicos incluso fuera de las áreas agrícolas y con baja concentración de los compuestos en agua (Bonansea *et al.*, 2018).

El DDT está incluido en el anexo B del convenio de Estocolmo del cual Uruguay es parte (Gobierno de Uruguay, 2017), por lo cual se permitiría su uso sólo para el control de vectores de enfermedades plaga tales como la Malaria. Actualmente en nuestro país, el dicho compuesto está prohibido de forma específica (resolución MGAP del 23/09/1997). Sin embargo, ha sido detectado en peces en el parque nacional Esteros de Farrapos tanto el DDT como p'p'DDE (uno de sus productos de degradación). Dicho hallazgo podría estar relacionado tanto a una aplicación reciente como a la alta persistencia de los compuestos en los tejidos (Alonso *et al.*, 2019). El DDE ha sido reportado como causante de problemas en el nacimiento (Valvi *et al.*, 2012) y tóxico en peces (Donohoe y Curtis 1996).

El clorpirifos y el metoxicloro fueron también cuantificados en este estudio, aunque sólo en uno de los muestreos. El clorpirifos es un plaguicida organofosforado con otros usos además de los agrícolas y ha sido incorporado en la Convención de Estocolmo por sus características: alta bioacumulación, gran distancia de desplazamiento, alta persistencia, toxicidad para organismos acuáticos y neurotóxico para el desarrollo en bajos niveles de exposición. Es de alto riesgo para la producción apícola y la salud humana (RAP-AL, 2012). Mientras que el Metoxicloro es un organoclorado de baja solubilidad y alta persistencia, altamente tóxico para la vida acuática y la salud humana (ECHA, 2020 a). Su incorporación a los Anexos de la Convención de Estocolmo como COP está siendo analizada (ECHA, 2020 b).

Otros compuestos detectados fueron el fipronil y el diazinon. Por un lado todos los fitosanitarios agrícolas a base de fipronil (que también entran en la clasificación de COP) están prohibidos excepto para el control de hormigas y de gorgojo acuático (*Oryzophagus oryzae*) en cultivo de arroz (resolución DGSA Nº 27 de 23 de marzo de 2009). Por otro lado, el diazinon es moderadamente soluble y muy volátil y si bien no es persistente en el suelo es muy estable en agua. Dicho compuesto está incluido en la lista de contaminantes marinos, es moderadamente tóxico para mamíferos, tóxico para organismos acuáticos y muy tóxico para abejas y aves (NCBI, 2020).

El tiempo de permanencia de los activos en el agua es en general bajo y las concentraciones elevadas se dan en periodos de tiempo cortos. Sumado a esto, los monitoreos son trimestrales y muchos de los activos reportados para la plantación de arroz están en proceso de ser incorporados al pool de activos monitoreados en el programa (INIA, 2020). Si bien en el último tiempo el Laboratorio de DINAMA ha incorporado numerosos activos, a veces ocurre que las tecnologías comerciales avanzan con mayor velocidad que las investigaciones científicas respecto a su impacto en la biota y en la salud humana (Aktar *et al.*, 2009; Beketov *et al.*, 2013). Por ende se ve retrasada su regulación por parte de las instituciones públicas (Pelaez *et al.* 2013). Por estas razones, la problemática asociada a los fitosanitarios podría estar subestimada en el presente trabajo y en el país en general.

6.3. Subcuenca 40 (río Yaguarón)

La subcuenca 40 se caracterizó por concentraciones de nutrientes intermedias a bajas, en comparación con las demás subcuencas. Los principales aportes de nutrientes al curso de agua provinieron de las cargas difusas, especialmente de la agricultura de secano y regada.

Si bien el monitoreo no incluyó las nacientes del río, que se encuentran del lado brasilero, los datos reportados por instituciones de dicho país indican que la concentración de nutrientes es elevada en esa zona. Las estaciones sobre el río Yaguarón monitoreadas por Brasil presentaron una mediana de PT= 100 µg/L en 2017 (datos provistos por FEPAM). Esos valores son mayores a los observados en Y1-Y3, por lo

tanto, el río tendría cierta capacidad de recuperación que le permite mantener el estado de mesotrófico en las estaciones monitoreadas en el presente trabajo.

La estación Y3, que tiene como objetivo registrar el impacto de la ciudad de Río Branco, estuvo siempre en estado mesotrófico. Dicha ciudad cuenta con una laguna de tratamiento, mientras que la ciudad de Yaguarón (del lado brasileiro) no contaría con tratamiento al menos hasta 2018 (FAO, 2018). Si bien los niveles de fósforo no fueron muy elevados en comparación con las demás estaciones de la cuenca, ésta sería una fuente de nutrientes importante para la laguna Merín y que podría ser controlada.

6.4. Subcuenca 41 (río Tacuarí)

La alta concentración de nutrientes en la estación T1 del río Tacuarí, que redundó en un elevado estado trófico, estaría relacionada a los aportes de efluentes domésticos y de industrias. La contaminación por exceso de nutrientes en T1 se mantuvo durante todo el periodo y presentó estado supereutrófico durante varios años. Sin embargo, el río logra revertir ese impacto hacia la cuenca baja, probablemente asociado a la resiliencia del ecosistema, vinculada a los procesos de ciclado y transporte de nutrientes (Newbold *et al.*, 1982; Lamper y Sommer, 2007). Dicha resiliencia podría estar favorecida por el uso de suelo de esa área del río, dado el alto porcentaje de herbáceo natural en T2 (65% en 2015). Sumado a esto, T3 podría tener influencia de agua desde la laguna, dada su locación, por lo que la disminución en la concentración de nutrientes, en este caso, podría estar asociada, en parte, a la dilución de la carga.

Por otro lado, la concentración de PT en las estaciones T2 y T3 se correlacionó con la de ST por lo que el aporte de nutrientes en estas estaciones, podría estar relacionado a erosión por actividades agrícolas. Si bien la calidad de agua en T2 está altamente influenciada por la calidad de agua en T1, éstas no presentaron una correlación significativa, por lo que las actividades de la cuenca cercana tendrían gran influencia sobre la calidad de agua de T2. A su vez, los cambios en el tipo de cultivo podrían estar relacionados a los cambios en el estado trófico observado en T2. La agricultura de secano habría sido más intensiva en los primeros años del periodo (2015-2016) ya que fue un periodo de expansión agrícola-sojera (INIA, 2020). Luego, se habría rotado hacia cultivos de arroz, que tienen menor exportación de nutrientes (INIA, 2020; Perdomo, 2013). El periodo de predominio de agricultura sojera coincidió con el de los mayores niveles tróficos de la estación T2 (2015-2017). Sin embargo, para confirmar esta hipótesis habría que realizar estudios específicos del terreno y muestreos del agua con mayor frecuencia que la realizada en el presente trabajo.

6.5. Subcuenca 43 (río Olimar Grande)

Las estaciones ubicadas en el río Olimar Grande se caracterizaron por una concentración media de nutrientes en comparación con las demás cuencas. Las cargas provinieron de fuentes variadas, tanto puntuales como difusas.

La estación O1, se encuentra aguas abajo de la ciudad de Treinta y Tres y en la zona media-baja de la cuenca por lo que no correspondería estrictamente a las nacientes, y por lo que no pudo ser considerada como estación de referencia. Sin embargo, el monitoreo del río Yermal Chico, en el área protegida de Quebrada de los cuervos del SNAP (Sección 3.3.2), sí corresponde a una región de nacientes y de bajo impacto. Este río desemboca en el Yermal Grande, que se vierte 4 km aguas arriba de O1 (antes de la ciudad). Los niveles de nutrientes del Yermal Chico reportados entre 2014 y 2019 son menores a los observados en O1, las medianas de PT y NT son de 49,5 y 360 µg/L respectivamente (OAN-DINAMA). A su vez el PO₄ siempre ha sido menor al límite de detección del método (1,1 µg/L), lo que constituye los menores valores de toda la cuenca. Dadas las condiciones del ambiente es probable que el fósforo esté contenido en organismos planctónicos, y su crecimiento esté limitado por fósforo disuelto (Arocena, 2016, MVOTMA - DINAMA, 2016).

6.6. Subcuenca 44 (río Cebollatí)

A diferencia de otros ríos, el Cebollatí fue monitoreado en toda su extensión, incluyendo la zona alta, con menor influencia de actividades antrópicas, C0 no tiene centros poblados ni grandes extensiones de cultivos en su cuenca. Esto permitió observar un gradiente de impacto sobre la calidad de agua y de nutrientes esperable para un sistema lótico (Vannote *et al.*, 1980), con menor concentración de nutrientes en la cuenca

alta y mayor en la cuenca baja. Dicho análisis indicó que la concentración de PT observada en el agua estuvo relacionada al porcentaje de cultivos presente en la cuenca. Esto además fue observado en el ACP del año 2015, donde las estaciones C1 y C2 se ubicaron hacia el cuadrante con mayor carga difusa. La excepción observada entre C2 y C3, donde la concentración es mayor en C2, podría deberse a que en esta última hay un alto porcentaje de cultivos de arroz y a que C3 está ubicada en una zona de ensenada; probablemente esté influenciada por entrada de agua desde la laguna. C2 también es la estación que recibe la cuenca del Olimar Grande, por lo que es esperable un aumento en la concentración de nutrientes, dado que éste último presentó concentraciones mayores que C0 y C1.

Otra actividad que estaría impactando sobre las estaciones de monitoreo del Cebollatí es la actividad ganadera intensiva (EGC y tambos), lo cual se ha observado también en otras cuencas del país, como la de Santa Lucía. Particularmente en el embalse de Paso Severino, se observó una correlación positiva entre la concentración de nutrientes observada en agua y el número de órganos de ordeño (Arocena *et al.*, 2011).

La estación C0 presentó la mejor calidad de agua de la cuenca, en cuanto a concentración de nutrientes, ya que presentó la menor mediana de PT, PO₄ y NT. La buena calidad de agua podría estar relacionada a la ausencia de extensiones importantes de cultivos de arroz y gran porcentaje de cobertura de herbáceo natural y bosque nativo. Aunque tuvo un 13% de territorio destinado a cultivos de secano, éste podría no estar lindero al curso de agua y dejar espacio a zonas buffer, disminuyendo el impacto en la calidad del agua (Hoffman *et al.*, 2009). Dada la presencia de actividad agrícola, C0 dista de ser un sitio que pueda considerarse de referencia como de buena integridad ecosistémica, como podría ser la estación de monitoreo ubicada en el área protegida de Quebrada de los Cuervos (OAN-DINAMA; O'Brien *et al.*, 2016; Arocena *et al.*, 2018). En comparación con esta estación más prístina, las concentraciones de nutrientes en C0 fueron elevadas tanto en PT (70% mayor en C0) como en NT (63% mayor en C0).

Por otro lado, la elevada conductividad y la concentración de sólidos (tanto disueltos como totales) observada en C0 (y también en C1) podrían estar relacionadas a la erosión ocasionada por las actividades de la cuenca (Arocena *et al.*, 2018), que según el presente trabajo correspondería a las ganaderas. Esto concuerda con que las concentraciones de PT más elevadas fueron observadas con mayor lluvia acumulada durante los 5 días previos al monitoreo.

6.7. Subcuenca 45 (arroyo San Miguel y río San Luis)

Los cursos San Miguel y San Luis tienen la particularidad de que nacen en la zona baja, dentro de una zona con gran actividad agrícola. El 41,9% de la cuenca de la estación SM1 correspondió a zona natural inundable en 2015 (Sección 3.2).

Esta subcuenca presentó los menores valores de oxígeno disuelto, las situaciones naturales que podrían derivar en esto son la elevada temperatura y niveles altos de descomposición de materia orgánica (Wetzel, 2001). Sin embargo, en este caso, los monitoreos con bajo OD no coincidieron con los máximos de temperatura (15,8-24,7 °C). Mientras que en dos de los casos la turbidez y los sólidos (totales y disueltos) fueron altos, por lo que podrían implicar que haya entrado un pulso de materia orgánica desde la cuenca. Las bajas concentraciones pueden afectar negativamente a las comunidades biológicas e incluso causar la mortandad de peces en condiciones de anoxia (Wetzel, 2001). Por lo tanto, los pulsos de gran carga de materia orgánica deben ser evitados.

La estación SM2, por su locación, está afectada directamente por un canal artificial, que probablemente sea un desagüe de chacras de arroz. Por lo tanto dependiendo de si es un año con cultivo de arroz o el cultivo en rotación (ACA *et al.*, 2018) y de cuando sea el monitoreo en relación al desagüe del campo, la calidad de agua observada podría reflejar lo que proviene de las chacras o de aguas arriba.

En diciembre 2017, se observó un evento de alta concentración de todas las fracciones de nitrógeno disuelto (NO₂, NO₃ y NH₄) en SM1, que derivó en el máximo de NT de toda la cuenca (3,85 mg/L). El fósforo total fue elevado en esa fecha, aunque no máximo. Dada la alta concentración de NH₄, este evento podría estar relacionado a la presencia de ganado. La actividad principal en esta área en 2015 fue el área natural inundable, seguida por cultivos regados y herbáceo natural. Por lo tanto, podría suceder que en 2017 hubieses ganadería en esa área (asociada al herbáceo natural) y los animales hayan accedido al cuerpo de agua, provocando el aumento en los nutrientes.

Por otro lado, el río San Luis, que cuenta con una sola estación de monitoreo, tuvo elevada concentración de nutrientes y los máximos valores de PT y TMF de la cuenca. Dichos máximos ocurrieron a la vez y luego de abundantes lluvias en los días previos al monitoreo. Dado que no hay ciudades cercanas y la proporción de herbáceo natural en esa cuenca fue elevada, la alta carga de TMF podría estar relacionada al ganado que pudiera encontrarse en una pradera o campo natural, con acceso al curso de agua.

En un estudio realizado en 1999 por PROBIDES, se analizaron la calidad de agua de cursos de agua del departamento de Rocha, que incluyeron la Laguna Negra, el canal 2, el canal Andreoni, el río San Luis y el arroyo San Miguel. Observaron concentraciones de oxígeno bajas tanto en el río San Luis como en el arroyo San Miguel (Forni y Scasso, 2001). Lamentablemente dicho estudio no comprendió determinación de nutrientes.

6.8. Laguna Merín

La Laguna Merín, como cuerpo receptor de toda la carga aportada por la cuenca, ha evidenciado características de estado eutrófico en los últimos años. Han sido recurrentes los eventos de floraciones de cianobacterias (entre ellas, las del grupo *Microcystis*, observaciones de DLA y DCA, DINAMA). Dichas floraciones han sido registradas mediante imágenes satelitales (Figura 6.1) y en las denuncias ambientales de DINAMA.

Además de la carga de nutrientes determinada en este estudio, la laguna también recibe aportes desde la hemicuenca brasilera. En esa hemicuenca se han reportado grandes aportes de nutrientes y mala calidad de agua en algunos de los afluentes (FEPAM, 2020).

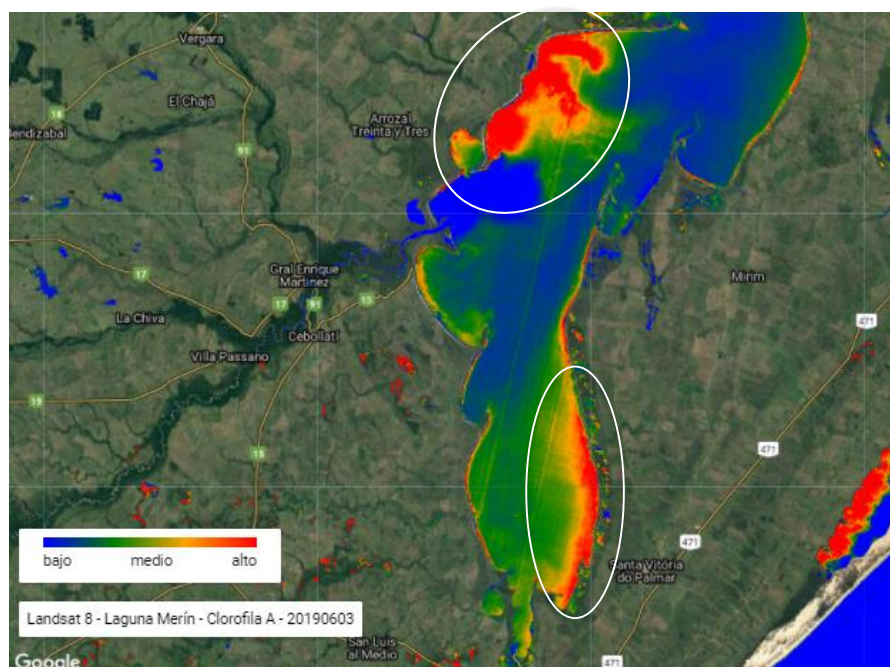


Figura 6.1 Imagen satelital de Landsat 8 y concentración de clorofila *a* tomada el 03/06/2019. La escala de colores representa la concentración de clorofila *a* desde valores bajos o ausente (azul) a elevados correspondiente a floraciones (rojos). Los círculos blancos señalan la región con floraciones fitoplanctónicas. Fuente: OAN-DINAMA.

Gran parte de los nutrientes que se aportan a los cuerpos lénticos sedimentan y quedan retenidos, pero sólo hasta que estén las condiciones favorables para su disponibilización. La resuspensión del fósforo puede darse por vientos o tormentas fuertes que remuevan el sedimento, o cambios en las condiciones químicas de la superficie éstos (Wetzel, 2001). Dado que es una laguna somera, la resuspensión sería frecuente. Por lo cual, si las actividades de la cuenca han aportado la carga de nutrientes que se ha estimado en el presente trabajo, es esperable que su disponibilidad sea óptima para el desarrollo de floraciones fitoplanctónicas. Además, dentro del fitoplancton, los organismos más exitosos en cuerpos lénticos eutróficos suelen ser las cianobacterias.

Como consecuencia de la pérdida de calidad de agua de la laguna, se pierden servicios ecosistémicos asociados a esta (Janssen *et al.*, 2020), que incluyen la recreación, el turismo y la pesca.

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se evaluó de forma integrada la calidad del agua de los principales afluentes de la Laguna Merín entre los años 2015 y 2019. Se concluyó que, si bien las concentraciones de nutrientes de los cuerpos de agua estuvieron en el rango esperable para sistemas lóticos, esto implica una carga de nutrientes elevada para un sistema léntico, la Laguna Merín.

A pesar de las limitaciones del estudio, fue posible evidenciar aquellas problemáticas que, por ser mantenidas en el tiempo (durante gran parte o todo el periodo de estudio), se vieron reflejadas en la calidad de agua de forma sostenida. Los principales factores condicionantes de la calidad de agua fueron los aportes de nutrientes desde actividades agrícolas (secano y arroz) y las ciudades más grandes de la cuenca (donde además se ubicaron las industrias incluidas en este estudio).

La evaluación de la variación espacial de los parámetros de calidad de agua permitió determinar las estaciones de monitoreo con mayor carga de nutrientes y relacionarlos con las actividades de la cuenca de cada estación (T1, SM1, SM2 y SL1). La evaluación de cambios a lo largo del tiempo en los parámetros analizados permitió determinar que la concentración de nutrientes en la cuenca ha disminuido levemente en el último año analizado (2019) (*objetivo específico 1*). Dicha disminución se reflejó en una disminución del estado trófico de algunas estaciones de monitoreo.

Los contaminantes antrópicos más importantes de la cuenca, dentro de lo analizado en el presente trabajo, fueron los nutrientes en exceso. A su vez, los coliformes termotolerantes y los compuestos halogenados adsorbibles presentaron eventos puntuales de concentraciones elevadas (*objetivo específico 2*). Por lo tanto, las acciones deberían concentrarse hacia la disminución de la exportación de carga de nutrientes desde la cuenca. Es de destacar que se continúa trabajando en profundizar en el análisis de fitosanitarios para establecer su situación con más certezas.

El exceso de nutrientes proviene de las actividades desarrolladas en la cuenca, dentro de las cuales, la agricultura fue la que aportó la mayor carga, según las estimaciones del presente trabajo (*objetivo específico 3*). A su vez, la carga de nutrientes de toda la cuenca es finalmente exportada a la laguna Merín, lo cual ha favorecido las floraciones de cianobacterias y el deterioro de la calidad de agua de la misma. Esto implica que dicho cuerpo de agua y los servicios ecosistémicos que brinda están en alto riesgo. Por otro lado, hay sitios con gran aporte de nutrientes también desde fuentes puntuales, como la subcuenca 41 (río Tacuarí), en la zona alta, y la 45 (arroyo San Miguel y río San Luis). En la primera, los principales aportes provendrían desde las industrias y centros poblados, mientras que en la segunda, la carga se debería a aportes desde la ganadería sobre herbáceo natural y desde cultivos de arroz.

Al evaluar el porcentaje de cumplimiento de los estándares de calidad de agua en cada estación de monitoreo (*objetivo específico 4*), se concluyó que este enfoque no es suficiente para reflejar la calidad de agua. La estación de monitoreo T1, que fue la de mayor concentración de nutrientes, cumplió en un 100% para 4 de los 5 parámetros del Decreto 243/79. Dicha estación no se diferenció de C1, que presentó valores de mejor calidad de agua. Uno de las causas es que el valor estándar del Decreto 253/79 para PT está por debajo de la gran mayoría de las concentraciones observadas en esta cuenca. Esto ocasiona que todas las estaciones se agrupan en la misma categoría (“incumplimiento en un alto porcentaje”) y se pierda de vista la variabilidad entre ellas. Esto resalta la importancia de los valores guía que se han propuesto, como los de la MTA (que incluye más parámetros), y la necesidad de nuevas herramientas nacionales de evaluación para guiar la toma de decisiones.

En análisis de IET (*objetivo específico 5*) evidenció diferencias entre estaciones y entre años, con mejoras en la calidad de agua durante el último año. La evaluación de posteriores campañas de monitoreo permitirá

determinar si dicha reducción se sostiene en el tiempo. A su vez, dichas diferencias no se vieron reflejadas en el porcentaje de cumplimiento.

La principal actividad de la cuenca es el cultivo de arroz, si bien el aporte de nutrientes por hectárea es relativamente bajo (en comparación con cultivos de secano), las modificaciones en la dinámica hidrológica por la alteración del suelo potenciarían los efectos negativos sobre la calidad del agua, tanto de los ríos como de la laguna. Para mejorar la calidad de agua de la cuenca y de la laguna, sería recomendable establecer áreas de protección de los bañados naturales que actúan como zona de amortiguación y captación de nutrientes (Hoffman *et al.*, 2009). Es probable que también sea necesario restaurar o favorecer dichos ecosistemas en zonas donde se han perdido. Dado que es una cuenca binacional, todas las acciones implican la cooperación y el compromiso de ambos países.

Dentro de la hemicuenca uruguaya también sería oportuno plantear una mejora en el tratamiento de efluentes de industrias (grandes y pequeñas), así como del saneamiento. Dicha acción es especialmente urgente en el la cuenca de la estación T1 (zona alta del río Tacuarí).

A futuro, es necesario realizar mejoras al plan de monitoreo, alguna de las cuales ya están en proceso de ejecución. A partir de 2020 comenzó a realizarse el análisis de sedimentos, que incluye fitosanitarios y nitrógeno y fósforo totales. Además, es necesario incluir estaciones de monitoreo en las cuencas altas de los ríos Olimar Grande y Tacuarí. Esto permitiría tener información certera del estado de calidad del agua con bajo nivel de impacto en el caso del Olimar Grande, y contar con datos propios y dentro del territorio uruguayo en el caso del Tacuarí. Reforzar el monitoreo de la Quebrada de los Cuervos mejoraría esta situación en Olimar Grande.

La subcuenca 42 no presenta ninguna estación de monitoreo por parte del MA y es la de mayor proporción de suelo utilizado para agricultura (70%). Dado que esa es una de las posibles causas de la eutrofización de la laguna, sería interesante incluir estaciones de monitoreo en dicha subcuenca.

Por otro lado, dado que cuantificar fitosanitarios en agua está fuertemente condicionado a eventos puntuales y a las propiedades del activo (coeficientes de partición y tiempo de degradación), sería un gran aporte evaluar la presencia de estos compuestos en tejido de organismos. En general los fitosanitarios son bioacumulados por animales acuáticos, en particular por invertebrados bentónicos o peces. Lo cual los hace una herramienta sólida y robusta de biomonitoreo. Dicha herramienta ya ha sido utilizada con éxito en nuestro país (Alonso *et al.*, 2019) y permitiría tener más certezas sobre los fitosanitarios que se aplican en exceso en la cuenca. Otro punto importante sobre estos contaminantes es la necesidad de continuar con los esfuerzos de ampliar el número de activos analizados, y lograr que en la cuenca de Laguna Merín se incluyan los más utilizados en los cultivo de arroz. A su vez, sería deseable que para algunos fitosanitarios, los límites de detección y cuantificación analíticos fueran menores.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ACA (Asociación cultivadores de arroz); GMA (Gremial de molinos arroceros); Udelar (Universidad de la República); INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) y LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay), 2018. Guía de Buenas Prácticas en el cultivo de Arroz en Uruguay. Última consulta 26/11/2020. <http://www.aca.com.uy/manual-de-buenas-practicas-agricolas/>
- Achkar M, Dominguez A y Pesce F. 2012. Cuenca de la Laguna Merín-Uruguay. Aportes para la discusión ciudadana. Programa Uruguay Sustentable. Redes Amigos de la Tierra. 22p
- Aldabe J, Rocca P y Claramunt S. 2009. Uruguay. Pág. 383 – 392 En: C. Devenish, D. F. Díaz Fernández, R. P. Clay, I. Davidson & I. Yépez Zabala Eds. Important Bird Areas Americas - Priority sites for biodiversity conservation. Quito, Ecuador: Bird Life International (Bird Life Conservation Series No. 16).
- Alonso J., Quintans, F., Taks, J., Conde, D., Chalar, G., Bonilla, S., ... y Méndez H., 2019. Water Quality in Uruguay: current status and challenges. En: UNESCO Eds. Water Quality in the Americas: risks and Opportunities. Interamerican Network of National Academies of Sciences-IANAS/UNESCO.
- Arocena, R. 2016. Principios y métodos de limnología: ejemplos de Uruguay. Rafael Arocena (editor). 2da ed. DIRAC-Facultad de Ciencias, Udelar. Montevideo, 328 p.
- Arocena, R, Chalar, G., Pacheco, J.P. 2018. Agriculture and elevation are the main factors for Pampasic stream habitat and water quality. Environmental Monitoring and Assessment, 190:254.
- Arocena, R., Chalar, G., Perdomo, C., Fabián, D., Pacheco, J.P., González, M., Olivero, V., Silva, M., García, P. (2011). Impacto de la producción lechera en la calidad del agua. Informe final de proyecto Nº 179 INIA.
- Beketov, M. A., Kefford, B. J., Schäfer, R. B., & Liess, M. (2013). Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(27), 11039-11043.
- Bentancor L, Nin M y Petraglia C. 2015. Cuenca de la Laguna Merín - Estado de situación consensuado. DINAGUA. Documento interno.
- Bonilla Sylvia, Haakonson S, Somma A, Gravier A, Britos A, Vidal L, De León L, Brena B, Pérez M, Piccini C, Martínez G, Chalar G, González M, Martigani F y Aubriot L. 2015. Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. INNOTECH Vol. 10. 9-22.
- Brazeiro, A., Panario, D., Soutullo, A., Gutierrez, O., Segura A. y Mai P. 2012. Clasificación y delimitación de las eco-regiones de Uruguay. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – Facultad de Ciencias / Vida Silvestre/ Sociedad Zoológica del Uruguay/CIEDUR.
- Brazeiro, A., M. Achkar, C. Toranza, and L. Bartesaghi. 2020. Agricultural expansion in Uruguayan grasslands and priority areas for vertebrate and woody plant conservation. Ecology and Society 25(1):15.
- Bonanse, R. I., Filippi, I., Wunderlin, D. A., Marino, D. J. G., y Amé, M. V. 2018. The fate of glyphosate and AMPA in a freshwater endorheic basin: an ecotoxicological risk assessment. Toxics, 6(1), 3.
- CARU Comisión Administradora del Río Uruguay, 2019. Digesto sobre el uso y aprovechamiento del Río Uruguay. Comisión Administradora del Río Uruguay. 141pp.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment), 2010. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life - Ammonia. Canadian Environmental Quality Guidelines. 8pp.
- Chorus, I. y Bartram, J., 1999. Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring and management. Londres: E & FN Spon.
- Couto, P. 2019. Rendimientos por departamento de cultivos de secano Soja, trigo y cebada. Economía y mercado. 62-65.
- Croghan, C y Egeghy, P.P 2003. Methods of dealing with values below the limit of detection using SAS. EPA. Última consulta 22/12/2020 https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=64046
- Decreto 253/79. Medio Ambiente. Ecología. Recursos Naturales. Recursos Hídricos. Prevención de Contaminación de las Aguas. Disponible al 27/08/2020 en: <http://www.caru.org.uy/web/2020/01>
- Donohoe, R. M., & Curtis, L. R., 1996. Estrogenic activity of chlordecone, o, p'-DDT and o, p'-DDE in juvenile rainbow trout: induction of vitellogenesis and interaction with hepatic estrogen binding sites. Aquatic toxicology, 36(1-2), 31-52.
- ECHA (European Chemical Agency), 2020 a. Comments on draft risk profile. Última consulta 19/12/2020. https://echa.europa.eu/documents/10162/28991553/pops_comments_draft_rp_methoxychlor_en.pdf/5db5810a-2e84-3be8-cd07-c2e689a6c8ec

- ECHA (European Chemical Agency), 2020 b. Persistence, bioaccumulation and toxicity (PBT) assessment list <https://echa.europa.eu/es/pbt/-/dislist/details/0b0236e1809fea57>
- Evia G. y Musitelli D. - PROBIDES. 2015. Los humedales Ramsar y la producción de arroz. Arroz, Setiembre 2015; 45-48pp.
- FAO, 2018. Productos 1 y 2 de consultoría especialista en gestión de recursos, Proyecto FLURU. 95pp.
- FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler/RS), 2020. Relatório da qualidade da água superficial do estado do Rio Grande do Sul. 87pp
- Forni F. y Scasso F. 2001. Calidad del agua en el Departamento de Rocha. Documentos de Trabajo, N° 39, PROBIDES. 28pp.
- GEMS/Agua, Guía operativa 3ra Ed, 94.1.
- GESTA - Agua. 2014. Propuesta de modificación del decreto 253/79: Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas.
- Gobierno de Uruguay, 2017. Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes 2017-2030 Uruguay. 359 pp.
- Goyenola G., Meerhoff M., Teixeira-de Mello F., González-Bergonzoni I., Graeber D., Fosalba C., Vidal N., Mazzeo N., Ovessen N.B., Jeppesen E., Kronvang B. 2015. Phosphorous dynamics in lowland streams as a response to climatic, hydrological and agricultural land use gradients. Journal of Hydrology and Earth System Sciences. 12, 3349-3390.
- Hoffman, CC., Kjaergaard, CH., Uusi-Kämpä, J., Hansen, HC. y Kronvang, B., 2009. Phosphorus retention in riparian buffers: review of their efficiency. Journal of Environmental Quality, 38(5):1942-55.
- Husson, F., Lê, S. y Pagès J. 2017. Explanatory multivariate analysis by example using R. Chapman & Hall/CRC.
- NCBI (National Center for Biotechnology Information), 2020. Último acceso 19/12/2020. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- IBGE (Instituto brasileiro de geografia y estadística). Última consulta 30/09/2020 <https://www.ibge.gov.br/>
- INE (Instituto Nacional de Estadística), 2011. <http://www.ine.gub.uy/censos-2011>. Último acceso 24/3/2020.
- INE (Instituto Nacional de Estadística), 2019. Anuario estadístico 2019. <https://www.ine.gub.uy/documents/10181/623270/Anuario+Estadistico+2019/f854fb27-ad7f-4ce3-8c37-005ade0a6140>
- INIA, (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) 2019. Estadísticas y resumen de la zafra 18-19. Base de datos empresas arroceras. Último acceso: 11/9/2020, <http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/programas-nacionales-de-investigaci%C3%B3n/Programa-Nacional-de-Investigacion-en-Produccion-de-Arroz/informes-de-zafas>
- INIA, (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) 2020. Evaluación tecnológica y productiva de la zafra de arroz 2020. Última consulta 10/11/2020 <http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/programas-nacionales-de-investigaci%C3%B3n/Programa-Nacional-de-Investigacion-en-Produccion-de-Arroz/informes-de-zafas>
- IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz), s/f. Produtividades municipais, safra 2014/15. Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura e Pecuária. Fecha de consulta 5/11/2020 consulta <http://stirga2018-admin.hml.rs.gov.br/upload/arquivos/201805/22093455-produtividade-municipios-safra-2014-e-2015.pdf>
- Janssen, A. B., Hilt, S., Kosten, S., de Klein, J. J., Paerl, H. W., y Van de Waal, D. B. 2020. Shifting states, shifting services: Linking regime shifts to changes in ecosystem services of shallow lakes. Freshwater Biology.
- Jeppesen, E., Søndergaard, M., Lauridsen, T. L., Davidson, T. A., Liu, Z., Mazzeo, N., ... y Meerhoff, M. 2012. Biomaniipulation as a restoration tool to combat eutrophication: recent advances and future challenges. In *Advances in ecological research* (Vol. 47, pp. 411-488). Academic Press.
- Lamparelli, M. C., 2004. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 235 pp.
- Lampert W. y Sommer U. 2007. Limnoecology: The Ecology of Lakes and Streams. Oxford University Press.
- Lescano, C., Ruibal, M., Barreto, P., Piñeiro, V., Lozoya, J., Perdomo, C., Rodríguez-Gallego, L. 2017. Rol de los pastizales naturales en la retención de nutrientes provenientes de la agricultura. INNOTEC, 13 (78 - 91).
- MA, 2021. Monitoreo de calidad de agua de cuenca de la Laguna Merín, 2019. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/calidad-ambiental>
- MGAP, 2013. Guía de Buenas Prácticas Agrícolas para sistemas con Agricultura de Secano. Última consulta

- 30/1/2020. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/guia-buenas-practicas-agricolas-para-sistemas-agricultura-secano>
- MGAP, 2018. Informe metodológico cobertura 2018 MGAP. Informe técnico.
- MGAP, 2019. Datos Preliminares basados en la Declaración Jurada de Existencias DICOSE - SNIG 2019. Última consulta 30/09/2020 <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/mgap-datos-preliminares-basados-en-la-declaracion-jurada-de-existencias-dicose-snig-2019>.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2003. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment.
- MTA (Mesa Técnica del Agua), 2017. Establecimiento de niveles guía de indicadores de estado trófico en cuerpos de agua superficiales. Documento de trabajo interno. 45pp.
- MVOTMA -DINAMA, 2008. Guía de gestión integral de aguas en establecimientos lecheros - diseño, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de efluentes. 230 pp.
- MVOTMA-DINAMA, 2013. Informe del estado del ambiente de Uruguay. 259pp. Última consulta 4/12/2020 <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/calidad-ambiental>
- MVOTMA- DINAMA, 2016. Informe anual de evaluación de calidad de agua en el arroyo Yermal Chico, paisaje protegido Quebrada de los Cuervos. 15 pp.
- MVOTMA-DINAMA, 2017 a. Monitoreo de calidad de agua Laguna Merín, Informe 2014-2016. 76 pp. Última consulta 4/12/2020 <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/calidad-ambiental>
- MVOTMA-DINAMA, 2017 b. Guía de buenas prácticas ambientales y sanitarias de establecimientos de engorde de bovinos a corral. 57 pp.
- MVOTMA-DINAMA, 2020 a. Informe Evolución de la Calidad de Agua en la cuenca del río Santa Lucía, 5 años de información (2015 - 2019). 142 pp. Última consulta 4/12/2020 <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/calidad-ambiental>
- MVOTMA-DINAMA, 2020 b. Evolución de la calidad de agua en la cuenca del río San Salvador. Periodo 2014-2019. 77 pp. Última consulta 4/12/2020 <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/calidad-ambiental>
- Newbold, J., Mulholland, P., Elwood, J., y O'Neill, R. 1982. Organic carbon spiralling in stream ecosystems. *Oikos*, 38(3), 266-272.
- O'Brien, A., Townsend, K., Hale, R., Sharley, D., & Pettigrove, V., 2016. How is ecosystem health defined and measured? A critical review of freshwater and estuarine studies. *Ecological Indicators*, 69, 722-729.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos), 1982. Eutrophication des eaux. Méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte. Paris. Environment Canada 164pp.
- OMS (Organización Mundial de la Salud), 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva.
- Perdomo, C. 2013. Metodología de estimación de aportes difusos de nitrógeno y fósforo a aguas superficiales desde suelos bajo uso agropecuario. Documento interno.
- PNUMA-GEF, 2012. Informe de Uruguay del proyecto GMP. Proyecto GFL/PMS 3778. 59 pp.
- RAP-AL (Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas de América Latina), 2012. Clorpirifos: Un posible COP a nivel global. 46pp. Última consulta 19/12/2020 https://rap-al.org/wp-content/uploads/2017/09/Clorpirifos_Rev_-2.pdf
- Silvia, F., Ferrero, A., & Vidotto, F. 2020. Current and future scenarios of glyphosate use in Europe: Are there alternatives. *Advances in Agronomy*, 163, 219-278.
- Smith VH, Tilman GD y Nekola JC. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient input on freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* Vol. 100. 179-196.
- SNAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas) s/f. Última consulta 4/12/202 http://www.snap.gub.uy/sisnap/web/mapa_conceptual/snap
- Sosa B, Díaz I, Canabal C y Achkar M. 2018. Inventario Nacional de Humedales. ACUERDO DINAMA-LDSGAT. Documento interno. Mapas en el Observatorio Ambiental Nacional.
- Soutullo A y Barthesaghi L. 2009. Propuesta de diseño de un Sistema Nacional de Áreas Protegidas representativo y eficiente: prioridades territoriales y temporales para La creación de áreas protegidas. Serie Documentos de trabajo N°20. Proyecto "Fortalecimiento del proceso de implementación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Uruguay" (URU 06/G34) - DINAMA/MVOTMAPNUD/GEF.
- Soutullo A., Bartesaghi L., Achkar M., Blum A., Brazeiro A., Ceroni M., Gutiérrez O., Panario D. y Rodríguez-Gallego L. 2012. Evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos de Uruguay. Informe Técnico. Convenio MGAP/PPR – CIEDUR/ Facultad de Ciencias/Vida Silvestre Uruguay/Sociedad Zoológica del Uruguay. 20p.
- Témez J.R. 1977. Modelo matemático de transferencia precipitación aportación. ASINEL.

- Vannote *et al.* 1980. The river continuum concept. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 37:130-137.
- Valvi, D., Mendez, M. A., Martinez, D., Grimalt, J. O., Torrent, M., Sunyer, J., & Vrijheid, M., 2012. Prenatal concentrations of polychlorinated biphenyls, DDE, and DDT and overweight in children: a prospective birth cohort study. Environmental health perspectives, 120(3), 451-457.
- Wetzel, R. G. 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. Elsevier Academic Press. Third Edition, 1006pp.
- Zuur A, Ieno E. y Smith G. 2007. Analysing Ecological Data. Springer, New York.
- Zuur A., Ieno E. y Elphick C. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. Methods in Ecology and Evolution, 1: 3-4.

ANEXO I

Especificaciones del plan de monitoreo

Tabla 1. Coordenadas y descripción de las estaciones de monitoreo de calidad de agua en la cuenca de la Laguna Merín de DSCA-MA.

Estación	Latitud S	Longitud O	Descripción
SL1	-33.601824	-53.725131	Río San Luis – Puente sobre ruta 19, próximo a localidad San Luis al Medio.
SM1	-33.689167	-53.531944	A° San Miguel – Puente ruta 19 a 5,5 Km de la ciudad de Chuy.
SM2	-33.658870	-53.533630	A° San Miguel – Entrada canal arrocería, navegación 5 Km aguas arriba de ruta 19.
C0	-33.829494	-54.768973	Río Cebollatí – Puente Ruta 8, aprox. 76 Km al sur de la ciudad de Treinta y Tres.
C1	-33.613292	-54.328810	Río Cebollatí – Puente Ruta 14 próximo a la localidad Averías.
C2	-33.232095	-53.810336	Río Cebollatí – 4 Km aguas arriba de La Charqueada, ingreso por camino La Quemada.
C3	-33.158403	-53.651085	Río Cebollatí – Desembocadura en Laguna Merín
O1	-33.263061	-54.376490	Río Olimar Grande – 4,5 Km aguas abajo del río Olimar Grande, de la ciudad de Treinta y Tres, incluyendo las piletas de tratamiento de OSE.
O2	-33.253828	-53.906997	Río Olimar Grande – Ingreso a aprox. 13 Km de “La Charqueada” por ruta 17.
T1	-32.530523	-54.130611	Río Tacuarí - Puente Ruta 8 próximo a la localidad Arachania.
T2	-32.769215	-53.735161	Río Tacuarí - Puente Ruta 18 próximo a localidad Plácido Rosas.
T3	-32.758844	-53.341039	Río Tacuarí - Desembocadura de cursos Tacuarí y Grande en Laguna Merín.
Y1	-32.533749	-53.446399	Río Yaguarón – Aprox. 12 Km aguas arriba de la ciudad de Río Branco (Puente Internacional).
Y2	-32.560983	-53.417588	Río Yaguarón – Aprox. 6 Km aguas arriba de la ciudad de Río Branco (Puente Internacional).
Y3	-32.592484	-53.351744	Río Yaguarón – Aprox. 4 Km aguas abajo de la ciudad de Río Branco (Puente Internacional).

Tabla 2. Listado de fechas de monitoreo por estación, las celdas grises corresponden a monitoreo realizado y las celdas blancas a monitoreo ausente.

Año y mes/Estación		C0	C1	C2	C3	O1	O2	SL1	SM1	SM2	T1	T2	T3	Y1	Y2	Y3
2015	abril															
	agosto															
	noviembre															
2016	abril															
	junio															
	agosto															
	diciembre															
2017	marzo															
	junio															
	setiembre															
	diciembre															
2018	marzo															
	junio															
	diciembre															
2019	junio															
	setiembre															
	diciembre															

Tabla 3. Parámetros analizados en cada estación de monitoreo, las celdas grises indican que corresponde el análisis, las celdas blancas indican que no corresponde.

Parámetro	C0	C1	C2	C3	O1	O2	SL1	SM1	SM2	T1	T2	T3	Y1	Y2	Y3
Fisicoquímicos															
Nutrientes															
Cloa															
TMF															
AOX															
Cont. orgánicos															

ANEXO II

Especificaciones de los parámetros hidroclimáticos

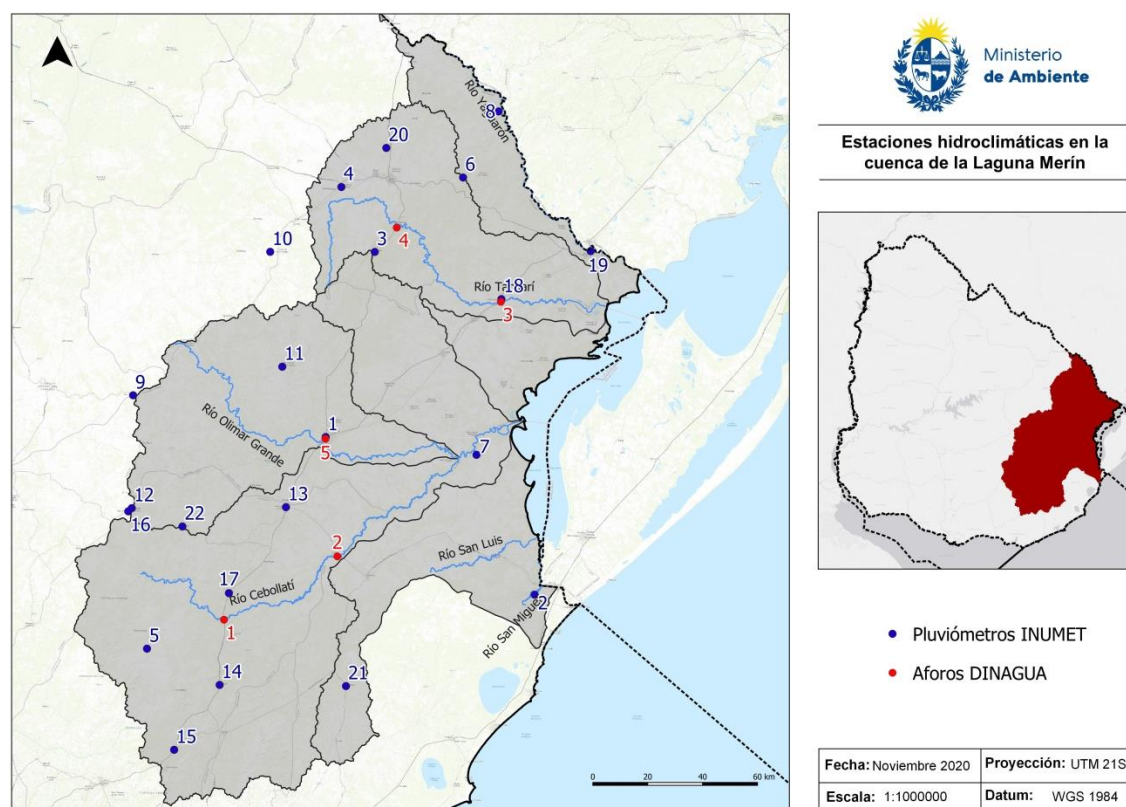


Figura 1. Localización de pluviómetros de INUMET y estaciones de aforo de DINAGUA utilizados en el informe.

Tabla 1 Datos de los aforos utilizados especificando el caudal medio (Q medio) área de la cuenca de aporte con cierre en el aforo (Área), el caudal específico en el período 2015-2019 (Q específico), las estaciones de monitoreo que estarían representadas por el aforo (Estaciones) y su correspondiente subcuenca.

Aforo	Q medio (m ³ /s)	Área (km ²)	Q específico (L/s/km ²)	Estaciones	Subcuenca
Treinta y Tres (R.8)	96,8	4696	20,6	O1	43
Picada de Corbo	54,9	2895	19,0	C0	44
Paso Averías	132,7	7859	16,9	C1	44
Paso Dragón	55,0	3544	15,5	T2	41
Paso Borches	30,9	1421	21,8	T1	41

Tabla 2. Numeración utilizada en el presente trabajo (y su correspondencia con la denominación original de DINAGUA (aforos) e INUMET (pluviómetros).

Numeración	Denominación original
Aforos	
1	Picada de Corbo
2	Paso Averías
3	Paso Dragón
4	Paso Borches
5	Treinta y Tres
Pluviómetros	
1	Estación Meteorológica Treinta y Tres
2	18 de Julio
3	Arbolito
4	Bañado Medina
5	Barriga Negra (Polanco)
6	Cañas
7	Cebollatí
8	Centurión
9	Cerro Chato
10	Cerro de la Cuentas
11	Isla Patrulla
12	José Batlle y Ordoñez
13	José Pedro Varela
14	Mariscala
15	Marmarajá
16	Nico Pérez
17	Pirarajá
18	Plácidos Rosas
19	Río Branco
20	Tres Boliches
21	Velázquez
22	Zapicán