



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



PEDECIBA  
GEOCIENCIAS

## **TESIS DE MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS-PEDECIBA**

**Descripción y modelación de la presencia y  
crecimiento de *Microcystis aeruginosa* (Kützing)  
Kützing 1846 (cianobacteria) en función de  
variables ambientales en la costa del Río de la Plata  
(Montevideo)**

**Lic. Lourdes Gabito**

**Orientador de Tesis: Dr. Danilo Calliari**

**Co-orientadora de Tesis: Dra. Carla Kruk**

**Rocha, Uruguay**

**2019**

Tesis presentada como parte de los requisitos para la obtención del título  
de Magister en Geociencias

Fecha: 5 de abril de 2019

Tribunal:

Dra. Beatriz Brena

Dra. Beatriz Yannicelli

Dra. Carolina Crisci

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi mamá, a mi familia humana y a mi familia canina.

A mis amigas del alma.

A mis orientadores, Danilo Calliari y Carla Kruk.

A las integrantes del tribunal: Beatriz Brena, Beatriz Yannicelli y Carolina Crisci

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

A INUMET por proporcionarme los datos meteorológicos

A los integrantes del Grupo de Ecología Funcional de Ecosistemas Acuáticos del CURE-Rocha.

A los integrantes del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas de Coquimbo-Chile.

A los integrantes del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción- Chile

A papá por acompañarme siempre...

## CONTENIDO

Resumen	v
1. Introducción	1
1.1 Cianobacterias	1
1.2 <i>Microcystis aeruginosa</i> (Kützing) Kützing 1846	2
1.3 Predicción: modelos y parametrización	4
1.4 Río de la Plata	7
1.5 Características de la zona costera del Río de la Plata, playas de Montevideo	10
1.6 Importancia del estudio de las floraciones de <i>M. aeruginosa</i>	14
2. Hipótesis	17
3. Predicciones	17
4. Objetivo general	18
4.1 Objetivos específicos	18
5. Metodología	20
5.1 Área de estudio	20
5.2 Base de datos meteorológicos	21
5.3 Base de datos ambientales y de presencia- ausencia de floraciones de <i>M. aeruginosa</i>	21
5.4 Caracterización ambiental	24

5.5 Variables ambientales asociadas a la presencia de floraciones	26
5.6 Modelación del crecimiento de <i>M. aeruginosa</i> en función de las variables ambientales	28
6. Resultados	31
6.1. Variables meteorológicas, ambientales y biológicas de <i>M. aeruginosa</i>	31
6.2. Descripción de variables meteorológicas (2004-2014)	32
6.3. Descripción ambiental y biológica de las playas (2006-2014)	36
6.4 Presencia de <i>M. aeruginosa</i> durante el período 2006-2011	41
6.5 Variables biológicas vinculadas a las variables ambientales	48
6.6 Variables ambientales asociadas a la presencia de floraciones	51
6.7 Parametrización del crecimiento de <i>M. aeruginosa</i>	56
6.8 Variación de la tasa de crecimiento de <i>M. aeruginosa</i> en función de gradientes ambientales	59
7. Discusión	65
7.1 Caracterización climática	65
7.2 Caracterización biológica: clorofila a, microcistina y abundancia de <i>M. aeruginosa</i>	66

7.3 Distribución espacial y temporal de las floraciones_____	71
7.4 Condiciones que favorecen la ocurrencia de floraciones_____	74
7.5 Modelación del crecimiento de <i>M. aeruginosa</i> en función de las variables ambientales_____	77
8. Conclusiones y Perspectivas_____	81
9. Referencias Bibliográficas_____	84

## RESUMEN

*Microcystis aeruginosa*, cianobacteria formadora de floraciones potencialmente tóxicas, produce microcistinas que pueden promover trastornos hepáticos y neurotóxicos. En Montevideo las floraciones ocurren en su mayoría en verano, afectando la actividad turística y representando un riesgo para la salud humana. El objetivo de este trabajo es determinar las variables más importantes que regulan la presencia, desarrollo y distribución de floraciones de *M. aeruginosa* y evaluar las condiciones ambientales estadísticamente asociadas a su aparición, establecimiento y desarrollo en las playas de Montevideo. Se estudió la información generada por los monitoreos de la Intendencia de Montevideo y de la Dirección Nacional de Medio Ambiente en 24 playas. Se vio que la distribución de floraciones está asociada a la posición del frente de salinidad y a la morfología, profundidad, energía y presencia de tributarios de cada playa. La playa Ramírez fue la más afectada. El verano del 2010 tuvo la mayor cantidad de floraciones coincidiendo con altos caudales de los Ríos Paraná y Uruguay, precipitaciones ocurridas desde octubre de 2009 pudiendo estar asociadas a un evento Niño moderado. Para conocer el comportamiento de *M. aeruginosa* frente a diferentes gradientes ambientales y predecir su presencia y tasa de crecimiento se generaron un CART y un modelo mecanicista a partir de la salinidad, irradiancia y temperatura. Según el CART las variables que más influyeron en la presencia de las floraciones fueron la temperatura del aire y la salinidad. Se construyó un modelo

mecanicista que describió el crecimiento de *M. aeruginosa* con una tasa máxima de  $0,17 \text{ día}^{-1}$  en condiciones óptimas encontradas en los muestreos. La salinidad fue la variable que más influyó en el crecimiento de *M. aeruginosa*. En presencia de floraciones en Salto Grande, y en los Ríos Negro y Uruguay junto con altos caudales del Uruguay y Paraná, inferimos que las floraciones se originan aguas arriba, crecen y se desarrollan al encontrar condiciones ambientales adecuadas en las playas y son acumuladas por el viento. Por esta razón las floraciones en Montevideo podrían ser de origen local o mixto, información fundamental a tener en cuenta en los planes de manejo en playas del departamento.

**PALABRAS CLAVES:** *Microcystis aeruginosa*, floraciones, playa, CART, modelos mecanisitas, Montevideo.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Cianobacterias

Uno de los grupos más estudiados dentro de la comunidad fitoplanctónica son las cianobacterias. Estos organismos son procariontes fotosintetizadores con características comunes a las bacterias y a las microalgas eucariotas, lo que los hace únicos en cuanto a su fisiología, tolerancia a condiciones extremas y flexibilidad adaptativa (Paerl, 1988; Reynolds et al., 1987). Bajo determinadas condiciones ambientales las cianobacterias pueden presentar un crecimiento abrupto en sus abundancias en un período corto de tiempo (días o semanas) (Smayda, 1997). En este sentido, Oliver y Ganf (2000) definen como floración a un evento de presencia de cianobacterias con una abundancia mayor a  $2 \times 10^4$  cél.ml<sup>-1</sup>. Las condiciones en las que ocurren las floraciones están asociadas a procesos de eutrofización y estación estival incluyendo altas temperaturas, alta radiación solar, alta carga de nutrientes y estabilidad de la columna de agua. Estas floraciones pueden traer diversos efectos adversos para el ecosistema incluyendo disminución del oxígeno, deterioro de la calidad del agua, muerte de organismos acuáticos y producción de toxinas (Reynolds et al., 1987; Wetzel, 1983), causando disminución de la diversidad biológica e interferencia con los usos antrópicos, comprometiendo los servicios ecosistémicos (ej. agua para potabilización,

para el consumo por la fauna silvestre y el ganado, recreación, navegación, pesca) y generando daños económicos (Jacoby et al., 2000; Kalff, 2002).

## **1.2 *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing 1846**

*Microcystis aeruginosa* se encuentra entre las especies de cianobacterias que más frecuentemente forma floraciones tanto a nivel mundial como local (Bonilla et al., 2015; Reynolds et al., 1987). Es potencialmente tóxica ya que es capaz de producir microcistinas, una familia de péptidos cíclicos que se une a las fosfatasa provocando la lisis de los hepatocitos (Zurawell et al., 2005). La exposición aguda o crónica a esta toxina puede promover trastornos intestinales y hepáticos crónicos (Azevedo et al., 2002; Falconer, 1996; Vidal et al., 2017), así como efectos neurotóxicos (Pearson et al., 2016; Rastogi et al., 2014). Esta especie es formadora de floraciones superficiales acumulativas (Reynolds et al., 1987, Bonilla, 2009). Existen una diversidad de especies y géneros similares a *Microcystis aeruginosa* que son confundidos en los análisis de fitoplancton de rutina. Por estas razones, y basándose en similitudes genotípicas y morfológicas y de preferencias ambientales se propuso la unificación de especies de *Microcystis* en un solo complejo de *Microcystis aeruginosa* (CMA) (Otsuka et al., 1999, 2001; Harke et al., 2016).

En *Microcystis aeruginosa* y otras especies del CMA la presencia de mucílago y aerótopos proporcionan la capacidad de regular su

flotabilidad y su posición en la columna de agua. Por otro lado, el mucilago puede ayudar a mantener un microambiente adecuado para las células y evitar su consumo por parte de herbívoros (Reynolds, 2007). Este grupo de cianobacterias son además favorecidas en condiciones de altas temperaturas siendo su óptimo de crecimiento entre 20 y 27°C (Reynolds et al., 1981; Reynolds, 2006; Kruk et al., 2017). La estabilidad de la columna de agua también beneficia el crecimiento de estos organismos (Reynolds et al., 1981). *Microcystis aeruginosa* se ve beneficiada por la alta disponibilidad de nitrógeno en forma de amonio (Oliver y Ganf, 2000) y por altas concentraciones de fósforo (Reynolds et al., 1981). Presenta una amplia tolerancia a intensidades de irradiancia incidente gracias a su capacidad de regular su posición en la columna de agua y a la presencia de pigmentos accesorios de protección frente a radiación ultravioleta (Reynolds et al., 1981), además presenta un alto nivel de irradiancia de saturación ( $I_k$ ) (Chorus y Bartram, 2012). La salinidad afecta negativamente el crecimiento de *M. aeruginosa* y otras especies CMA ya que son organismos de agua dulce y el aumento en la salinidad produce estrés osmótico (Tonk, 2007), disminuyendo su tasa de crecimiento a medida que esta aumenta (Kruk et al., 2017; Sobrino et al., 2004). La máxima salinidad tolerada varía entre cepas (Otsuka et al., 1999). Puede sobrevivir con salinidades de entre 2 a 17,5 (Orr et al., 2004; Paerl y Huisman, 2009; Tonk, 2007) siendo su crecimiento óptimo con salinidades hasta 4 (Robson y Hamilton, 2004). De acuerdo con Atkins et al. (2001) y Mazur-Marzec et al.

(2010) el límite de tolerancia para el crecimiento es de 10. Según Black et al. (2011) es 12,6 y de acuerdo con Verspagen et al. (2006) el límite sería de 14.

Entre las variables que indirectamente pueden afectar el crecimiento y la distribución de estas especies se encuentran el viento y las precipitaciones. El viento a velocidades medias puede trasladar y acumular las floraciones en zonas de remanso como la costa (Elliott et al., 2005; Wu et al., 2010) mientras que a velocidades más altas puede inducir fuerte mezcla de la columna de agua generando efectos negativos como la disgregación de la floraciones (Blottière et al., 2014). Según estos autores la velocidad del viento por encima de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (7,2 km/h) perjudica la formación de floraciones siendo su efecto negativo aún mayor cuando el área de acción del viento es más grande (May et al., 2003). El aumento del caudal asociado a mayores precipitaciones en la cuenca puede favorecer el transporte de las floraciones o inóculos desde aguas arriba hacia la zonas bajas de la cuenca o incluso estuarinas (Robson y Hamilton, 2004) llegando a ser registradas en bajas abundancias en el mar (Kruk et al., 2017; Martínez de la Escalera et al., 2017).

### **1.3 Predicción: modelos y parametrización**

Es importante conocer el comportamiento de *M. aeruginosa* frente a diferentes gradientes ambientales para poder predecir su respuesta, como

por ejemplo su presencia o ausencia o su tasa de crecimiento en diferentes condiciones. Para ello se utilizan modelos estadísticos y mecanicistas. Dentro de los modelos estadísticos, se encuentran las aproximaciones de aprendizaje automático (AA). Estas aproximaciones están caracterizadas por el uso masivo de algoritmos y recursos computacionales para manejar grandes conjuntos de datos, un gran número de variables y estructuras de datos complejas. Los objetivos del AA supervisado, son aprender a predecir una variable de respuesta que puede ser continua (problema de regresión) o categórica (problema de clasificación) en base a un conjunto de variables explicativas (Crisci et al., 2012).

Dentro de las técnicas de AA, los CARTs (de su nombre en inglés “Classification and Regression Trees”) (Breiman et al., 1984) son ampliamente utilizados en diversas áreas del conocimiento debido a su salida gráfica de fácil interpretación. En lo que refiere concretamente a árboles de clasificación, son métodos de partición binaria recursiva que se utilizan para clasificar casos, como por ejemplo presencia o ausencia, a partir de un grupo de variables explicativas. Las particiones binarias se realizan a partir de condiciones de las variables explicativas con el objetivo de generar nodos resultantes más *homogéneos* que el nodo original. Como resultado de la partición binaria sucesiva, se agrupan los casos en grupos o nodos terminales con la máxima homogeneidad posible a cada uno de los cuales se les adjudica una etiqueta (e.g. presencia o ausencia) (Breiman et al., 1984). Este tipo de método ha sido exitosamente utilizado con

diferentes objetivos en ecología de fitoplancton. Por ejemplo para validar la clasificación de organismos fitoplanctónicos en grupos funcionales (Bourel y Segura, 2018; Kruk, et al., 2017; Kruk y Segura, 2012). También ha sido utilizado para la predicción de las variaciones en las comunidades de fitoplancton frente a cambios ambientales (Crisci et al., 2017). Por ejemplo para predecir la presencia o ausencia de *Didymosphenia geminata*, diatomea formadora de floraciones, utilizando variables ambientales y meteorológicas (Kumar et al., 2009) y para describir como patrones de competencia y cambios estructurales inciden en la comunidad fitoplanctónica (Zhao et al., 2008). Asimismo mediante otros métodos de partición relacionados a los CART, como el modelo Random Forests (Breiman, 2001) se evaluaron diferentes estrategias de muestreo de *M. aeruginosa* y la predictibilidad de su presencia utilizando variables ambientales (Segura et al., 2017).

Los modelos mecanicistas permiten modelar la evolución del crecimiento de una población en función de las variables ambientales. Para ello los procesos básicos son representados por funciones simples cuyos parámetros pueden ajustarse para representar características conocidas de especies o grupos de interés y pueden ser forzados explícitamente por las condiciones ambientales (Fennel y Neuman, 2004). Los parámetros caracterizan la forma de la respuesta y se asumen constantes en determinadas condiciones controladas. Los modelos mecanicistas en general son herramientas muy útiles pero su utilidad para para resolver

problemas ambientales puede ser limitada por incertidumbres en relación a la correcta parametrización de la relación funcional organismo-ambiente (Itayama et al., 2005). Existen varios antecedentes para la aplicación de dichos modelos para estudiar a las cianobacterias y a *Microcystis* en particular. Howard (2001) modificó el modelo SCUM'96 (simulación del movimiento subacuático cianobacteriano) para simular el movimiento y crecimiento de *M. aeruginosa* y simuló la migración vertical dentro de la columna de agua. Además simuló el calentamiento y enfriamiento de los lagos, la mezcla turbulenta y otros procesos ambientales para estudiar la respuesta de las cianobacterias a la variabilidad ambiental. Por otro lado Robson y Hamilton, (2004) aplicaron un modelo hidrodinámico-ecológico tridimensional acoplado, ELCOM-CAEDYM, durante el desarrollo y el posterior declive de una importante floración en el Río Swan (Australia). El modelo, previamente calibrado para los años más típicos cuando no hubo floración, reprodujo con precisión las condiciones hidrodinámicas inusuales, así como la magnitud aproximada y el momento de la floración de *M. aeruginosa*, captando las interacciones complejas entre el entorno físico y biogeoquímico, e indicando la utilidad del modelo como una herramienta predictiva para la gestión.

#### **1.4 Río de la Plata**

El Río de la Plata (35°00'-36°10' S; 55°00' -58°10' W) es un estuario turbio y somero de 10 m de profundidad media y 320 km de longitud. Tiene

una cuenca hidrográfica que abarca 3.100.000 km<sup>2</sup> en territorios de Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. Sus principales tributarios, los Ríos Paraná y Uruguay, aportan un caudal medio anual de 22.000 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Acha et al., 2008). Este estuario es de gran importancia para nuestro país y la región ya que alberga 15 millones de habitantes en sus márgenes y en su cuenca se desarrollan actividades agrícolas e industriales. Por otro lado sustenta diversas actividades económicas importantes para el país como pesca artesanal y comercial, transporte marítimo, recreación y turismo, además es zona de cría de varias especies de peces para su comercialización (Acha y Macci, 2000; Acha et al., 1999) y hábitat de mamíferos marinos y aves (Kurucz et al., 1998). Algunos de sus usos son conflictivos ya que también se utiliza como receptor de desechos crudos y de efluentes industriales y urbanos y como destino final del saneamiento, deposición de residuos de dragado y la escorrentía de la cuenca agrícola-ganadera (CARP, 1990; Kurucz et al., 1998). Puede ser dividido en dos regiones principales en función de su geomorfología interior y exterior, separadas por una zona poco profunda perpendicular al eje principal entre Montevideo y Punta Piedras (Nagy et al., 2002). La distribución de la salinidad depende del aporte de los tributarios, el viento y la marea. El gradiente de salinidad entre la zona interna y externa del Río de la Plata se intensifica en un frente de salinidad. Gradientes verticales de salinidad han sido descritos desde la zona media a externa del estuario, siendo mayores en la zona media como resultado de la penetración subsuperficial de aguas

más salinas (Guerrero et al., 1997). Asociado al frente de salinidad existe un máximo de turbidez y posterior descenso brusco coincidente con la zona de máxima estratificación salina y con el máximo gradiente horizontal de salinidad. (Framiñan y Brown, 1986). La estratificación en el estuario varía en diferentes escalas de tiempo: los vientos pueden actuar a una escala diaria o sinóptica mientras que a escalas temporales más grandes, el estuario está bajo los efectos de las variaciones en la descarga de los Ríos asociadas a El Niño (Acha et al., 2008). Este frente de turbidez varía espacial y temporalmente, pero ocurre con mayor frecuencia frente a Montevideo. Se caracteriza por la alta turbidez, causada por una alta concentración de material en suspensión, lo que reduce significativamente la penetración de luz y la actividad fotosintética del fitoplancton. En este sentido la producción primaria es más alta en el lado marino del frente de turbidez, con organismos con mayor biovolumen y alta relación superficie-volumen que aprovechan mejor la luz (Kruk et al., 2014). Se observan altas concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto (entre 18 y 28  $\mu\text{M}$ ) en la cabecera del estuario pero la turbidez restringe la fotosíntesis por lo que la asimilación de nutrientes por parte del fitoplancton está limitada por la luz (Acha et al., 2008). Los vientos predominantes son del NO, con velocidades medias típicas de aproximadamente  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (3,6 km/h) entre mayo y setiembre, y desde el NE cercanos a  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (7,2 km/h) de octubre a febrero (Fossati y Piedra-Cueva, 2008).

## **1.5 Características de la zona costera del Río de la Plata, playas de Montevideo**

La costa de Montevideo está formada por playas en forma de arco limitadas por puntas rocosas, desde playas con arcos más pronunciados hasta playas largas con tramos casi rectos (Saizar, 1997). El tamaño de grano en estas playas generalmente oscila entre mediano y fino siendo más grueso al final del arco que está más expuesto a las olas y relativamente fino en el extremo más protegido (Saizar, 1997). La amplitud de la marea astronómica es de aproximadamente 0,4 m (SOHMA, 1978). Las playas de Montevideo se separan en playas del este y del oeste según su ubicación con respecto a la Bahía de Montevideo. Dicha Bahía no se usa con fines recreacionales por su contaminación (Muniz et al., 2004) (Figura 1). En verano las playas de Montevideo tienen gran concurrencia de público, por esto la Intendencia de Montevideo (IM) realiza estudios sobre la calidad de las aguas de las playas durante dicho período.

A partir del verano 2000-2001, fecha en la que se publicó el registro de la primer floración tóxica en la costa de Montevideo (De León y Yunes, 2001), el Servicio de Evaluación de la Calidad y Control Ambiental de la IM inició un monitoreo rutinario de floraciones de cianobacterias en las playas de Montevideo durante el período estival (15 de noviembre-el 31 de marzo). Este monitoreo tiene como objetivo realizar el seguimiento de las floraciones, previniendo posibles efectos adversos para la salud (Vidal, et al., 2017) y aportar información sobre la aptitud para baños en las playas

siendo reportada periódicamente todos los veranos (Feola et al., 2006, 2007, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014). El monitoreo se basa en la observación visual, permitiendo detectar en forma momentánea y a simple vista distintos escenarios en lo que refiere a la concentración de cianobacterias en las playas. Con este propósito se definieron tres categorías: categoría 1: “ausencia de floraciones”, cuando las colonias de cianobacterias en el agua son indetectables, categoría 2: “presencia de colonias dispersas de cianobacterias”, en este caso las colonias están uniformemente dispersas y pueden verse solo desde una distancia corta o en el agua al tomar la muestra y la categoría 3: “espuma cianobacteriana”, cuando las colonias se acumulan produciendo un color verde oscuro en el agua que se puede observar desde varios metros de distancia (Feola et al., 2014; Pírez et al., 2013). Los resultados son evaluados según las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Chorus y Bartram, 2012), la cual define distintas categorías con valores de referencia y los posibles efectos adversos a la salud humana (Tabla 1) (Chorus y Bartram, 2012). Asociado a este monitoreo desde el año 2010 se autorizó al Servicio de Guardavidas de la IM a utilizar la bandera sanitaria de color rojo con una cruz verde en su centro en presencia de cianobacterias, cnidarios tóxicos, hidrocarburos o alguna otra situación que pueda representar un riesgo sanitario para la población que utiliza las playas (Feola et al., 2014; Pírez et al., 2013).

**Tabla 1.** Valores guía de cianobacterias, clorofila *a* y microcistinas para el manejo seguro de aguas de recreación según la OMS. Abundancia cianobacterias (Ab. Ciano, cel.ml<sup>-1</sup>), clorofila *a* (Clo. *a*, µg.l<sup>-1</sup>), microcistina (Micro., µg.l<sup>-1</sup>). Modificada de Feola et al. (2014).

	Nivel de riesgo		
	Leve	Moderado	Alto
Ab. Ciano. (cel.ml <sup>-1</sup> )	15 x 10 <sup>3</sup> –20 x 10 <sup>3</sup>	≥10 x10 <sup>4</sup>	≥10 x10 <sup>5</sup>
Clo. <i>a</i> (µg.l <sup>-1</sup> )	<10	10-50	>50
Micro. (µg.l <sup>-1</sup> )	<10	10-50	>50

Independientemente de la presencia de cianobacterias se realizan monitoreos de rutina una vez por semana en seis playas: Pajas Blancas, Cerro, Ramírez, Pocitos, Malvín y Carrasco, para determinar la temperatura *in situ*, salinidad, conductividad, turbidez, concentración de clorofila *a* y microcistina. El estudio de nutrientes se realiza cada 15 días. Cuando se detecta la presencia de cianobacterias en algún punto de muestreo se realiza el monitoreo de alerta. En este se intensifican los muestreos para la determinación de clorofila *a*, microcistina, nutrientes y variables ambientales (Feola et al., 2014). Actualmente la IM lleva a cabo un Programa de vigilancia costera de playas que cuenta con la certificación de calidad ISO 9001:2008 y por la norma internacional ISO 14001 en las playas del este desde playa Buceo a Playa de los Ingleses (Figura 1) (Feola et al., 2014).

**Figura 1.** Mapa de Montevideo indicando las playas estudiadas y los principales tributarios. Modificado de Saizar (1997).



En 1985 se inició el programa de evaluación de la calidad del agua de las playas actualmente llevado a cabo por la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), desde las playas de la ciudad de Colonia hasta la Barra del Chuy. El objetivo del programa es evaluar la calidad del agua para recreación y comunicar su estado sanitario al público. Para esto se realizan muestreos semanales entre el 18 de octubre y el 28 de febrero. En cada punto se realizan mediciones *in situ* de temperatura, conductividad y salinidad y se hacen registros visuales de residuos de floraciones en arena y espuma de cianobacterias en el agua (De León, 2012).

## **1.6 Importancia del estudio de las floraciones de *M. aeruginosa*.**

El Río de la Plata es afectado tanto por fenómenos naturales, como el El Niño y La Niña, como por actividades antropogénicas que afectan el funcionamiento del sistema (Nagy et al., 2002). La presencia de *M. aeruginosa* en el Río de la Plata viene siendo registrada desde el año 1981 (CARP, 1990). La primer floración de *M. aeruginosa* tóxica conocida para este ecosistema ocurrió en el verano de 1999 alcanzando altos valores de microcistinas totales (101,7 a 1074,3  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (De León y Yunes, 2001). Las floraciones de *M. aeruginosa* en el Río de la Plata traen consecuencias indeseadas tanto para el hombre como para el funcionamiento del ecosistema. Estas ocurren en su mayoría en verano, afectando la actividad turística y la salud humana (Vidal et al., 2017). Actualmente las floraciones de *M. aeruginosa* y de otras especies del CMA son cada vez más comunes encontrándose con frecuencia a lo largo de la zona costera durante el verano (Bonilla et al., 2015; Feola et al., 2014; Pírez et al., 2013; Sienna y Ferrari, 2006). Se ha propuesto que estas floraciones llegarían al estuario a través del Río Uruguay desde embalses como Salto Grande, Río Negro y Paraná donde se originarían (Kruk et al., 2017; Pírez et al., 2013). Su desarrollo y distribución en el estuario se vería afectada por cambios en salinidad, temperatura y estratificación del agua (Kruk et al., 2017; Pírez et al., 2013).

Es necesario prever la aparición de estas floraciones para evitar efectos sobre la salud pública, pérdida de diversidad, valor turístico, así

como otros usos del ecosistema y sus gastos económicos asociados. Es fundamental entender cuáles son las condiciones previas particulares que las favorecen en el ecosistema. En los últimos años se han realizado diferentes trabajos donde se han estudiado las variables que favorecen su presencia en los sistemas acuáticos del Uruguay. Se ha recopilado y analizado información de distintos cuerpos de agua estudiando la presencia y riesgo de exposición a cianobacterias y cianotoxinas (Bonilla et al., 2015). Por otro lado, se han realizado diferentes trabajos desde Salto Grande hasta Punta del Este analizando la respuesta del CMA a las variables ambientales (Kruk et al., 2017) y evaluando diferentes estrategias de muestreo y análisis para de dicho complejo (Alcántara et al., 2018; Martínez de la Escalera et al., 2016; Segura et al., 2017). También se construyó un protocolo de monitoreo y un sistema de alerta a partir de la presencia de floraciones, concentración de clorofila *a*, biovolumen de cianobacterias y la composición específica de la comunidad para el Río Uruguay y el Río de la Plata (Kruk et al., 2015). Finalmente Pérez et al. (2013), desarrollaron un ELISA de microcistina local para el establecer un programa de monitoreo en las playas de Montevideo. A pesar de los aportes de los trabajos antes mencionados aún no existe un estudio integrando la información de presencia de floraciones, concentración de microcistina, clorofila *a* y variables ambientales y meteorológicas en las playas de Montevideo ya que a excepción del trabajo de Pérez et al., (2013) el resto de los estudios se

desarrollaron en aguas abiertas del Río de la Plata o en otros sistemas como el Río Uruguay.

Para comprender las causas de las floraciones e implementar medidas de gestión apropiadas es necesario avanzar en el conocimiento del desarrollo y distribución de las floraciones de *M. aeruginosa* en las playas de Montevideo en el tiempo y el espacio. El enfoque seleccionado en esta tesis es reanalizar la información disponible sobre eventos de floraciones en las playas de Montevideo complementándola con las variables ambientales y meteorológicas, para así entender cómo influyen los factores ambientales que determinan su aparición

## 2. Hipótesis

La presencia a lo largo del tiempo de floraciones de *M. aeruginosa* en las playas de Montevideo es el resultado de condiciones específicas y favorables de temperatura, salinidad, precipitación, irradiancia y velocidad del viento, sumado a procesos de transporte desde sectores aguas arriba de la cuenca del Río de la Plata.

## 3. Predicciones

1. Es posible encontrar una combinación de variables que permita predecir la presencia y establecimiento de floraciones de *M. aeruginosa*, *a priori* las temperaturas altas y salinidades bajas determinarían su presencia y crecimiento, mientras que bajas temperaturas y salinidades altas determinarían su ausencia en las playas de Montevideo.
2. Dadas las condiciones señaladas en el punto 1, valores intermedios de precipitaciones, irradiancia y velocidad del viento influyen de forma positiva tanto en la presencia y establecimiento de las floraciones de *M. aeruginosa* como en el aumento en la tasa de crecimiento en las playas de Montevideo.
3. Realizando simulaciones de las respuestas de las tasa de crecimiento, bajo condiciones de baja salinidad, alta temperatura, presencia de floraciones y altos caudales en Salto Grande y los Ríos Uruguay y

Paraná podemos inferir que las floraciones llegan desde aguas arriba, principalmente desde los embalses. Bajo las mismas condiciones de temperatura y salinidad pero con bajos caudales del Río Uruguay y Paraná las floraciones se estarían generando *in situ*, en la costa de Montevideo.

#### **4. Objetivo general**

El objetivo de este trabajo es determinar las variables más importantes en regulan la presencia, desarrollo, y distribución de floraciones de *Microcystis aeruginosa* y evaluar las condiciones ambientales estadísticamente asociadas a su aparición, establecimiento y crecimiento en las playas de Montevideo.

##### **4.1 Objetivos Específicos:**

1. Construir una base de datos con información físico-química y ambiental existente sobre las playas de Montevideo, considerando las siguientes variables: salinidad, temperatura, clorofila *a*, microcistinas, intensidad del viento, irradiancia y precipitación.
2. Describir la distribución espacial y temporal de las floraciones de *M. aeruginosa*, clorofila *a* y microcistina en las playas de Montevideo.
3. Determinar las condiciones ambientales asociadas a la presencia y establecimiento de floraciones de *M. aeruginosa* en las playas de Montevideo.

4. Parametrizar y modelar la respuesta funcional de la tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* a los principales forzantes ambientales a partir de información disponible en la bibliografía.

5. A partir de las parametrizaciones realizadas, evaluar las respuestas de la tasa de crecimiento de floraciones de *M. aeruginosa* ante las variaciones de salinidad, temperatura e irradiancia observadas durante los periodos de ocurrencia de floraciones en las playas de Montevideo.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Área de estudio

En este trabajo se estudiaron 24 playas del Río de la Plata ubicadas a lo largo de 37 km de costa del Departamento de Montevideo, entre Punta Espinillo, al Oeste y Miramar, al Este. Estas playas son parte del sistema de monitoreo (IM-DINAMA), la información para este trabajo se obtuvo de los informes correspondientes, disponibles en la páginas web de la IM y de la DINAMA (De León, 2012; Feola et al., 2014) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Playas del departamento de Montevideo incluidas en los monitoreos de la DINAMA y de la IM ordenadas de O a E para el período 2004-2014.

<b>Playas DINAMA</b>	<b>Playas IM</b>	<b>Coordenadas (latitud S-longitud O)</b>
	Punta Espinillo	34°50'22.8" - 56°24'45,7"
	La Colorada	34°51'29.6" - 56°22'34.5"
Pajas Blancas	Pajas Blancas	34°52'13.9" - 56°20'25.8"
	Zabala	34°52'24.3" - 56°20'7.7"
	Punta Yeguas	34°53'43.1" - 56°18'18.0"
	Santa Catalina	34°53'35.1" - 56°17'44.7"
	Nacional	34°53'52.4" - 56°16'13.9"
Cerro	Cerro	34°53'47.1" - 56°15'09.5"
	Gas	34°54'37.8" - 56°12'16.9"
	Ejido	34°54'57.3" - 56°11'6.2"
	Minas	34°54'53.8" - 56°10'43.5"
Ramírez	Ramírez	34°54'59.8" - 56°10'12.3"
	Punta Carretas	34°55'24.3" - 56°10'18.04"
	Estacada	34°55'27.2" - 56°09'04.7"
Pocitos	Pocitos	34°54'41.2" - 56°08'38.0"
Buceo	Buceo	34°53'59.0" - 56°07'15.7"
Malvín	Malvín	34°53'49.8" - 56°06'16.0"
	Playa Brava	34°53'55.7" - 56° 6'2.5"

Honda	Honda	34°53'44.1" - 56°05'28.8"
	Ingleses	34°53'44.7" - 56°05'06.1"
Mulata	Mulata	34°53'57.2" - 56° 4'7.5"
Verde	Verde	34°53'53.2" - 56°04'22.6"
Carrasco	Carrasco	34°53'31,0" - 56°03'16.7"
Miramar	Miramar	34°53'05.7" - 56°02'19.0"

## 5.2 Base de datos meteorológicos

Para realizar una caracterización ambiental de las playas de Montevideo se construyó una base de datos meteorológicos con datos diarios de temperatura media del aire (°C), precipitación acumulada (mm), velocidad máxima del viento diaria (km/h), velocidad y dirección media del viento diaria (km/h) e irradiancia media ( $Wm^{-2}$ ) durante el período abril 2004-noviembre 2014. Los datos de temperatura del aire, viento y precipitación fueron proporcionados por el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) para el período 1° de enero de 2004 al 30 de noviembre de 2014, obtenidos de la estación Aeropuerto de Carrasco (34°89'S - 56°06'O) y los datos de irradiancia fueron obtenidos de la página del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) para el período 6 abril de 2004 a 9 de noviembre de 2014 de la estación Las Brujas (34°40'S - 56°20'O).

## 5.3 Base de datos ambientales y de presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa*

Se construyó una base de datos de presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa* junto con los datos diarios ambientales previamente descritos de Montevideo incluyendo: presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa*, abundancia celular ( $\text{cel.ml}^{-1}$ ), clorofila *a* ( $\mu\text{gl}^{-1}$ ), microcistina ( $\mu\text{gl}^{-1}$ ), salinidad, temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación (mm), velocidad máxima del viento (Km/h), velocidad media del viento y dirección (Km/h) e irradiancia ( $\text{Wm}^{-2}$ ) para las fechas correspondientes a los muestreos.

Para realizar esta base de datos se revisaron, sistematizaron y digitalizaron los datos de los informes disponibles del monitoreo de la IM para el período 2006-2014 (Feola et al., 2014) y de la DINAMA para el verano 2011-2012 (De León, 2012) (Tablas 2, 3 y 4) y se complementaron con los datos de INUMET e INIA para las fechas correspondientes. Los datos disponibles en los informes fueron de los monitoreos de verano de dichos años (noviembre a marzo para la IM y octubre a febrero para la DINAMA). Para el verano del 2014 se contaron con datos ambientales hasta el día 30 de noviembre de 2014, excepto para la irradiancia, donde se contaron con datos disponibles hasta el 9 de noviembre de 2014.

El conteo de células de *M.aeruginosa* reportado en los informes arriba citados se realizó utilizando el método de Box (1981). La determinación de clorofila *a* se realizó según el procedimiento espectrofotométrico 10200 H del APHA-AWWA-WEF (2005). Las microcistinas se analizaron por inmunoensayo ELISA de inhibición

utilizando un anticuerpo policlonal (Brena et al., 2006; Pírez et al., 2013). La determinación de salinidad se realizó según el método 2520 B Electrical Conductivity Method (APHA-AWWA-WEF, 2005). Los datos de clorofila *a* y microcistina utilizados en este trabajo corresponden únicamente a casos de presencia de floraciones de *M. aeruginosa*. Según la disponibilidad de datos, para estudiar las variables ambientales se utilizó el período 2004-2014, para el estudio de la presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa*, clorofila *a* y microcistina se utilizó el período 2006-2014 y para estudiar la presencia y descripción espacial y temporal de *M. aeruginosa* se utilizaron datos del período 2006-2011.

**Tabla 3.** Descripción de los datos extraídos de los informes de la IM para los veranos entre los años 2004-2014. Presencia de *M. aeruginosa* (Pres. de MA), salinidad (Sal.), temperatura del agua (Temp. del agua, °C), abundancia celular (Ab., cel.ml<sup>-1</sup>), clorofila *a* (Clo. *a*, µg.l<sup>-1</sup>), microcistina (Micro., µg.l<sup>-1</sup>). X: indica presencia de datos para la fecha correspondiente.

	Pres. de MA	Sal.	Temp. del agua (°C)	Ab. (cel.ml <sup>-1</sup> )	Clo. <i>a</i> (µg.l <sup>-1</sup> )	Micro. (µg.l <sup>-1</sup> )
<b>2006</b>						
Enero	x	x	x	X	x	x
Febrero	x	x	x	X	x	x
Marzo	x				x	
Noviembre	x	x	x	X	x	x
Diciembre	x	x	x	X	x	x
<b>2007</b>						
Enero	x	x	x	X	x	x
Febrero	x	x	x	X	x	x
Marzo	x	x	x	X	x	x
Diciembre	x	x	x	X	x	x
<b>2008</b>						
Enero	x	x	x	X	x	x

Marzo	x	x	x	X	x	x
<b>2009</b>					x	x
Noviembre						
Diciembre	x				x	x
<b>2010</b>						
Enero	x				x	x
Febrero	x				x	x
Marzo	x				x	x
Diciembre	x	x	x	X	x	x
<b>2011</b>						
Febrero	x	x	x	X	x	x
Marzo	x	x	x	X	x	x
Diciembre	x					x
<b>2013</b>						
Febrero	x	x	x	X	x	x
Marzo	x				x	x
Diciembre	x	x	x	X	x	x
<b>2014</b>						
Febrero	x	x	x	X	x	x
Marzo	x	x	x	X	x	x

**Tabla 4.** Descripción de los datos extraídos del informe de la DINAMA 2011-2012. Presencia de *M. aeruginosa* (Pres. de *M. aeruginosa*), salinidad, temperatura del agua (Temp. del agua, °C). X: indica presencia de datos para la fecha correspondiente.

	<b>Pres. de <i>M. aeruginosa</i></b>	<b>Salinidad</b>	<b>Temp. del agua (°C)</b>
<b>2011</b>			
Octubre	X	X	x
Noviembre	X	X	x
Diciembre	X	X	x
<b>2012</b>			
Enero	X	X	x
Febrero	X	X	x

## 5.4 Caracterización ambiental

Para entender como las variables ambientales influyen en la posible aparición de floraciones se calcularon los promedios de 3 y 5 días anteriores al muestreo para la temperatura del aire, precipitación e irradiancia. Además se calculó la precipitación acumulada para cada verano y la cantidad de días con precipitaciones mayores a 40 mm como referencia de número de días con registros elevados. Por otro lado se calcularon las medias, desvíos estándar y varianzas de cada verano durante el período 2004-2014 para la temperatura del aire, irradiancia y velocidad media y máxima del viento. Finalmente se realizaron análisis espectrales de Fourier para la temperatura del aire, irradiancia, precipitación y velocidad media y máxima del viento para determinar la periodicidad y ver si se refleja la estacionalidad en los datos estudiados.

Se compararon los valores de salinidad y temperatura del agua para 12 playas. Por otro lado se determinó la mediana del logaritmo de la clorofila *a* y del logaritmo de la microcistina, el rango en el que se encuentran sus valores. Se identificaron las categorías de riesgo establecidas por la OMS (Chorus y Bartram, 2012) para aguas recreacionales para clorofila *a*, microcistina y abundancia de cianobacterias, señalándolas en los gráficos correspondientes. Para identificar las floraciones persistentes en el tiempo y en el espacio y diferenciarlas de eventos puntuales se construyó una tabla donde se muestran 6 playas con las floraciones de mayor duración y las fechas correspondientes (Tabla 11). Con el objetivo de verificar si existían diferencias significativas en las variables ambientales en condiciones de

presencia o ausencia de floraciones se realizaron pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis para las distintas variables ambientales (ej. salinidad, temperatura del agua, precipitación promedio de los 5 días anteriores al muestreo). Finalmente se calculó el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman entre las distintas variables consideradas. La prueba de Kruskal-Wallis, el cálculo del coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman y los diagramas de caja fueron realizados con el programa Statistica versión 7.

### **5.5 Variables ambientales asociadas a la presencia de floraciones**

Se construyó un Árbol de Clasificación y Regresión (CART) (Breiman et al., 1984) para evaluar las variables ambientales que mejor explican la presencia o ausencia de floraciones. Dada la naturaleza de la variable de respuesta el árbol construido fue de clasificación. Para este análisis se incluyeron como variables explicativas o predictoras la temperatura del agua, salinidad, velocidad media diaria y máxima diaria del viento, temperatura del aire en el día del muestreo y el promedio de los 3 y 5 días anteriores, precipitación en el día del muestreo y el promedio de los 3 y 5 días anteriores, irradiancia en el día del muestreo y el promedio de los 3 y 5 días anteriores. Para la construcción del árbol se establecieron los siguientes criterios: número mínimo de casos por nodo para realizar una partición: 20 casos, además no puede haber menos del 5% de los datos.

Por último, no se pueden generar árboles con más de 1000 nodos totales (Timofeev, 2004). Para elegir el árbol óptimo a partir de una secuencia de árboles anidados se utilizó el método de validación cruzada "V" (Breiman et al., 1984), con un valor de  $V=10$  (Breiman et al., 1984; Díaz Sepulveda, 2011), escogiendo el árbol con menor error. Esta técnica, conocida como poda, reduce el tamaño y la complejidad del árbol buscando un compromiso entre sesgo y varianza (Ripley, 1996). En el caso de la salinidad y la temperatura del agua el set de datos no estaba completo, sin embargo el algoritmo está diseñado para aprovechar al máximo los casos con datos faltantes, en las variables explicativas utilizando diferentes estrategias (Breiman et al., 1984). Como medida de desempeño del modelo se calculó el porcentaje de casos clasificados correctamente considerando una estrategia de *error sobre muestra de evaluación* (Crisci et al., 2012). En este trabajo, los datos se dividieron 50 veces de forma aleatoria en 2/3 (muestra de entrenamiento) – 1/3 (muestra de evaluación), en cada iteración se entrenó el modelo con 2/3 de los datos y se evaluó con el tercio restante. El porcentaje de casos correctamente clasificados sobre la muestra de evaluación de todas las iteraciones se promedió, y ese indicador fue retenido como medida de desempeño. De esta manera, se evalúa el desempeño del modelo con datos que no se utilizaron para entrenarlo. Este tipo de evaluación es una práctica inherente a los modelos de AA. Se estudió la composición de los grupos formados a partir del CART y se clasificaron en grupos de presencia o ausencia. Se calculó el

porcentaje de ocurrencia de cada grupo como el porcentaje de casos clasificados correctamente y el porcentaje de error: porcentaje de datos clasificados incorrectamente. También se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para los valores de las variables que conformaron los grupos. Se realizó un ranking indicador de importancia calculada para las variables utilizadas en el árbol a través del índice de Gini, para identificar las variables que más influyeron en su construcción. Las puntuaciones reflejan la contribución que cada variable hace al clasificar o predecir la variable objetivo (Breiman et al., 1984). Para este análisis se utilizó el programa Statistica Versión 7.0.

## **5.6 Modelación del crecimiento de *M. aeruginosa* en función de las variables ambientales**

Se realizó una búsqueda bibliográfica de tasas de crecimiento de *M.aeruginosa* en función de la salinidad, temperatura e irradiancia en condiciones experimentales. Se incluyeron en la base de datos para cada variable aquellos trabajos donde se utilizaron métodos similares de conteo celular de *M. aeruginosa*. A partir de dichas tasas se ajustaron parámetros para encontrar la función que represente el crecimiento de *M. aeruginosa* en condiciones experimentales. En el caso de la salinidad se tomaron datos de tasas de crecimiento en distintas condiciones de salinidad del trabajo de Tonk (2007), quien utilizó como método de conteo un contador de células.

Se parametrizó la función logística de crecimiento modificando la ecuación de Yannicelli y Castro (2013). Para la parametrización de la tasa de crecimiento en función de la temperatura se recopilaron datos de tasas de crecimiento a diferentes temperaturas de los trabajos de Chu et al. (2007), Tonk (2007), Watanabe y Oishi, (1985), Wiedner et al., (2003) quienes también utilizaron contador de células. Se ajustaron los parámetros de crecimiento de acuerdo a una curva exponencial. Finalmente se recopilaron datos de tasas de crecimiento a distintas irradiancias del trabajo de Wiedner et al. (2003) y se calcularon los parámetros de crecimiento para la ecuación modificada de Koné et al. (2005) y Wiedner et al. (2003). Por otro lado se calculó la tasa máxima de crecimiento teórica de *M. aeruginosa* ajustada a partir de tasas calculadas en un rango de valores de irradiancia de 3 a 300  $\text{Wm}^{-2}$ , temperatura de 22°C y salinidad 0, basándose en el trabajo de Wiedner et al. (2003). Los parámetros de las ecuaciones y la tasa máxima de crecimiento fueron ajustados con la herramienta Solver de Microsoft Excel® para Windows® V.2010. Finalmente, al desconocer la dependencia entre los factores, las tres ecuaciones parametrizadas fueron integradas en un único modelo combinándose en forma multiplicativa (Huret et al., 2005; Koné et al., 2005; Verspagen et al., 2004).

Se evaluó la contribución relativa de cada forzante a la respuesta del crecimiento de cada variable ambiental utilizando valores de salinidad, temperatura e irradiancia dentro del rango de las observaciones de la matriz de datos construida previamente. Con esos resultados se realizaron

gráficos de superficie de la tasa de crecimiento a diferentes combinaciones de irradiancia y temperatura, irradiancia y salinidad, y temperatura y salinidad, dejando la tercer variable en su valor máximo registrado en los muestreos, en el caso de la irradiancia ( $370 \text{ Wm}^{-2}$ ) y la temperatura ( $30^{\circ}\text{C}$ ), y mínimo para la salinidad (0,1). Se utilizaron las series temporales de salinidad, temperatura e irradiancia del período 2006-2014 para simular la variabilidad temporal de la tasa de crecimiento y analizar su distribución. Se evaluó si existieron diferencias significativas en las tasas de crecimiento calculadas a partir del modelo entre días con presencia versus días con ausencia de floraciones realizando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. Variables meteorológicas, ambientales y biológicas de *M. aeruginosa*

La base de datos meteorológicos para las playas de Montevideo reunió en total 24.198 registros durante el período abril 2004-noviembre 2014 (Tabla 5). Por otro lado, la base de datos de presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa* con las variables ambientales reunió 7.560 registros para el período enero 2006-marzo 2014 (Tablas 6a y b).

**Tabla 5.** Datos meteorológicos que conformaron la base de datos: temperatura del aire (Temp. del aire, °C), precipitación (PP, mm), velocidad máxima del viento (V. máx. viento, Km/h), velocidad media del viento (V. med. viento (Km/h) e irradiancia (Irrad, Wm<sup>-2</sup>).

Variables meteorológicas					
2004-2014	Temp. del aire (°C)	PP (mm)	V máx. viento (Km/h)	V med. viento (Km/h)	Irrad. (Wm <sup>-2</sup> )
Registros	5082	5082	5082	5082	3871

**Tabla 6. (a)** Datos de presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa* (Pres. MA), abundancia de floraciones (Ab., cel.ml<sup>-1</sup>), clorofila *a* (Clo. *a*, µgl<sup>-1</sup>), microcistina (Micro., µgl<sup>-1</sup>), salinidad (Sal.) y temperatura del agua (T. agua, °C) y número de registros (Reg.). **(b)** velocidad media del viento (V. Med. V, Km/h), velocidad máxima del viento (V. Máx. V, Km/h), temperatura del aire en el día del muestreo (T, °C), temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (T 3D, °C) y los 5 días anteriores (T 5D, °C), precipitación en el día del muestreo (PP, mm), precipitación promedio de los 3 días anteriores al muestreo (PP 3D, mm) y de los 5 días anteriores (PP 5D, mm), irradiancia en el día del muestreo (I, Wm<sup>-2</sup>), irradiancia promedio de los 3 días anteriores al muestreo (I 3D, Wm<sup>-2</sup>) y de los 5 días anteriores (I 5D, Wm<sup>-2</sup>) y número de registros (Reg.).

---

**Variables biológicas y ambientales (a)**

---

2006-2014	Pres. MA	Ab. (cel.ml <sup>-1</sup> )	Clo. a (μgl <sup>-1</sup> )	Micro. (μgl <sup>-1</sup> )	Sal	T. agua (°C)
Reg.	447	14	231	193	254	162

---

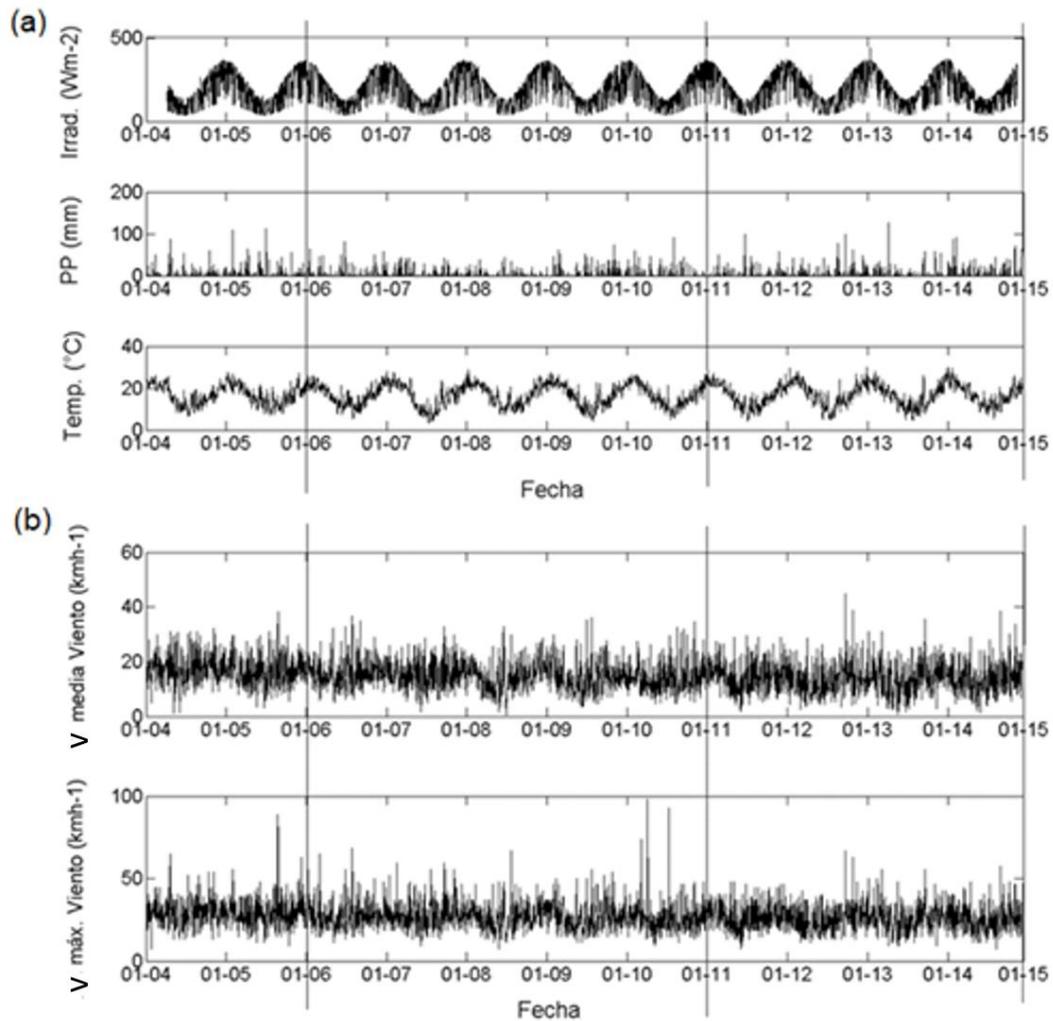
**Variables biológicas y ambientales (b)**

---

2006-2014	V.Med V	V.Máx V	T T	T 3D	T 5D	PP PP	PP 3D	PP 5D	I I	I 3D	I 5D
	(Km/h)		(°C)				(mm)		(Wm <sup>-2</sup> )		
Reg.	447	447	447	447	447	447	447	447	447	447	447

## 6.2. Descripción de variables meteorológicas (2004-2014)

Durante el período 2004 a 2014, las variables: irradiancia, temperatura del aire y velocidad media y máxima del viento, mostraron un régimen estacional. Las máximas densidades espectrales en el análisis de Fourier se acumularon en el entorno de los 350-320 días. (Figuras 2a y b, Tabla 7). La precipitación mostró sus mayores valores de densidades espectrales a escalas más pequeñas (semanal, mensual e intraestacional sin una estacionalidad marcada) (Figura 2a, Tabla 7).

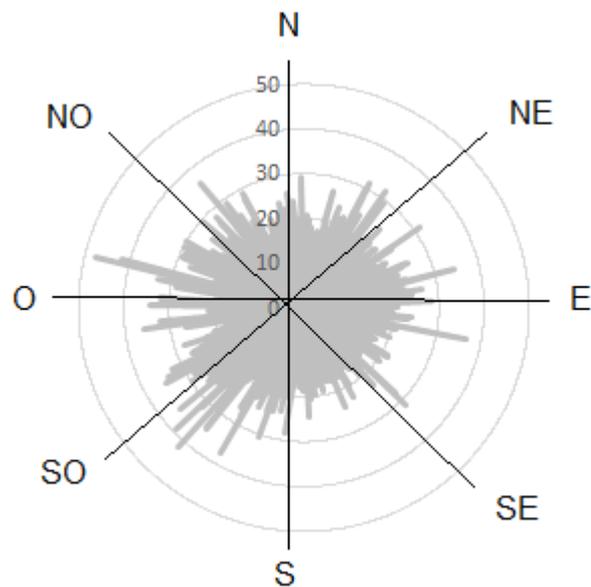


**Figura 2.** Series temporales de datos ambientales **(a)** Temperatura del aire (Temp, °C), precipitación (PP, mm) e irradiancia (Irrad, Wm<sup>-2</sup>). **(b)** Velocidad media del viento (V. media Viento, Km.h<sup>-1</sup>) y velocidad máxima del viento (V. máx. Viento, Km.h<sup>-1</sup>). Datos proporcionados por el INUMET y obtenidos del INIA. Las líneas negras verticales indican los diferentes períodos: 2004-2014, 2006-2014 y 2006-2011.

**Tabla 7.** Series temporales y análisis de Fourier para las variables ambientales viento (km.h<sup>-1</sup>), precipitación (mm), temperatura del aire (°C) e irradiancia (Wm<sup>-2</sup>) para el período 2004-2014. Datos proporcionados por el INUMET y obtenidos del INIA.

Variable	Unidad	Origen	Estación	Serie Temporal	Periodo Fourier (días)
Viento	kmh <sup>-1</sup>	INUMET	Carrasco	2004-2014	356-372
Precipitación	mm	INUMET	Carrasco	2004-2014	11-14-33-70-154
Irradiancia	Wm <sup>-2</sup>	INIA	Las Brujas	2004-2014	352
Temperatura	°C	INUMET	Carrasco	2004-2014	356-372

Las mayores velocidades de vientos durante el período estudiado correspondieron a vientos del Oeste (SW a NW) y del Este (SE a NE), (Figura 3)



**Figura 3.** Rosa de los vientos con la velocidad media del viento para el período 2004-2014. Las líneas concéntricas indican velocidad en  $\text{Km h}^{-1}$ . Las líneas grises indican la dirección y velocidad del viento. Datos proporcionados por INUMET.

Las máximas temperaturas medias ocurrieron en los veranos 2007, 2009 a 2012 y 2014. El año con mayores valores de irradiancia media fue el 2011, seguido por los años 2012 y 2013. Por otro lado el verano con menores valores de irradiancia media fue el 2007. En los veranos 2005 y 2009 se registraron las mayores velocidades medias de vientos, mientras que los veranos con menores velocidades medias fueron el 2010 y el 2012. A su vez el verano 2009 fue el que tuvo valores mayores de la media de

velocidad máxima del viento, mientras que los veranos 2008, 2010 y 2012 tuvieron medias menores de velocidad máxima. Finalmente el verano más lluvioso fue el de 2014. En dicho verano de los 51 días con precipitaciones registradas, 11 tuvieron precipitaciones mayores a 40 mm. El segundo verano más lluvioso fue el 2007, en ese verano se registró el mayor número de días con precipitaciones: 59, de los cuales 6 correspondieron precipitaciones mayores a 40 mm por día. El verano más seco fue el 2011 con solo 8 días con lluvias, todos con valores menores o iguales a 40 mm diarios (Tabla 8).

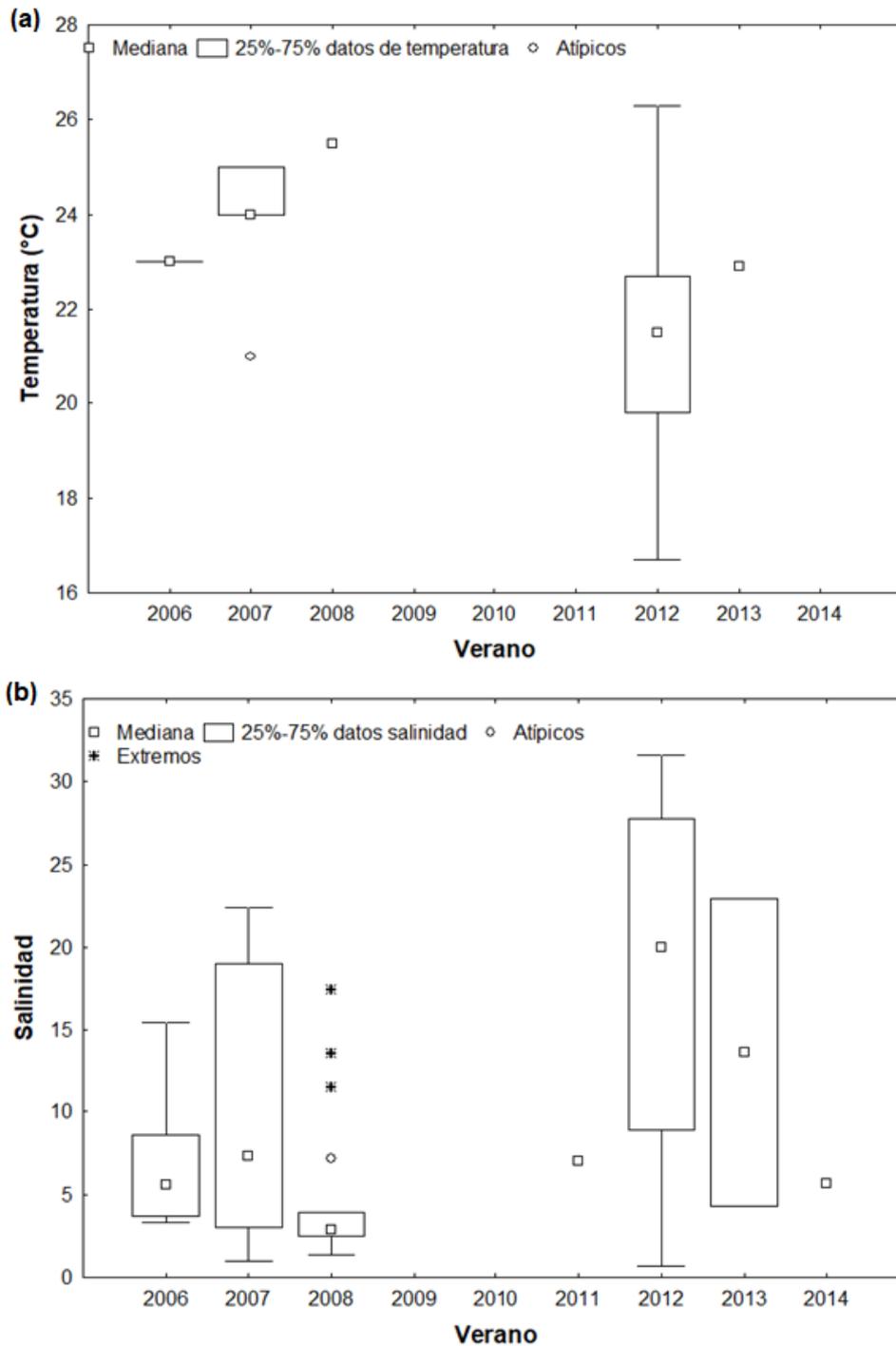
**Tabla 8.** Media (M) y desvío estándar (DE) de temperatura del aire (Temp., °C), irradiancia (Irr.,  $Wm^{-2}$ ) y velocidad media y máxima del viento (V. Med. Viento y V. Máx. Viento, Km/h) para todos los veranos durante el período 2004-2014. Precipitación acumulada (PP Acum, mm.), cantidad de días con precipitaciones (Días PP, mm) y cantidad de días con precipitaciones menores a 40mm (Días PP <40mm) para los veranos del período 2004-2014. Datos proporcionados por el INUMET y tomados del INIA.

Verano	Temp. (°C)		Irr. ( $Wm^{-2}$ )		V. Med. Viento (Km/h)		V. Máx. Viento (Km/h)		PP (mm) Acum.	Días PP	Días PP>40mm
	M	DE	M	DE	M	DE	M	DE			
2005	21	3	257	81	17	5	29	7	437	41	2
2006	21	6	259	84	16	4	29	9	454	50	3
2007	22	2	238	89	16	4	28	6	601	59	6
2008	21	2	265	80	15	4	27	6	303	49	0
2009	22	2	269	79	17	5	30	7	352	37	3
2010	22	2	247	82	14	4	27	7	475	49	2
2011	22	2	278	72	15	4	28	7	187	8	8
2012	22	3	274	75	14	5	27	7	413	49	3
2013	21	3	273	75	15	5	28	7	420	48	1
2014	22	3	255	87	15	5	27	7	733	51	11

### **6.3. Descripción ambiental y biológica de las playas (2006-2014)**

Las condiciones de temperatura del agua y salinidad fueron altamente variables en las playas de Montevideo durante los veranos del periodo de estudio. El verano 2012 fue el que tuvo mayor variabilidad en los valores de salinidad con un rango de 0,7 a 31,6. A su vez la temperatura del agua también tuvo su mayor variación en el verano 2012 (Figura 4a y b). No se contaron con datos disponibles de temperatura y salinidad para los veranos 2009 y 2010, mientras que para el verano 2014 solo se contó con un dato de salinidad (Tablas 3 y 4, Figura 4a y b).

Todas las playas mostraron una alta variación en sus valores de salinidad con al menos un 25 % de las observaciones con salinidades menores a 15. Por otro lado hubo un gradiente en las medianas, estas fueron menores en las playas del Oeste, aumentando hacia el Este. Las playas del Este mostraron entre el 50 y el 75 % de las observaciones con salinidades mayores a 20. Las playas Miramar y Carrasco presentaron medianas ligeramente menores al resto de las playas del Este. Las playas Verde y Pajas Blancas fueron las que tuvieron salinidades más bajas durante este período, 0,1 y 0,7 respectivamente, mientras que Buceo y Verde tuvieron las salinidades más altas con valores de 31,5 y 31,6, siendo esta última playa la que registró los valores más extremos y por tanto la mayor variabilidad. (Figura 5b). A su vez las playas estudiadas también



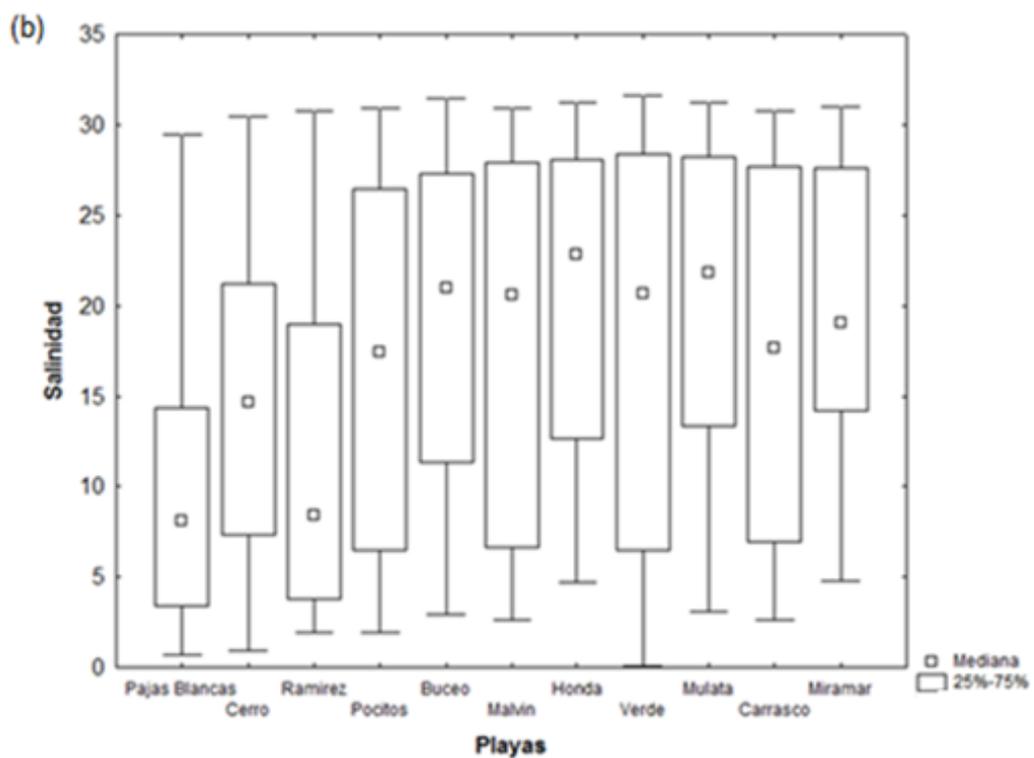
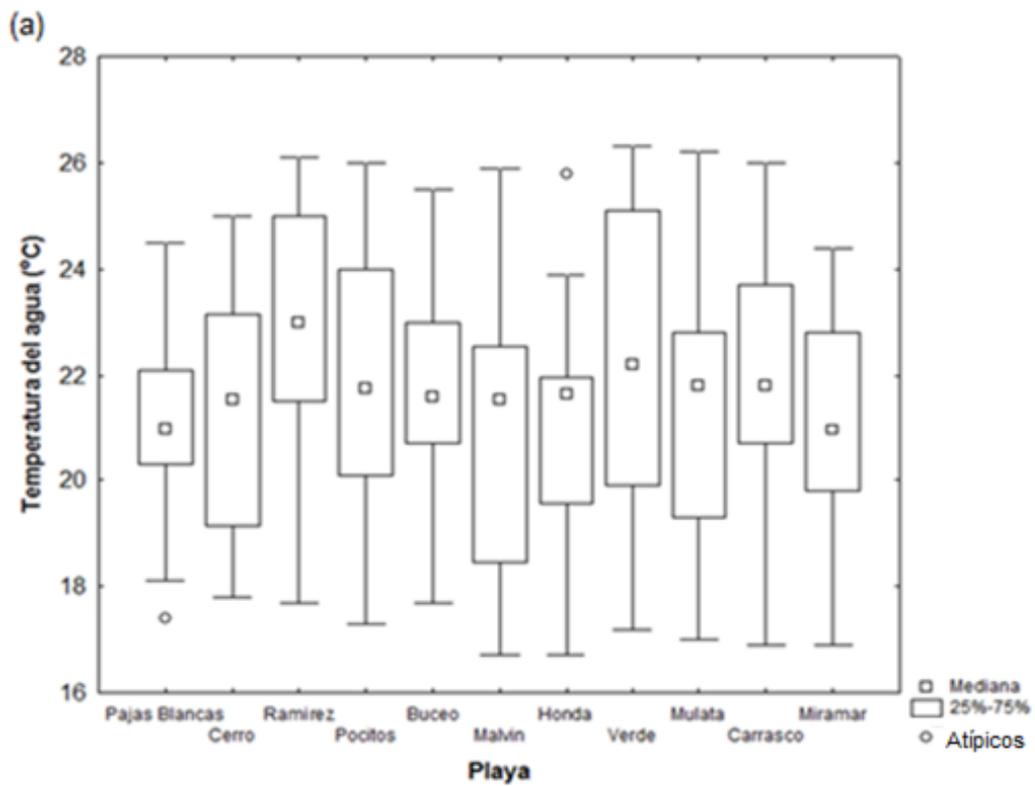
**Figura 4.** Diagramas de cajas **(a)** temperatura del agua (°C) y **(b)** salinidad, en las playas de Montevideo para los veranos correspondientes al período enero de 2006-diciembre de 2014. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados la mediana, los círculos los valores atípicos y los asteriscos los valores extremos. Datos obtenidos de la IM y la DINAMA. Salinidad n=255, temperatura del agua n=164

mostraron una alta variabilidad en los valores de temperatura del agua durante el período. Sin embargo, más del 75% de las observaciones registradas en todas las playas fueron mayores a 20°C exceptuando Cerro, Malvin, Verde y Mulata. Por otro lado todas las playas presentan registros mayores a 24°C, en el caso de Ramírez y Verde, el 25% de los registros alcanzan dicha temperatura. La playa Verde fue la que tuvo mayor variabilidad de temperatura, entre 17,2 y 26,3 °C. Finalmente Honda y Malvin alcanzaron las temperaturas más bajas durante este período, 16,7 °C mientras que en la playa Verde se midió la temperatura más alta: 26,3 °C (Figuras 5a).

En todos los veranos estudiados se registraron eventos de floraciones con valores de clorofila *a* que indicaron riesgo moderado y/o alto para baño (ver referencias para categorías de riesgo en Tabla 1), la mayor concentración se registró el 9 de enero de 2006 con 37.800 µg l<sup>-1</sup>. Por otro lado la concentración de microcistina también mostró valores altos indicando riesgo moderado y/o alto a partir del verano del 2008, llegando a su valor máximo de 30.000 µg l<sup>-1</sup> en marzo de 2008 y volviendo a disminuir a partir de dicha fecha. Los valores más altos de microcistina no coincidieron con los picos de clorofila *a* (Figura 6).

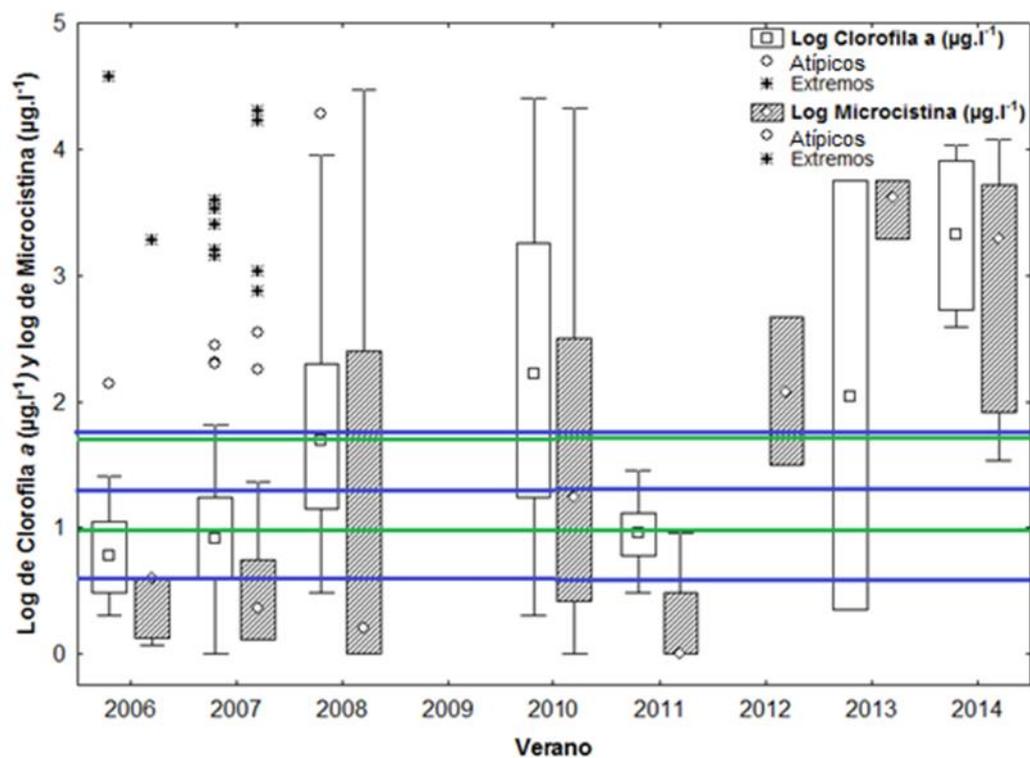
Todos los eventos de floraciones identificados correspondieron a valores de abundancia de células de *M. aeruginosa* que estuvieron por

encima de los rangos de riesgo medio y alto definidos por la OMS para el período estudiado (Figura 7, tabla 1).



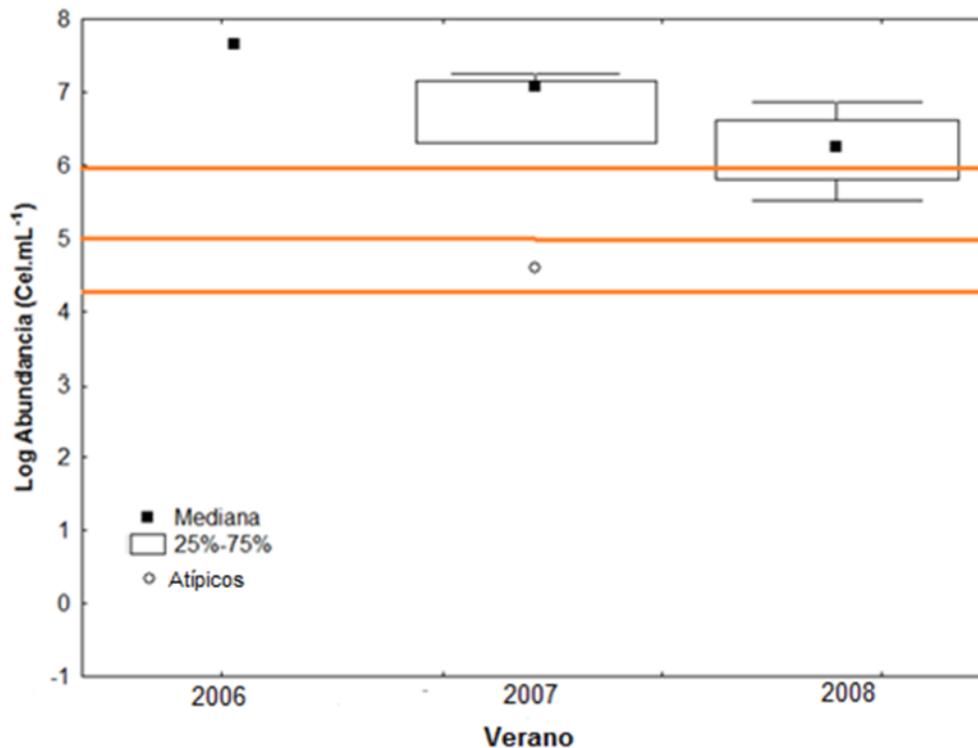
**Figura 5.** Diagramas de caja (a) temperatura del agua (°C) en 12 playas de Montevideo ordenadas espacialmente de Oeste a Este utilizando todos los datos para verano disponibles durante el período 2006-2014. Temperatura del agua n=164. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados la mediana y los círculos datos atípicos. Datos obtenidos de la IM y la DINAMA.(b)Salinidad en 12 playas de Montevideo ordenadas espacialmente de Oeste a Este utilizando todos los datos para verano disponibles durante el período 2006-2014. Salinidad n=255.

El valor máximo de  $4,5 \times 10^7$  cel.ml<sup>-1</sup> se registró el 9 de enero de 2006 coincidiendo con el pico de clorofila a (Figura 6). Solo se contó con información de abundancia para los veranos 2006 a 2008 (Tabla 3).



**Figura 6.** Diagrama de cajas del logaritmo de la clorofila a ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ): cajas lisas y logaritmo de la microcistina ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ): cajas rayadas, para los veranos del el período 2006-2014. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados la mediana, los círculos valores atípicos y los asteriscos valores extremos. Las líneas verdes representan los

valores de riesgo de clorofila *a* establecidos por la OMS para baño: y las líneas azules representan los valores de riesgo establecidos por la OMS de microcistina para baño detallados en la tabla 1. Log10 clo *a* n=231, Log10 microcistina n=193, Datos obtenidos de la IM.



**Figura 7.** Diagrama de cajas para el logaritmo de la abundancia de *M.aeruginosa* (cel.mL<sup>-1</sup>), para los veranos del período 2006-2008. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados negros la mediana, los círculos valores atípicos. Las líneas azules representan los valores establecidos por la OMS de abundancia de cianobacterias para baño (primera línea: riesgo bajo, entre la primera y la segunda línea riesgo medio y por encima de la segunda línea riesgo alto) detallados en la tabla 1. Log10 abundancia n=15. Datos obtenidos de la IM.

#### 6.4 Presencia de *M. aeruginosa* durante el período 2006-2011

De los 447 registros obtenidos para el período diciembre 2006 a marzo 2011, se identificaron 242 casos de muestreos con presencia de floraciones y 205 de muestreos con ausencia de floraciones. Estas

floraciones se distinguieron entre días con floraciones y playas con floraciones por día. El verano con más floraciones fue el 2010, con un registro total de 91 floraciones en diferentes playas, que correspondieron a 28 días con presencia de *M. aeruginosa*. Por otro lado en el verano 2009 no se registraron floraciones. Se encontró que los días que hubo floraciones estas ocurrían en varias playas simultáneamente (Tabla 9).

**Tabla 9.** Cantidad de días con registro de floraciones y floraciones totales registradas en todas las playas por verano, media de floraciones y veranos con registros de floraciones mayores a la media durante el período estudiado. Datos obtenidos de la IM y la DINAMA.

Veranos	Días con registro de floraciones	Floraciones totales registradas	Valores mayores a la media
2006	12	25	
2007	20	67	X
2008	8	30	
2009	0	0	
2010	28	91	X
2011	5	17	
<b>Media</b>	<b>12</b>	<b>38</b>	

Ramírez fue la playa donde se registraron más floraciones, seguida por Pocitos y Cerro. En el verano 2010, año con mayor ocurrencia de floraciones, estas se detectaron en 21 de las 24 playas muestreadas, (Tablas 9 y 10). Además de las tres playas anteriormente mencionadas, Pajas Blancas, Zabala, Gas, Minas, Estacada y Buceo también estuvieron

por encima de la media con más de 9 floraciones registradas durante el período 2006-2011 (Tabla 10).

**Tabla 10.** Floraciones registradas anualmente por playa durante el período 2006-2011, media de floraciones por playa y playas con registros de floraciones mayores a la media durante el período estudiado. Datos obtenidos de la IM y la DINAMA.

Playa	Año						Total	Valores mayores a la media
	2006	2007	2008	2009	2010	2011		
Punta Espinillo		2			3	1	6	
La Colorada	3	2			2	2	9	
Pajas Blancas	1	6	2		1		15	x
Zabala	3	4	2		2	1	12	x
Punta Yeguas		1	2		2		5	
Santa Catalina	3	3			3		9	
Nacional	1	1	1		2	1	6	
Cerro	2	4	3		6	3	18	x
Gas	1	4	1		4		10	x
Ejido			1		1		2	
Minas		1	1		7	1	10	x
Ramírez	10	6	6		13	2	37	x
Punta Carretas		1			1		2	
Estacada		5			7		12	x
Pocitos	1	5	3		10	2	21	x
Buceo		5	2		7	2	14	x
Malvin		1	2		3	1	7	
Playa Brava		1				1	2	
Honda		1	1				2	
Ingleses		1			4		5	
Mulata		1	1		2		4	
Carrasco		5	1		4		9	
Verde		3					3	
Miramar		4	1		1		6	
<b>Media</b>							<b>9</b>	

Los eventos de presencia de floraciones registrados pueden ser eventos puntuales o tener una duración de varios días consecutivos lo que estaría indicando que podría ser una misma floración que se extiende de forma temporal y espacial. Durante los veranos 2006 y 2010 se registraron las floraciones más prolongadas en el tiempo teniendo en cuenta la frecuencia de los muestreos que fue semanal o diaria. En el verano 2006 la playa Ramírez habría registrado una floración desde el 4 de enero al 26 de febrero, mientras que en el verano 2010 se habría registrado una entre el 27 de enero y el 24 de marzo, estas floraciones pueden haber sido continuas o intermitentes, lo cual no puede establecerse fehacientemente debido a la frecuencia de los muestreos. A su vez ese mismo año en Cerro y Pocitos se constató la presencia de floraciones desde el 7 al 24 de marzo (Tabla 11).

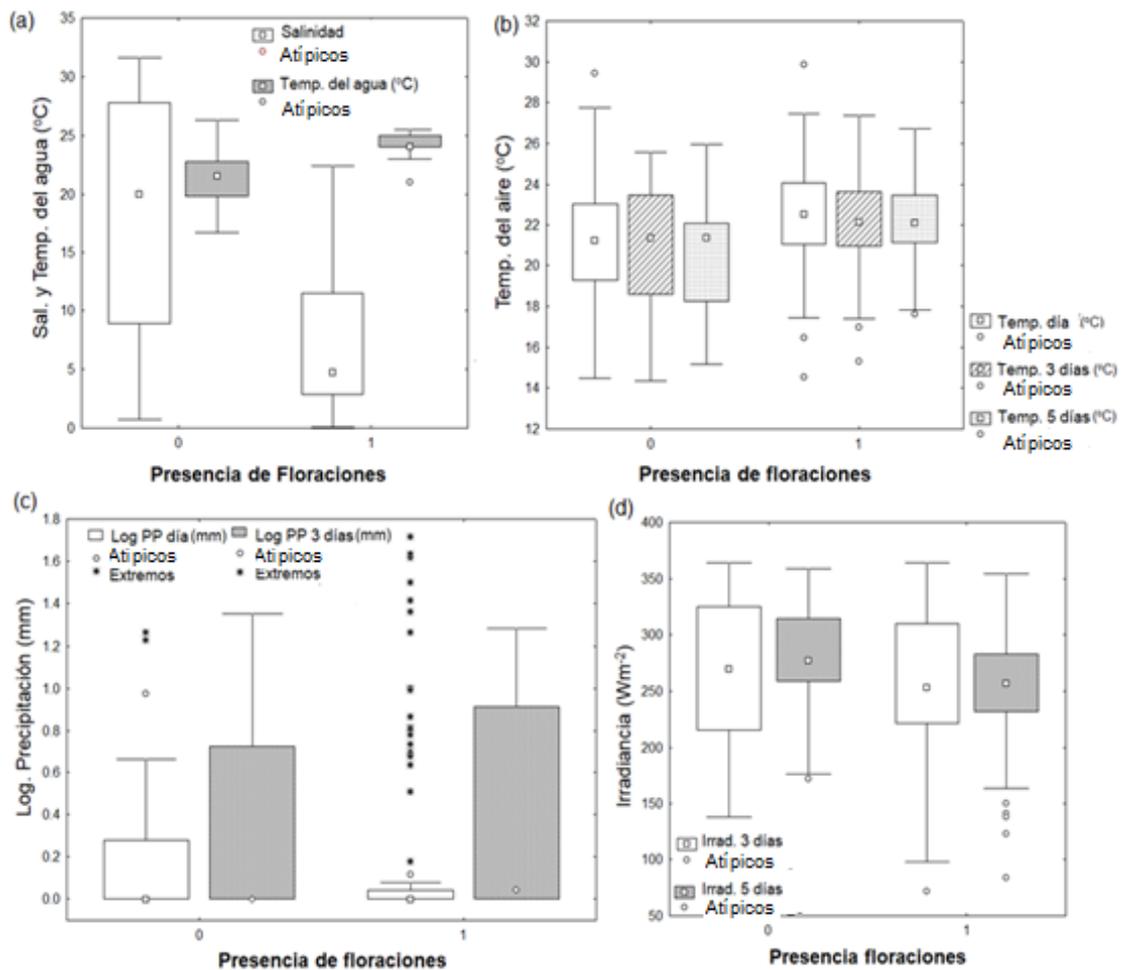
**Tabla 11.** Floraciones observadas en los días muestreados en 6 playas de Montevideo durante el período 2006-2014. Ce: Cerro, RA: Ramirez, PO: Pocitos, BU: Buceo, MA: Malvin, HO: Honda, CA: Carrasco: presencia de floraciones, -: no se realizó muestreo. Datos obtenidos de la IM y la DINAMA.

<b>Fecha de registro de floraciones</b>	<b>CE</b>	<b>RA</b>	<b>PO</b>	<b>BU</b>	<b>MA</b>	<b>CA</b>
04-01-06	-	1	-	-	-	-
04-01-06	-	1	-	-	-	-
05-01-06	-	1	-	-	-	-
06-01-06	1	1	-	-	-	-
09-01-06	-	1	1	-	-	-
08-02-06	-	1	-	-	-	-

11-02-06	-	1	-	-	-	-
13-02-06	-	1	-	-	-	-
26-02-06	-	1	-	-	-	-
09-03-06	1	1	-	-	-	-
12-03-06	-	1	-	-	-	-
04-12-09	-	1	1	1	-	-
13-12-09	-	-	1	-	-	-
15-12-09	-	-	1	1	-	-
16-12-09	-	-	-	1	-	-
21-12-09	-	-	1	1	-	1
05-01-10	-	1	-	-	-	-
07-01-10	-	-	-	-	1	-
14-01-10	-	1	1	-	-	-
22-01-10	-	-	-	1	-	-
23-01-10	-	-	1	-	-	-
25-01-10	1	-	-	-	-	-
27-01-10	-	1	1	-	-	-
31-01-10	1	1	-	-	-	-
01-02-10	-	1	-	-	-	1
10-02-10	-	1	-	-	-	-
06-03-10	-	1	-	-	-	-
07-03-10	1	1	1	1	1	1
08-03-10	1	1	-	-	-	-
11-03-10	1	1	1	-	1	1
12-03-10	-	-	-	1	-	-
13-03-10	-	1	-	-	-	-
24-03-10	1	1	1	-	-	-

---

Las condiciones de temperatura y salinidad fueron significativamente diferentes entre casos de ocurrencia y de ausencia de floraciones (salinidad  $H=28$   $p<0,001$ , temperatura del agua:  $H=57$ ,  $p<0,001$ ). Las floraciones de *M. aeruginosa* ocurrieron en el 75% de los registros a salinidades menores a 11. La temperatura del agua, en los casos de ocurrencias tuvo el 75% de los registros entre 24 y 25 °C. En los casos donde no se registraron eventos el 75% de los registros de salinidad estuvo entre 9 y 27 y la temperatura entre 20 y 23 °C (Figura 8a). En los casos en los que no se registraron floraciones para la temperatura del aire en el día del muestreo y para el promedio de los 3 y 5 días anteriores, al menos el 25% de los registros estuvieron entre 19 y 23 °C. En los días con floraciones la temperatura del aire en estos tres casos contó al menos con el 25% de los registros entre 21 y 23 °C, siendo estas 3 temperaturas significativamente diferentes a las de los días donde no se registraron floraciones (temperatura del día:  $H=16$ ,  $p<0,001$ , temperatura promedio de los 3 y 5 días anteriores  $H=18$ ,  $p<0,001$  y  $H=45$ ,  $p<0,001$ ) (Figura 8b).



**Figura 8.** Diagrama de cajas **(a)** salinidad: cajas lisas y temperatura del agua (°C): cajas rayadas **(b)** Temperatura del aire en el día del muestreo (°C): cajas lisas, temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (°C): cajas rayadas y los 5 días anteriores (°C): cajas punteadas. **(c)** Logaritmo de la precipitación el día del muestreo (mm): cajas lisas y logaritmo de la precipitación promedio de los 3 días anteriores al muestreo (mm): cajas rayadas. **(d)** Irradiancia (Wm<sup>-2</sup>): cajas lisas y promedio de los 5 días anteriores al muestreo de la irradiancia (Wm<sup>-2</sup>): cajas rayadas. Todas las variables fueron graficadas en condiciones de presencia o ausencia de floraciones para el período 2006-2014. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados representan la mediana, los círculos los valores atípicos, y los asteriscos los valores extremos. 1 indica presencia de floraciones y 0 ausencia. Todas las diferencias entre variables en ausencia o presencia de floraciones fueron significativas Datos proporcionados por el INUMET y obtenidos de la DINAMA y la IM.

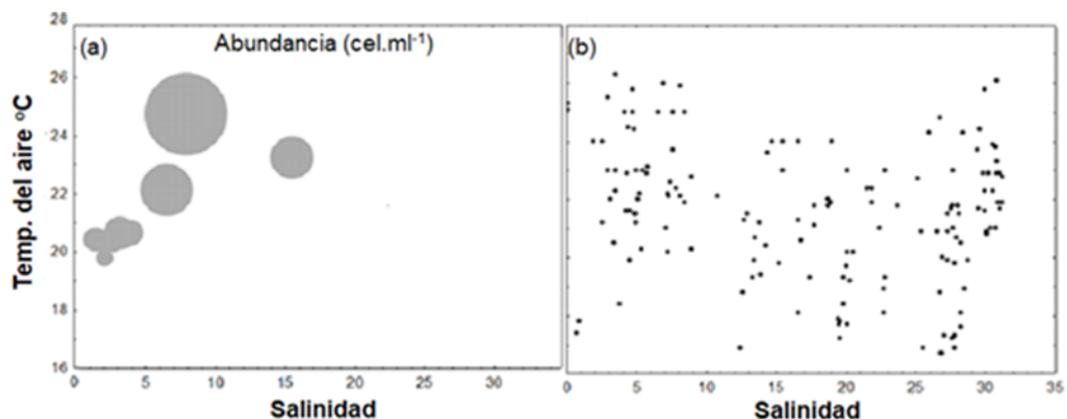
En el caso de los muestreos donde se registraron floraciones los valores máximos de precipitación del día fueron más altos en comparación con los días sin registro de floraciones. Los días con floraciones el 75% de

los registros estuvieron entre 0 y 0,5 mm, mientras que para los días sin eventos el 75% de los registros fueron de entre 0 y 0,2 mm. En cuanto a la precipitación promedio de los 3 días anteriores, los valores de precipitación en ausencia de registro de floraciones fueron apenas mayores que cuando si hubo registros. El 75% de los registros de la precipitación promedio de los 3 días anteriores para los días sin floraciones fueron de entre 0 y 4,3 mm, y 0 y 8 mm para los días con eventos. En ambos casos existieron diferencias significativas entre días con y sin floraciones (precipitación del día:  $H=18$ ,  $p<0,001$ , precipitación promedio de los 3 días anteriores:  $H=4,2$ ,  $p<0,04$ ) (Figura 8c). El rango de irradiancia promedio de los 3 y 5 días anteriores al muestreo del 75% de los registros en ausencia de floraciones estuvo entre 260 y 310  $Wm^{-2}$ , mientras que para los eventos con presencia el rango fue de entre 230 y 270  $Wm^{-2}$ . Los valores de irradiancia en presencia o ausencia de floraciones fueron significativamente diferentes (irradiancia promedio de los 3 y 5 días anteriores:  $H=5$ ,  $p<0,03$ ,  $H=27$ ,  $p<0,001$ ) (Figura 8d).

### **6.5 Variables biológicas vinculadas a las variables ambientales**

Los muestreos se realizaron abarcando un amplio rango de salinidades y temperaturas combinadas de entre 0 y 35 de salinidad y 0 y 26 °C de temperatura (Figura 9b). Sin embargo las floración con mayor abundancia celular ( $4,5 \times 10^7$  cel.ml<sup>-1</sup>) se registró en la playa Ramírez el 9 de

enero de 2006 a una temperatura de 26°C y una salinidad de 7. A menores salinidades y temperaturas también hubo ocurrencia de floraciones siendo estas de menor abundancia. Por otro lado, si bien se registraron floraciones relativamente importantes a salinidades más altas estas ocurrieron a temperaturas altas, a bajas temperaturas no hubo ocurrencia de floraciones grandes (Figura 9a).



**Figura 9 (a)** Temperatura del aire (Temp. del aire, °C) vs salinidad. El tamaño de las burbujas indica la abundancia celular de las floraciones ( $\text{cel.ml}^{-1}$ ), Burbuja de mayor tamaño= $4,5 \times 10^7$   $\text{cel.ml}^{-1}$  **(b)** Temperatura del aire (°C) vs salinidad los puntos indican condiciones en las que se realizaron muestreos durante el período de estudio. Datos obtenidos de la IM y la DINAMA.

La correlación entre la abundancia y la velocidad media y máxima del viento, la temperatura del aire en el día del muestreo y del promedio de los 3 y 5 días anteriores fue positiva. La abundancia se correlacionó de forma moderada con la irradiancia promedio de los 3 y 5 días anteriores al muestreo y no mostró una correlación significativa con el logaritmo de la clorofila *a* ni con el logaritmo de la microcistina. El logaritmo de la clorofila

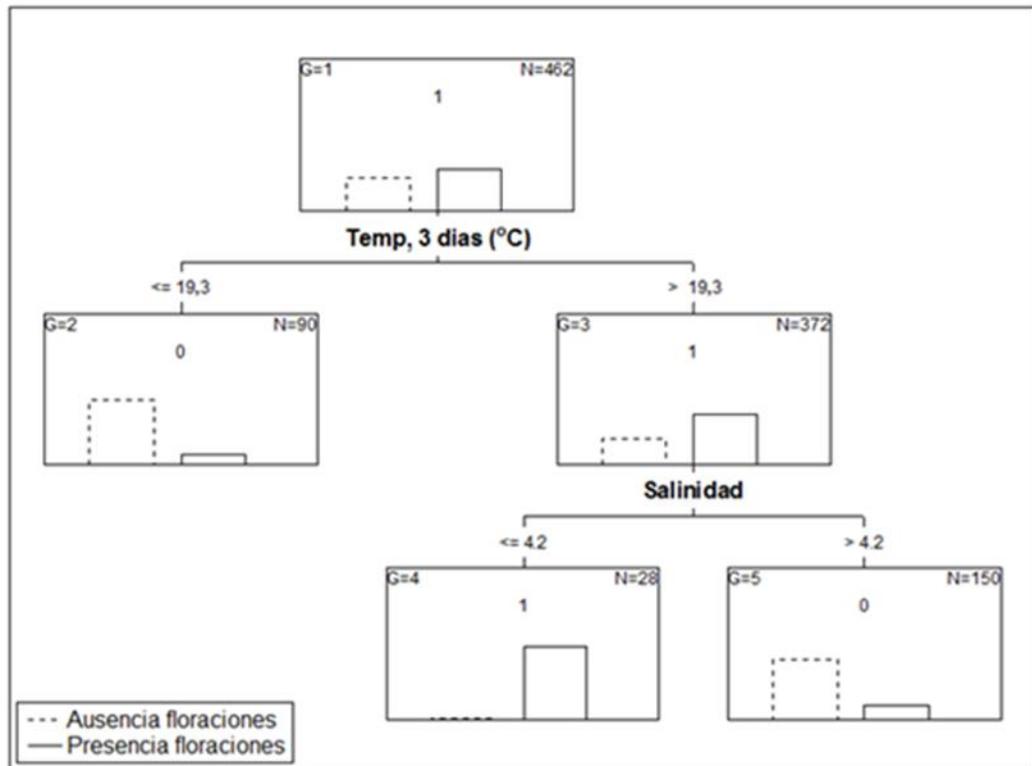
a y de la microcistina si mostraron una correlación positiva moderada entre ellas, pero no se correlacionaron positivamente con ninguna de las variables ambientales (Tabla 12).

**Tabla 12.** Coeficiente de correlación de Spearman para las variables: abundancia de las floraciones ( $\text{cel.ml}^{-1}$ ), logaritmo10 de la clorofila a (Log. Clo a,  $\mu\text{gl}^{-1}$ ), logaritmo10 de la microcistina (Log. Microcistina,  $\mu\text{gl}^{-1}$ ), salinidad, temperatura del agua (Temp. Agua,  $^{\circ}\text{C}$ ), velocidad media del viento (Int. Media Viento, Km/h), velocidad máxima del viento (Int. Máx. Viento, Km/h), temperatura del aire en el día del muestreo (Temp. día,  $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Temp. 3 días,  $^{\circ}\text{C}$ ) y de los 5 días anteriores (Temp. 5 días,  $^{\circ}\text{C}$ ), logaritmo de la precipitación en el día del muestreo (Log. PP día, mm), logaritmo de la precipitación promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Log. PP 3 días, mm) y de los 5 días anteriores (Log. PP 5 días, mm), irradiancia en el día del muestreo (Irrad. día,  $\text{Wm}^{-2}$ ), irradiancia promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Irrad. 3 días,  $\text{Wm}^{-2}$ ) y de los 5 días anteriores (Irrad. 5 días,  $\text{Wm}^{-2}$ ). Se muestran solo los valores significativos. Datos proporcionados por INUMET y obtenidos de la IM y del INIA.

	Abundancia ( $\text{cel.ml}^{-1}$ )	Log. Clo a ( $\mu\text{gl}^{-1}$ )	Log. Microcistina ( $\mu\text{gl}^{-1}$ )
Abundancia ( $\text{cel.ml}^{-1}$ )			
Log. Clo a ( $\mu\text{gl}^{-1}$ )			0,66
Log. Microcistina ( $\mu\text{gl}^{-1}$ )		0,66	
Salinidad			
Int. Media Viento (Km/h)	0,62		
Int. Máx. Viento (Km/h)	0,86		
Temp. día ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,63		
Temp. 3 días ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,79		
Temp. 5 días ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,77		
Log. PP día (mm)			
Log. PP 3 días (mm)			
Log. PP 5 días (mm)			
Irrad. día ( $\text{Wm}^{-2}$ )	0,56		
Irrad. 3 días ( $\text{Wm}^{-2}$ )	0,54		
Irrad. 5 días ( $\text{Wm}^{-2}$ )			

## 6.6 Variables ambientales asociadas a la presencia de floraciones

Se construyó un CART utilizando las siguientes variables explicativas para modelar la presencia o ausencia de floraciones: salinidad, temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ), velocidad media del viento ( $\text{Km/h}$ ), velocidad máxima del viento ( $\text{Km/h}$ ), temperatura del aire en el día del muestreo ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura del aire promedio de los 3 y 5 días anteriores al muestreo ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación en el día del muestreo ( $\text{mm}$ ), precipitación promedio de los 3 y 5 días anteriores al muestreo ( $\text{mm}$ ), irradiancia en el día del muestreo ( $\text{Wm}^{-2}$ ), irradiancia promedio de los 3 y 5 días anteriores al muestreo ( $\text{Wm}^{-2}$ ). El árbol se conformó de 5 nodos o grupos, clasificados por la temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Temp. 3 días) y la salinidad. De estos 5 nodos, 3 fueron terminales y utilizados para clasificar los casos y evaluar las condiciones ambientales que favorecen o no la presencia de floraciones. El primer nodo (grupo 1) se dividió por la temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo. El grupo 2 reúne los casos donde la temperatura es menor o igual a  $19,3^{\circ}\text{C}$  y determina la ausencia de floraciones. Con valores menores o iguales a  $4,2$  de salinidad se observaron floraciones (grupo 4) mientras que con valores mayores a dicha salinidad no hubo ocurrencia de floraciones (grupo 5) (Figura 10).



**Figura 10.** Árbol de clasificación y regresión (CART) para presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa* en función de las variables finalmente seleccionadas: salinidad y temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Temp. 3 días, °C). Las barras de líneas punteadas corresponden a datos de ausencia de floraciones y las continuas a presencia de floraciones. G: grupo, N: set de datos utilizados para el análisis. 0: ausencia de floraciones de *M.aeruginosa*, 1: presencia de floraciones de *M.aeruginosa*. Datos proporcionados por INUMET y obtenidos de la IM, la DINAMA y el INIA.

El modelo tuvo un 72% de acierto a la hora de predecir la ocurrencia o ausencia de floraciones, con un error de 0,28 +/- 0,07 de desvío standar. El grupo 2, grupo sin floraciones tuvo un 86,7% de datos con ausencia de floraciones y un porcentaje de error de 13,3%. El grupo 4 de ocurrencia de floraciones tuvo un 96,4% de datos con presencia de floraciones y 3,6% de datos mal clasificados. Finalmente el grupo 5 clasificado como grupo de

ausencia de floraciones tuvo 80% de muestras con ausencias y 20% de muestras con presencias (Figura 10, Tabla 13).

**Tabla 13.** Composición de los grupos formados a partir del CART. N: número de datos, Clasificación: grupo de presencia (C/Flor) o ausencia (S/Flor). 0: cantidad de datos de ausencia de floraciones, 1: cantidad de datos de presencia de floraciones. % de ocurrencia: porcentaje de ocurrencia, % de error: porcentaje de error.

<b>Grupo</b>	<b>N</b>	<b>0/1</b>	<b>Clasificación</b>	<b>% de ocurrencia</b>	<b>% de error</b>
2	90	78/12	S/Flor	86,7	16,3
4	28	1/27	C/Flor	96,4	3,6
5	15	120/30	S/Flor	80	20

Los grupos 2 y 5 clasificados como grupos de ausencia de floraciones tuvieron mayores valores de clorofila *a* y menores valores de microcistina que el grupo 4, grupo con floraciones, sin embargo las floraciones de mayor abundancia se encontraron en el grupo 5. Para estas tres variables no hubo diferencias significativas entre grupos (Tabla 14). En el grupo 5 se registraron los valores más altos de salinidad y en el 4 los más bajos mientras que la temperatura del agua fue más alta en el grupo 4, habiendo diferencias significativas entre sus valores en los 3 grupos. Las velocidades medias y máximas de viento mostraron diferencias significativas entre los tres grupos, alcanzando tanto los valores mayores como los menores en el grupo 4. Las temperaturas del aire también fueron significativamente diferentes entre los 3 grupos con sus mayores valores

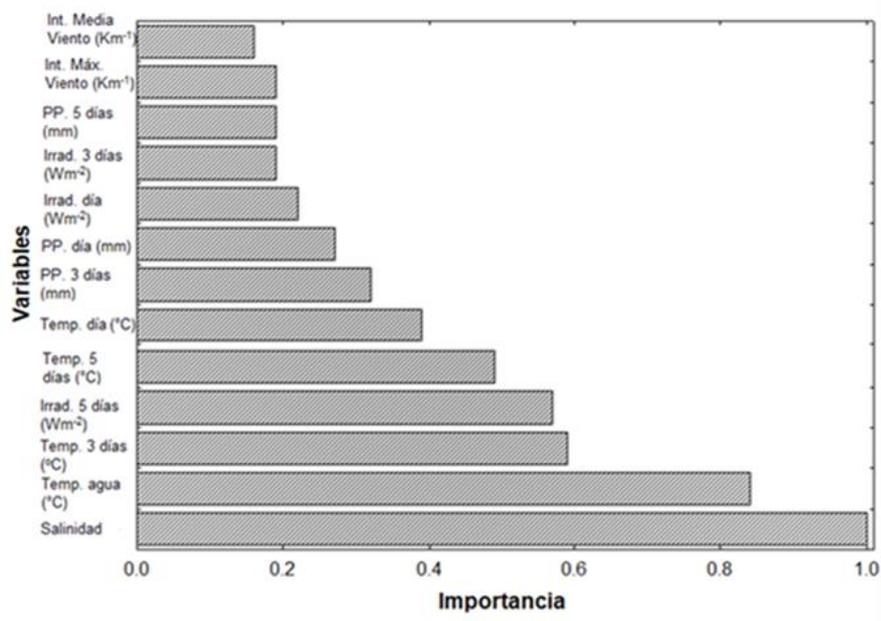
en el grupo 5 y los menores en el grupo 2. Las precipitaciones fueron significativamente diferentes entre los 3 grupos, presentando sus mayores valores en el grupo 4. Finalmente la irradiancia, que también fue significativamente diferente en los tres grupos, presentó sus valores más bajos en el grupo 2 y los más altos en el 4 y 5.

**Tabla 14.** Rango de variables en los grupos formados a partir del CART. Abundancia de las floraciones ( $\text{cel.ml}^{-1}$ ), logaritmo10 de la clorofila *a* (Log. Clo *a*,  $\mu\text{gl}^{-1}$ ), logaritmo10 de la microcistina (Log. Microcistina,  $\mu\text{gl}^{-1}$ ), salinidad, temperatura del agua (Temp. Agua, °C), velocidad media del viento (V. Media Viento, Km/h), velocidad máxima del viento (V. Máx. Viento, Km/h), temperatura del aire en el día del muestreo (Temp. día, °C), temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Temp. 3 días, °C) y de los 5 días anteriores (Temp. 5 días, °C), logaritmo10 de la precipitación en el día del muestreo (Log. PP día, mm), logaritmo10 de la precipitación promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Log. PP 3 días, mm) y de los 5 días anteriores (Log. PP 5 días, mm), irradiancia el día del muestreo (Irrad. día,  $\text{Wm}^{-2}$ ), irradiancia promedio de los 3 días anteriores al muestreo (Irrad. 3 días,  $\text{Wm}^{-2}$ ) y de los 5 días anteriores (Irrad. 5 días,  $\text{Wm}^{-2}$ ). Resultado del estadístico de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis Datos proporcionados por INUMET y obtenidos de la IM y del INIA.

	Grupo 2	Grupo 4	Grupo 5	Estadístico de Kruskal-Wallis
<b>Abundancia (<math>\text{cel.ml}^{-1}</math>)</b>	Sin datos	$1,2 \times 10^6 - 7,2 \times 10^6$	$3,93 \times 10^4 - 4,5 \times 10^7$	H=1.76, $p < 0,2$
<b>Clo <i>a</i> (<math>\mu\text{gl}^{-1}</math>)</b>	5 - 25500	0,4 - 19000	0 - 37800	H=4,5, $p < 0,1$
<b>Microcistina (<math>\mu\text{gl}^{-1}</math>)</b>	0 - 5600	0 - 30000	0 - 1900	H=3,21, $p < 0,2$
<b>Salinidad</b>	0,7 - 28,8	0,1 - 4,3	4,4 - 31,6	H=71,9, $p < 0,01$
<b>Temp. agua (°C)</b>	16,7 - 26,3	20,5 - 25,5	16,9 - 26,1	H=32,6, $p < 0,01$
<b>V. Media Viento (Km/h)</b>	6,3 - 26,6	5,9 - 27,7	9 - 24,5	H=11,6, $p < 0,01$
<b>V. Máx. Viento (Km/h)</b>	13 - 38,9	16,7 - 42,6	14,8 - 38,9	H=28,5, $p < 0,01$
<b>Temp. día (°C)</b>	14,5 - 23,9	17,7 - 26,2	18,6 - 29,4	H=64,1, $p < 0,01$
<b>Temp. 3 días (°C)</b>	14,4 - 19,3	19,7 - 24,3	19,4 - 26	H= 189,9, $p < 0,01$
<b>Temp. 5 días (°C)</b>	15,2 - 22,6	20,3 - 25,3	17,6 - 25,7	H= 136,9, $p < 0,01$
<b>PP día (mm)</b>	0 - 15,9	0 - 40,5	0 - 17,3	H= 6,8, $p < 0,03$
<b>PP 3 días (mm)</b>	0 - 6,3	0 - 18,2	0 - 21,5	H=21,1, $p < 0,001$
<b>PP 5 días (mm)</b>	0 - 5	0 - 13,9	0 - 12,9	H=10,3, $p < 0,01$
<b>Irrad. día (<math>\text{Wm}^{-2}</math>)</b>	187 - 369	86 - 345	86 - 361	H= 35,5, $p < 0,001$

<b>Irrad. 3 días (Wm<sup>-2</sup>)</b>	138 - 364	98 - 318	110 - 359	H= 24,5, p<0,001
<b>Irrad. 5 días (Wm<sup>-2</sup>)</b>	180 - 334	123 - 295	137 - 359	H= 39.9, p<0,001

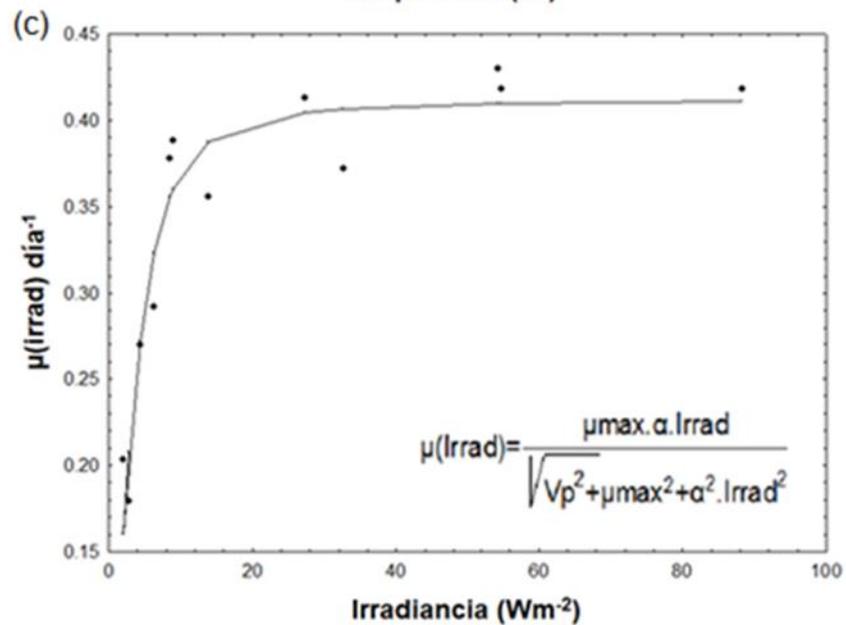
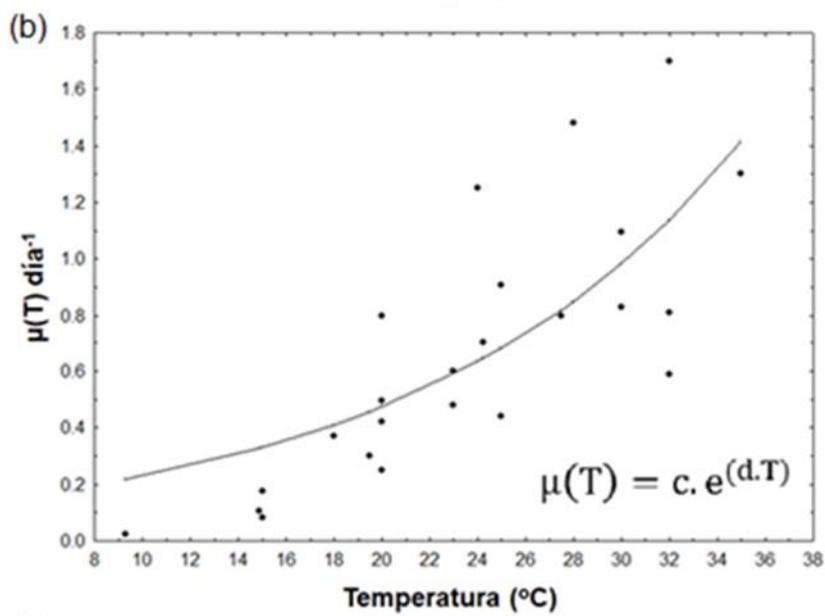
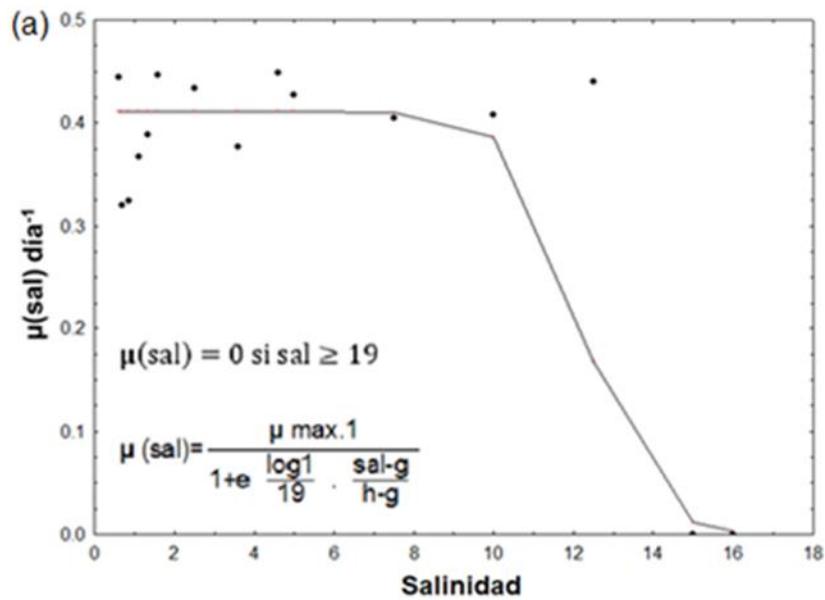
La salinidad fue la variable predictora más importante a la hora de construir el CART final, la segunda fue la temperatura del agua. Si bien no fueron las primeras en dividir el árbol ya que no todos los datos usados tenían registros de salinidad y temperatura del agua (Tabla 11, Figura 11). La tercer variable en importancia a la hora de construir el árbol fue el promedio de la temperatura de los 3 días anteriores al muestreo. Por otro lado la irradiancia promedio de los 3 días anteriores al muestreo, la precipitación promedio de los 5 días anteriores y la velocidad del viento fueron las variables que menos influyeron en la construcción del árbol (Figura 11).



**Figura 11.** Indicador de importancia calculado para las variables utilizadas en el árbol de clasificación y regresión para presencia-ausencia de floraciones de *M. aeruginosa*: salinidad, temperatura del agua (°C), velocidad media del viento (Km/h), velocidad máxima del viento (Km/h), temperatura del aire en el día del muestreo (°C), temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo y de los 5 días anteriores (°C), precipitación en el día del muestreo (mm), precipitación promedio de los 3 días anteriores al muestreo y de los 5 días anteriores (mm), irradiancia en el día del muestreo ( $Wm^{-2}$ ), irradiancia promedio de los 3 días anteriores al muestreo y de los 5 días anteriores ( $Wm^{-2}$ ). Datos proporcionados por INUMET y obtenidos de la IM, la DINAMA y el INIA.

## 6.7 Parametrización del crecimiento de *M. aeruginosa*

De acuerdo a la parametrización realizada, la tasa de crecimiento de *M.aeruginosa* en función de la salinidad ( $\mu$ Sal) alcanzó el valor máximo de  $0,41 \text{ día}^{-1}$  a valores de salinidad de entre 0 y 10. A partir de salinidades mayores a 10 la tasa de crecimiento comienza a decaer hasta 0 a 19 de salinidad. Los parámetros de la ecuación se indican en la Tabla 15 (Figura 12a). La parametrización de la tasa de crecimiento en función de la temperatura:  $\mu(T)$  se ajustó con un comportamiento exponencial al aumentar la temperatura. El valor mínimo de  $\mu$  de  $0,03 \text{ día}^{-1}$  coincide con  $9,3 \text{ °C}$  de temperatura, mientras que a  $23\text{°C}$  la  $\mu$  fue de  $0,48 \text{ día}^{-1}$  y a  $35\text{°C}$  de  $1,3 \text{ día}^{-1}$ . Los parámetros de ajuste de la ecuación se muestran en la tabla 15 (Figura 12b). Finalmente la parametrización de la tasa de crecimiento en función de la irradiancia:  $\mu(Irrad)$  mostró al comienzo un aumento casi lineal, con tasas que aumentaron entre  $0,21$  y  $0,41 \text{ día}^{-1}$  a irradiancias de entre 3 a  $14 \text{ Wm}^{-2}$  respectivamente. A partir de  $27 \text{ Wm}^{-2}$ , la tasa de crecimiento permanece constante en  $0,41 \text{ día}^{-1}$ . Los parámetros de ajuste de la ecuación se muestran en la tabla 15 (Figura 12c).



**Figura 12 (a)** Tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de la salinidad  $\mu(\text{Sal})$  ( $\text{día}^{-1}$ ). Valores según condiciones experimentales (puntos) y según la parametrización realizada (línea). Se presenta las ecuaciones de parametrización de tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de los valores de salinidad ajustados. **(b)** Tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de la temperatura  $\mu(T)$  ( $\text{día}^{-1}$ ). Valores según condiciones experimentales (puntos) y según la parametrización realizada (línea). Se presenta la ecuación de parametrización de tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de los valores de temperatura ajustados. **(c)** Tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de la irradiancia  $\mu(\text{Irrad})$  ( $\text{día}^{-1}$ ). Valores según condiciones experimentales (puntos) y según la parametrización realizada (línea). Se presenta la ecuación de parametrización de tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de los valores de salinidad ajustados en condiciones experimentales. En la tabla 15 se indican los valores de los parámetros utilizados.

**Tabla 15.** Parámetros utilizados para las ecuaciones de tasas de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de la salinidad, temperatura e irradiancia. Se explica cálculo y cita utilizada.

Parámetro	Descripción	Valor	Cálculo	Cita
$\mu_{\text{max}}$	Tasa máxima de crecimiento de <i>M. aeruginosa</i> para la irradiancia	0,41	Calculada a partir de datos de $\mu$ con diferentes Irradiancias a 22°C y salinidad 0	Wiedner et al., 2003
alfa	Pendiente inicial de la ecuación fotosíntesis- irradiancia	0,09	Calculada a partir de datos de $\mu$ con diferentes irradiancias a 22 °C	Wiedner et al., 2003
g	Parámetro de la ecuación logística de salinidad	12,85	Calculada a partir de datos de $\mu$ a 23°C	Yannicelli y Castro, 2013
h	Parámetro de la ecuación logística de salinidad	12,83	Calculada a partir de datos de $\mu$ a 23°C	Yannicelli y Castro, 2013
c	Parámetro de la ecuación exponencial de temperatura	0,11	Ajustada a partir de valores de Koné et al. 2005	Koné et al., 2005
d	Parámetro de la ecuación exponencial que multiplica la temperatura	0,07	Ajustada a partir de valores de Koné et al. 2005	Koné et al., 2005
$V_p=a.b^T$	$V_p$ es el crecimiento saturado por la luz	$8.e^{-05}$	Tomado de Koné et al. 2005	Koné et al., 2005
a	Tasa máxima de crecimiento del fitoplancton a 0°C para la irradiancia	0,52	Ajustado a partir de Koné et al. 2005	Koné et al., 2005
b	Parámetro presente en la ecuación de irradiancia	0,99	Tomado de Koné et al. 2005	Koné et al., 2005

## 6.8 Variación de la tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de gradientes ambientales

Como resultado de las parametrizaciones se construyó un modelo mecanicista para la tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* ( $\mu(MA)$ ) que describe el crecimiento de esta especie a partir de valores de salinidad, temperatura e irradiancia. Cada término de la ecuación del modelo corresponde a las ecuaciones de crecimiento de *M.aeruginosa* en función de la salinidad, temperatura e irradiancia.

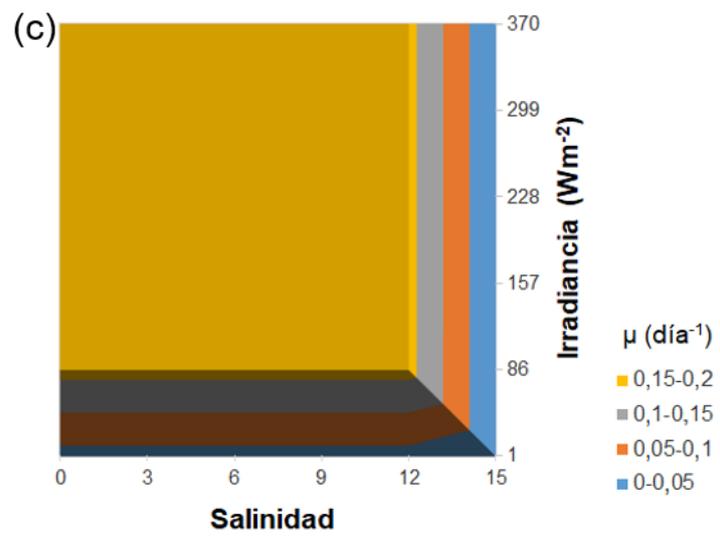
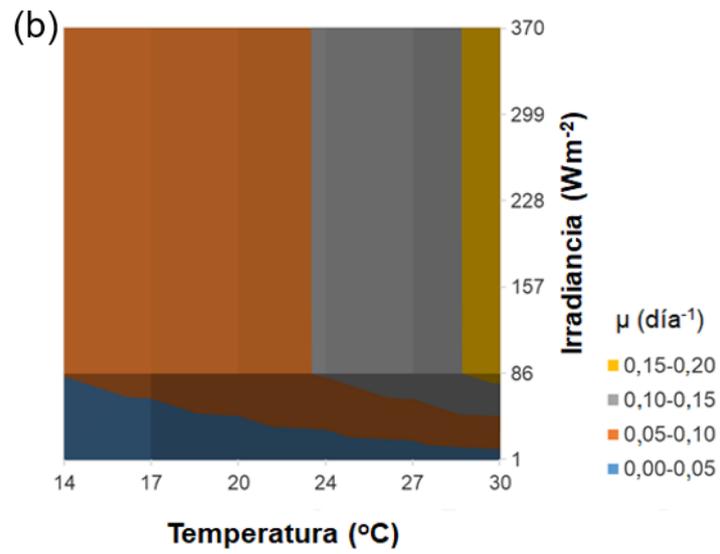
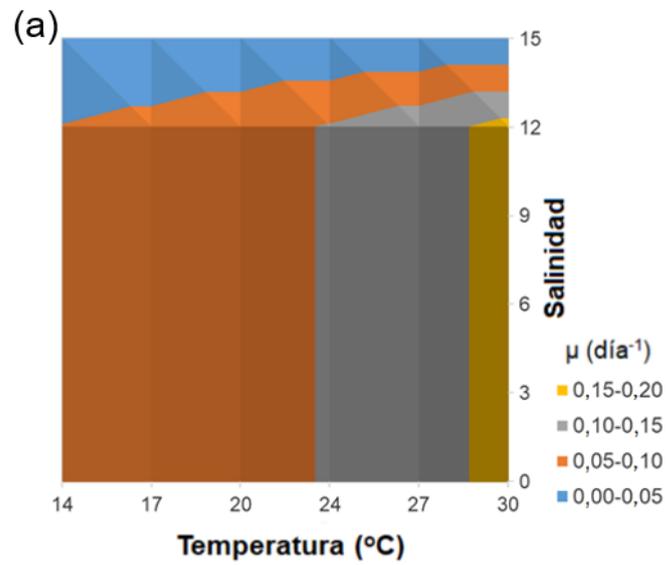
$$\mu (MA) = \frac{\mu \max.1}{1 + e^{\left(\frac{\log 1}{19}\right) \cdot \left(\frac{\text{sal}-g}{h-g}\right)}} \cdot c \cdot e^{(d.T)} \cdot \frac{\mu \max.\alpha \cdot \text{Irrad}}{\sqrt{Vp^2 + \mu \max^2 + \alpha^2 \cdot \text{Irrad}^2}}$$

**Ecuación 1.** Modelo mecanicista conformado a partir de las ecuaciones de parametrización de tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en función de la salinidad, temperatura e irradiancia ajustados en condiciones experimentales. En la tabla 15 se indican los valores de los parámetros utilizados.

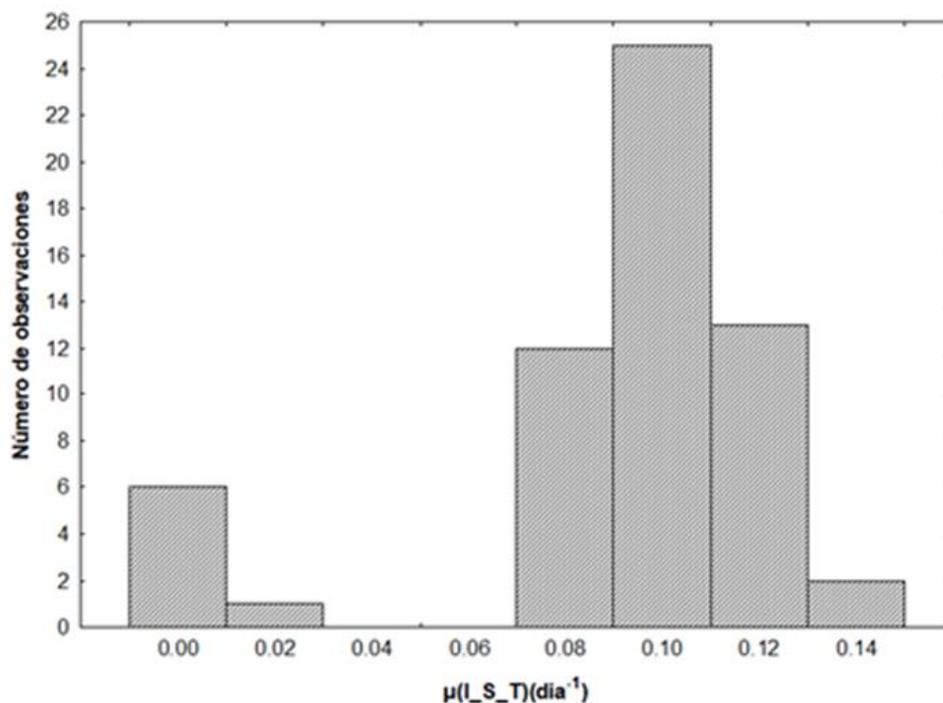
A partir del modelo construido se estimó la tasa de crecimiento esperada de *M. aeruginosa* a lo largo de amplios rangos de las tres variables. Los valores más altos de tasa de crecimiento coincidieron con temperaturas de entre 29 y 30 °C y salinidades menores a 12. A salinidades mayores a 12 la tasa tuvo valores mínimos siendo casi independiente de la temperatura. En estas condiciones la salinidad tuvo más efecto sobre la tasa de crecimiento que la temperatura. La irradiancia se fijó a 370 Wm<sup>-2</sup>,

valor más alto registrado en los muestreos (Figura 13a). Por otro lado se evaluó la tasa de crecimiento frente a gradientes de temperatura e irradiancia, las tasas más altas se registran a temperaturas de entre 29 y 30 °C e irradiancias mayores a 85 Wm<sup>-2</sup>. La temperatura tuvo más influencia en la tasa de crecimiento que la irradiancia salvo a valores bajos, donde esta es más importante. La salinidad se fijó en 0,1, valor más bajo registrado en los muestreos (Figura 13b). Finalmente se evaluó la interacción entre gradientes de salinidad e irradiancia. Nuevamente, los mayores valores de tasa de crecimiento se dieron con salinidades de entre 0 y 12, e irradiancias mayores a 85 Wm<sup>-2</sup>, luego de 12 la tasa empezó a disminuir hasta llegar a 0. La salinidad tuvo mayor influencia en la tasa de crecimiento que la irradiancia. La temperatura se fijó a 30°C, temperatura más alta registrada en los muestreos (Figura 13c). Para los tres casos la  $\mu$  máxima alcanzada fue de 0,17 día<sup>-1</sup>. Si bien según la parametrización la tasa máxima se alcanza a 27 Wm<sup>-2</sup> (Figura 12c), en combinación con otras variables más relevantes para el crecimiento de *M. aeruginosa* para alcanzar la tasa máxima se necesita una irradiancia mayor, de 85 Wm<sup>-2</sup>(Figura 13b y c)

Los valores de tasa de crecimiento calculada a partir del modelo con los datos de temperatura, irradiancia y salinidad basados en los registros en las playas para el período 2006- 2014 estuvieron en el entorno de 0 y 0,14 día<sup>-1</sup> (Figura 14).

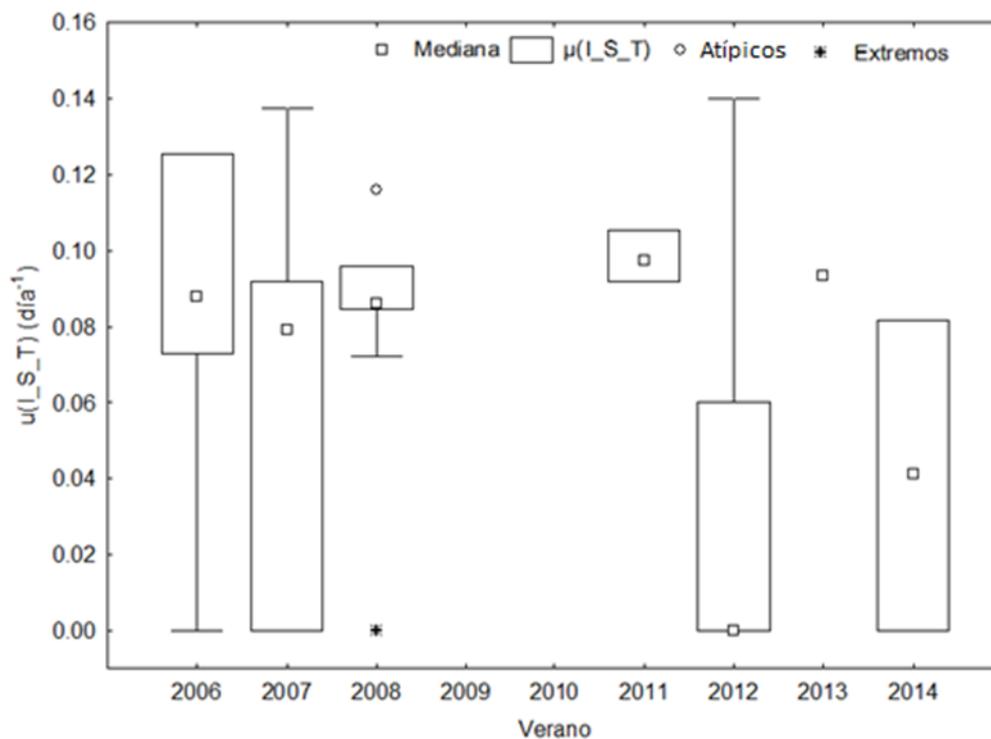


**Figura 13.** Gráficos de superficie **(a)** Respuesta de la tasa de crecimiento a la contribución relativa de la de salinidad vs temperatura (°C). Valor de irradiancia fijo: 370 Wm<sup>-2</sup>. **(b)** respuesta de la tasa de crecimiento a la contribución relativa de la irradiancia (Wm<sup>-2</sup>) vs temperatura (°C). Valor de salinidad fijo: 0,1. **(c)** respuesta de la tasa de crecimiento a la contribución relativa de la irradiancia (Wm<sup>-2</sup>) vs salinidad. Valor de temperatura fijo 30°C. Los distintos colores indican los distintos valores de tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* según las variables.



**Figura 14.** Histograma de valores tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* calculada a partir del modelo en función de la irradiancia, salinidad y temperatura registrados en los muestreos.  $\mu(I_S_T)(\text{día}^{-1})$ .

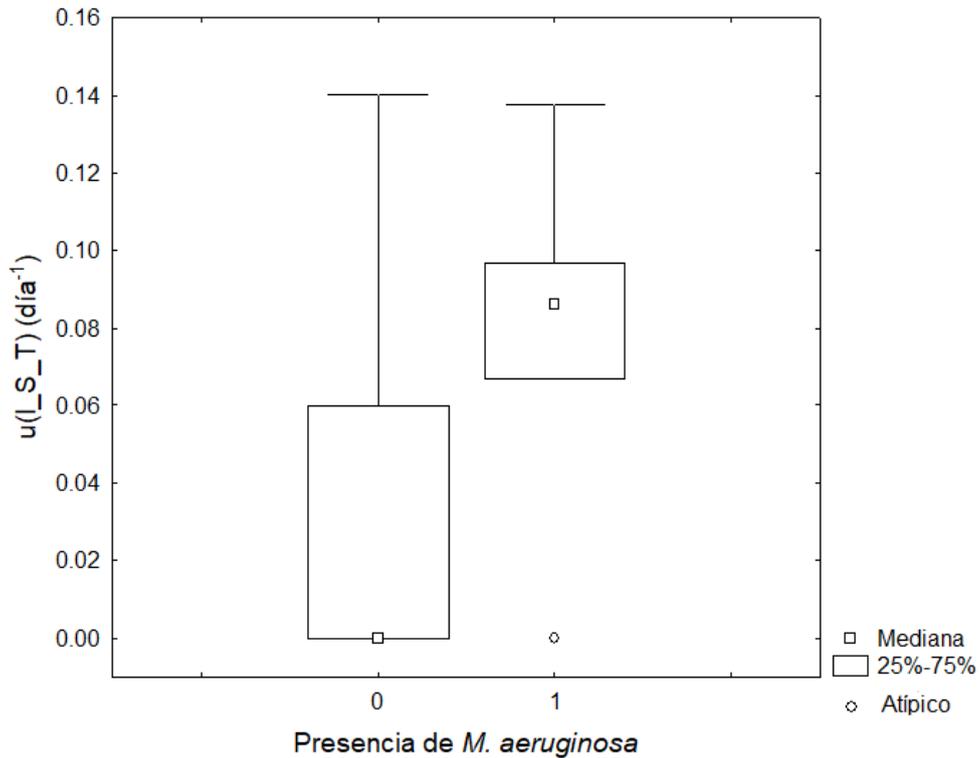
El valor máximo estimado de tasa de crecimiento, 0,14 día<sup>-1</sup> se obtuvo para los veranos de 2007 y 2012. Por otro lado los valores de 0 se estimaron para los veranos 2006, 2007, 2008, 2012 y 2014. Para los veranos 2009 y 2010 no se contaron con datos de salinidad para el cálculo de  $\mu(I_S_T)$  (Figura 15).



**Figura 15.** Valores tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* calculada a partir del modelo en función de la irradiancia, salinidad y temperatura  $\mu(I_S_T)$ ( $\text{día}^{-1}$ ) para los veranos donde se realizaron muestreos. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados representan la mediana, los círculos los valores atípicos, y los asteriscos los valores extremos. Datos proporcionados por el INUMET y obtenidos del INIA, la IM y la DINAMA.

Para evaluar si el crecimiento *in situ* de *M. aeruginosa* puede ser el factor que explique las floraciones se comparó la tasa de crecimiento en condiciones de presencia y ausencia. En ausencia esta varió entre 0 y 0,14  $\text{día}^{-1}$  y el 75% de los registros abarcó tasas entre 0 y 0,06  $\text{día}^{-1}$ . Por otro lado en condiciones de presencia de floraciones los valores de las tasas tomaron valores entre 0 y 0,14  $\text{día}^{-1}$  con el 75% de los registros entre 0,08 y 0,1  $\text{día}^{-1}$ . Los valores registrados en presencia y ausencia de floraciones

fueron significativamente diferentes de acuerdo al test de Kruskal-Wallis ( $H=48,8$ ;  $p<0,001$ ) (Figura 16).



**Figura 16.** Diagrama de cajas de tasa de crecimiento calculadas a partir del modelo en función de la irradiancia, salinidad y temperatura  $\mu(I_S_T, \text{día}^{-1})$  en condiciones de presencia y ausencia de floraciones para el período 2006-2014. Las cajas representan entre el 25 y el 75% de los datos, los cuadrados representan la mediana, los círculos los valores atípicos. 1 indica presencia de floraciones y 0 ausencia. Datos proporcionados por el INUMET y obtenidos del INIA, la IM y la DINAMA.

## 7. DISCUSIÓN

Las floraciones de *M. aeruginosa* causan problemas tanto a nivel mundial como local, interfiriendo con los distintos usos de las playas especialmente en temporada estival. En este trabajo, la salinidad y temperatura se identificaron como las principales variables en explicar la variabilidad temporal y espacial de su ocurrencia en las playas de Montevideo, coincidiendo con algunos estudios previos (Segura et al., 2017). La importancia de estas variables fue comprobada a partir de la utilización de dos aproximaciones diferentes. El CART mostró que las floraciones ocurren preferentemente a temperaturas mayores a 19,3°C y salinidades menores a 4,2. Por otro lado el modelo de crecimiento parametrizado a partir de resultados experimentales coincidió en cuanto a los umbrales de las variables con los resultados del análisis CART y con lo registrado en los muestreos, aportando además a la identificación de situaciones donde el crecimiento *in situ* podría explicar la abundancia observada, vs aquellas donde presumiblemente la floración se generó o mantuvo por aporte de organismos desde otros ecosistemas.

### 7.1 Caracterización climática

La variabilidad estacional con periodicidad anual encontrada en nuestro estudio coincide con los patrones característicos de temperatura (Guerrero et al., 1997), irradiancia (INUMET, 2018) y vientos (Acha et al.,

2008; Guerrero et al., 1997; Santoro et al., 2013) de esta zona, con mayores valores de temperatura, irradiancia en verano y velocidades máximas de viento en verano y primavera.. Por otro lado, las precipitaciones tuvieron un régimen intraestacional de semanal a mensual concordando con lo encontrado en la literatura (García-Rodríguez et al., 2014).

A escala local también se observaron diferencias entre las distintas playas estudiadas. Estas mostraron una variabilidad espacial y temporal en la temperatura y la salinidad durante los veranos estudiados. La costa de Montevideo se ubica en la zona del Río de la Plata de mayor variabilidad salina, afectando a las playas de acuerdo a la posición del frente (Acha et al., 2008; Framiñan y Brown, 1996; Nagy et al., 1997). Por ejemplo, las playas del oeste mostraron valores de salinidad ligeramente menores que las del este, exceptuando Verde y Miramar, ubicadas al Este del área de estudio. Las playas además de estar influenciadas por el frente de salinidad reciben aportes locales de tributarios como el arroyo Miguelete, en el caso de las playas Cerro, Nacional y Santa Catalina y el arroyo Carrasco en el caso de las playas Miramar, Carrasco y Verde que podrían estar aportando agua dulce disminuyendo su salinidad (Nagy et al., 2006).

## **7.2 Caracterización biológica: clorofila a, microcistina y abundancia de *M. aeruginosa***

La clorofila *a* alcanzó valores extremadamente altos en las playas de Montevideo por encima del nivel de riesgo alto de acuerdo al criterio de la OMS para uso recreacional (Chorus, 2012). Tanto en trabajos realizados en zonas cercanas a la costa uruguaya del Río de la Plata (Kruk et al., 2017, 2015) como en trabajos realizados en aguas abiertas (Acha et al., 2008; Calliari et al., 2009) si bien se han registrado valores puntuales de clorofila *a* que indican riesgo moderado estos nunca fueron tan altos como en la zona de playa, donde podrían estar ocurriendo procesos que concentran las floraciones. En trabajos realizados en zonas cercanas a la costa argentina del Río de la Plata se encontraron valores de clorofila *a* similares a los registrados en nuestro trabajo y que superan las recomendaciones de la OMS para baños (Tabla 1) (Feola et al., 2011b; Giannuzzi et al., 2012; Sathicq et al., 2015, 2014). Sathic et al., (2014) consideran la disponibilidad de nutrientes en el Río de la Plata como el factor que más incide en las altas concentraciones de clorofila *a*.

La microcistina también alcanzó valores extremadamente altos por encima del nivel de riesgo de la OMS para uso recreacional (Chorus, 2012), los cuales también fueron reportados por Pérez et al., (2013) coincidiendo con parte del período de nuestro estudio (2006-2009). Por otro lado Vidal et al., (2017) encontraron valores similares de clorofila *a* y microcistinas en estudios posteriores en el verano de 2015 en las playas Malvin y Carrasco durante una floración. En ambos casos si bien estos valores son extremadamente altos son habituales en las playas. Las causas podrían

incluir efectos de la forma de muestreo o procesos de acumulación en zonas de remanso. Las muestras son tomadas de espuma cianobacteriana donde se acumula biomasa y la microcistina se encuentra fuera de las células en altas concentraciones. En cuanto a los valores de microcistina registrados en zonas cercanas a la costa uruguaya, estos no son frecuentes e indican riesgo de bajo a moderado para la salud (De León y Yunes, 2001; Kruk et al., 2015), contribuyendo a la idea de que existe un efecto local en las playas, evidenciando un efecto de arrastre hacia la costa. En trabajos realizados en zonas cercanas a la costa argentina del Río de la Plata también se encontraron valores de microcistinas similares a los registrados en nuestro trabajo que superan las recomendaciones de la OMS para baños: 0,1 a 10,5  $\mu\text{g.l}^{-1}$  (Giannuzzi et al., 2012) y 0,20 a 78  $\mu\text{g.mg}^{-1}$  (Andrinolo et al., 2007). A modo general, podemos estimar que los altos valores de clorofila *a* y microcistina registrados en las playas podrían explicarse no solamente por un efecto de crecimiento local sino también por el transporte y acumulación en las playas (Pírez et al., 2013; Sienna y Ferrari, 2006).

Si bien se contaron con pocos datos de abundancia de células de *M. aeruginosa*, estos mostraron valores que indicaron riesgo alto de acuerdo con la clasificación de la OMS (Chorus, 2012). Nuestros resultados coincidieron con las abundancias registradas por Vidal et al. (2017) y con los trabajos de Andrinolo et al. (2007); Giannuzzi et al. (2012) y Sathicq et al. (2015, 2014) para la costa Argentina. Sin embargo, al igual que para la

clorofila *a* y microcistina no se registraron valores de riesgo en aguas abiertas del Río de la Plata (Calliari et al., 2005, 2009; Gómez et al., 2004).

Según nuestros resultados la microcistina y la clorofila *a* muestran una correlación positiva aunque moderada, coincidiendo con lo que encontraron Pérez et al., (2013), para muestras de floraciones dispersas en las playas. Sin embargo Ha et al., (2011) no encontraron una relación entre ellas en un estanque utilizado para pesca en Japón. En el caso de las muestras de las floraciones clasificadas como “espuma cianobacteriana” en las playas de Montevideo Pérez et al., (2013), plantean que la correlación de la microcistina con la abundancia de *M. aeruginosa* tiende a ser menor. A mayores abundancias de *M. aeruginosa*, en general la correlación no es buena ya que ocurre lisis de grandes cantidades de células liberando microcistinas, moléculas muy estables que se degradan muy lentamente (Chorus, 2012). Sumado a esto la concentración de microcistina depende de la fase del ciclo celular en la que se encuentre la floración (Zurawell et al., 2005) y puede variar entre diferentes cepas de la misma especie (Oliver y Ganf, 2000). La OMS recomienda realizar análisis cuantitativos de toxinas según los valores de biomasa encontrados en la muestra (Chorus, 2012). Para mejorar los resultados algunos países han comenzado a incorporar otros indicadores que puedan brindar información en tiempo real, como los pigmentos in vivo y la detección de los genes que codifican para la producción de cianotoxinas (Chorus, 2012; Kruk et al., 2015; Martínez de la Escalera et al., 2017). De acuerdo con Pérez. (2013) los indicadores

indirectos como conteo de células de cianobacterias y determinación de clorofila *a* pueden ser engañosos, ya que no todas las cepas de *M. aeruginosa* son tóxicas por lo que una floración no implicaría presencia de toxinas (Martinez de la Escalera et al., 2017). Sumado a esto la clorofila *a* es un indicador de concentración de fitoplancton total y no siempre se correlaciona positivamente con la presencia de toxinas (Chorus, 2012). Si bien el máximo valor de clorofila *a* coincidió con la mayor abundancia de *M. aeruginosa*, estas variables no estuvieron correlacionadas estadísticamente. La clorofila *a* es el indicador global de biomasa de fitoplancton más utilizado, pero no proporciona información sobre la composición o toxicidad de la comunidad e incluye además de las cianobacterias el resto de los organismos del fitoplancton (Chorus, 2012). Si bien los genotipos tóxicos crecen de manera óptima en agua dulce, también son capaces de tolerar las condiciones de alta salinidad y baja temperatura que se encuentran en estuarios y aguas marinas (Martínez de la Escalera et al., 2017). Actualmente varios países han incluido en su normativa la combinación de diferentes indicadores, por ejemplo, biovolumen, clorofila *a* o presencia de especies potencialmente tóxicas, conjuntamente con la presencia de genes que codifican para toxinas, para así determinar los distintos niveles de alerta, además de la utilización de otras cianotoxinas como anatoxina y saxitoxina (Chorus, 2012, Martinez de la escalera et al., 2017).

De acuerdo con nuestros resultados, el muestreo visual que realiza la IM para las categorías ausencia de floraciones y floraciones dispersas es efectivo dado que la correlación entre clorofila *a*, microcistina y abundancia de *M.aeruginosa* en concentraciones bajas es buena, sin embargo esto no sucede para las muestras clasificadas como espuma. En este caso sería recomendable comparar muestras de espuma y de agua entre sí para ver si efectivamente la relación entre clorofila *a* y microcistina mejora, pudiendo así ser utilizada como indicador de toxicidad en las playas de Montevideo.

### **7.3 Distribución espacial y temporal de las floraciones**

El patrón regional de floraciones en las playas de Montevideo está asociado a la posición del frente de salinidad, lo cual influye directamente en la salinidad y en las condiciones locales de cada playa además de su morfología, profundidad, energía y presencia de tributarios. En términos de distribución espacial de las floraciones, la playa Ramírez fue la más afectada por eventos de floraciones durante el período de estudio seguida por Pocitos y Cerro. Esto puede deberse a sus características morfológicas, siendo algunas muy someras, con baja energía y con bahías pronunciadas donde se puede dar un gran efecto de acumulación y arrastre (Sienra y Ferrari, 2006). La complejidad hidrográfica de esta permitiría el desarrollo de floraciones en las regiones protegidas de las playas (De León y Yunes, 2001; Kruk et al., 2017). Esto se ha visto en otros indicadores de calidad de

agua, como los coliformes que se acumulan en playas de grano fino (Dada y Hamilton, 2016), pudiendo inferirse un comportamiento similar para otros microorganismos como *M.aeruginosa*.

En cuanto a aspectos de variabilidad temporal, el verano del 2010 contó con la mayor cantidad de registros de floraciones (en 21 de las 24 playas muestreadas). Esto coincide con altos caudales de los ríos Paraná y Uruguay (Meis y Llano, 2018) y un ciclo de El Niño moderado (NOAA, 2018b). De forma similar las playas Ramírez, Cerro y Pocitos registraron eventos de floraciones persistentes que abarcaron desde enero a marzo de 2006 y 2010 en Ramírez y casi todo el mes de marzo de 2010 en las otras playas. Ese verano se registró el máximo caudal en la represa de Salto Grande y del Río Uruguay del período 2007-2011, altos caudales en el Río Paraná en el 2010 y en el Uruguay en el 2006 (Meis y Llano, 2018) además de la presencia de floraciones de *M. aeruginosa* en el embalse de Salto Grande (Bordeth et al., 2012; O'Farrell et al., 2012). Esto podría no solo representar un aporte de agua dulce hacia la costa de Montevideo sino un transporte de las floraciones desde el embalse, coincidiendo con lo encontrado por Pírez et al. (2013) durante la mitad del año 2009.

El verano sin floraciones, 2009, coincidió con bajos caudales en los Ríos Uruguay (Meis y Llano 2018; O'Farrell et al., 2012; Pírez et al., 2013) y Paraná (Meis y Llano 2018), con un ciclo de La Niña suave (NOAA, 2018b) y con máximos en las temperaturas medias, en las velocidades medias y máximas del viento en su mayoría del Este y del Sureste en Montevideo,

floraciones muy abundantes en el embalse de Salto Grande y caudales históricamente bajos en el embalse (Bordet, 2009; Bordet et al., 2012; Pérez et al., 2013). Estimamos que las condiciones de vientos fuertes del Sur y podrían estar causando un efecto de disgregación de las floraciones a nivel local y un ingreso de agua marina al Río de la Plata (Blottière et al., 2014; Harke et al., 2016; Sienna y Ferrari, 2006) y por otro lado los bajos caudales del embalse y de los Ríos Uruguay y Paraná minimizarían el transporte de organismos coincidiendo con los resultados de Sienna y Ferrari, (2006). Durante todo el verano 2006 en la playa Ramírez se registraron floraciones coincidiendo con caudales muy bajos del Río Uruguay y Paraná (Meis y Llano, 2018). Podemos estimar que estas floraciones podrían ser de origen local. Además hubo un evento de lluvia intenso que puede haber transportado las floraciones y bajar la salinidad local a valores de 15 o menores.

De acuerdo con nuestros resultados podemos estimar que las floraciones de *M. aeruginosa* que aparecen en las playas de Montevideo podrían ser mixtas, es decir en algunos casos originadas *in situ* y en otros casos transportadas desde otros cursos de agua que descargan directo al Río de la Plata entre Colonia y Montevideo (como el Río Santa Lucía, Arroyo Cufre o el Arroyo Sauce), así como desde embalses del Río Negro, Uruguay y Paraná. El inóculo se generaría a partir de floraciones en los embalses y se transportaría río abajo hasta el estuario y playas, donde en caso de encontrar condiciones adecuadas se establecerían y

desarrollarían. De acuerdo con Kruk et al., (2017) el embalse Salto Grande caracterizado por una alta diversidad podría actuar como una fuente para una mayor diversidad de formas de *M. aeruginosa*, tanto desde el punto de vista taxonómico como morfológico mientras que las variables ambientales como la salinidad a lo largo del gradiente actuarían como filtros seleccionando poblaciones más tóxicas.

#### **7.4 Condiciones que favorecen la ocurrencia de floraciones**

De acuerdo con Giannuzzi et al. (2012) quienes realizaron su trabajo entre los años 2004 y 2007 en la costa argentina del Río de la Plata las variables más importantes a la hora de describir las variaciones espaciales y temporales de las floraciones fueron la temperatura y la concentración de fósforo. De acuerdo con estos autores la proliferación de *M. aeruginosa* coincidió con temperaturas mayores a 25°C y fósforo total mayor a 1,24 mg.L<sup>-1</sup>. Este trabajo sugiere la concentración de fósforo total como variable asociada estadísticamente a la presencia de floraciones y reporta temperaturas mayores a las registradas en nuestro trabajo. En el trabajo de Sathicq et al. (2014) encontraron que durante los años 2004 y 2007 las variables principalmente asociadas estadísticamente a la distribución temporal de las cianobacterias en la costa argentina fueron la temperatura, pH, penetración de luz, conductividad y nutrientes, mientras que el viento y la marea tuvieron un rol secundario. Por otro lado Andrinolo et al., (2007)

estudiaron la abundancia y toxicidad de *M.aeruginosa* entre el verano 2003 y el 2006 en la costa argentina. Las condiciones en la que ocurrieron las floraciones coincidieron con temperaturas de 29 y 32 °C, conductividades de 678 y 345  $\mu\text{Scm}$  (0,4 y 0,2 de salinidad) y pH de 7,2 y 7,6. Nuevamente los autores incluyen pH y encuentran temperaturas más altas.

De acuerdo con nuestro CART las variables más importantes en explicar la presencia de floraciones fueron en primer lugar la temperatura del aire promedio de los 3 días anteriores al muestreo (mayor a 19,3°C) y en segundo lugar la salinidad (menor a 4,2). Las bajas salinidades son importantes porque *M. aeruginosa* es un organismos de agua dulce por lo que la salinidad le produce estrés osmótico (Tonk, 2007), haciendo que disminuya su tasa de crecimiento (Sobrino et al., 2004). Altas temperaturas favorecen su crecimiento (Kruk et al., 2017; Reynolds et al., 1981; Reynolds, 2006). Además es importante como estimulador de la fotosíntesis (Kappers, 1984) ya que la temperatura está relacionada positivamente con la irradiancia. Ambas variables combinadas en los rangos mencionados proporcionan un escenario óptimo para el crecimiento de *M. aeruginosa* y la formación de floraciones. Estos resultados también concuerdan en el rango con las condiciones en las que se han encontrado floraciones en Montevideo con salinidades menores a 5 (Sienra y Ferrari, 2006), en la costas del Río de la Plata en Argentina (Andrinolo et al., 2007; Sathicq et al., 2015) y en aguas abiertas en Uruguay donde se encontraron temperaturas del aire de entre 11 y 34°C (Kruk et al., 2017).

Existió una correlación positiva entre la abundancia y la temperatura del aire. También se dieron correlaciones positivas entre abundancia, irradiancia y velocidad del viento. Sin embargo estas variables fueron las menos importantes para la construcción del árbol, esto puede estar indicando que serían importantes para el crecimiento de las floraciones una vez que ya están establecidas pero no para su aparición. En el caso del viento podría estar influyendo la dirección, no la velocidad, y las precipitaciones locales no fueron importantes sino el caudal del Uruguay y el Paraná por lo que estas variables no se verían reflejadas en el CART.

El CART tuvo una muy buena performance. Tuvo solo un 3,6% de falsos positivos en el grupo de presencias, con 20% y 16,3% falsos negativos en los grupos de ausencias. Por lo que sería muy efectivo para poder prever ocurrencia de floraciones utilizando la temperatura combinada con la salinidad, con un 95% de aciertos, y con foco en la disminución del riesgo para la salud, invirtiendo en disminuir los falsos negativos. El grupo de presencia de floraciones, tuvo mayores temperaturas del aire e irradiancias. El índice de importancia de variables utilizadas por el CART que sitúa a la salinidad y la temperatura del agua como las variables más importantes respectivamente a la hora de construir el árbol no coincidió con las variables que finalmente fueron utilizadas en el árbol ya que el set de datos de temperatura del agua y salinidad estaba incompleto por falta de información disponible. Sin embargo, el algoritmo del CART está diseñado para construir un árbol que clasifique incluso si éste tiene algunos valores

y variables faltantes (Breiman et al., 1984). Debido a esto el árbol se dividió usando la tercer variable más importante: temperatura promedio de los 3 días anteriores al muestreo y luego la salinidad. Esto denota la importancia de tener series temporales completas para este tipo de análisis que podrían arrojar resultados aún más robustos. Este tipo de árbol de decisión provee información rápida, fácil de interpretar y útil para la predicción de la ocurrencia de las floraciones, identificando valores umbrales en las variables ambientales y permitiendo así tomar las medidas de gestión adecuadas por parte de las autoridades. Además el árbol tiene la capacidad de aprender, mejorar su desempeño si se continúa perfeccionando con nueva información que surge de la continuidad de los monitoreos.

### **7.5 Modelación del crecimiento de *M. aeruginosa* en función de las variables ambientales**

Las respuestas iniciales de las tasas de crecimiento para los tres gradientes seleccionados en general fueron como se esperaban: tasas máximas a salinidades bajas, temperaturas altas e irradiancias medias, siendo esta última la variable que menos afecta su crecimiento. Con irradiancia de  $110 \pm 20 \mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $23,9 \pm 4,3 \text{ Wm}^{-2}$ ) durante el período de luz de 12 horas y temperatura de 23°C la tasa de crecimiento basado en los experimentos de Tonk (2007) varió entre 0 y  $0,4 \text{ día}^{-1}$ . Si se pudiera combinar los resultados de Tonk (2007) con resultados de otros

autores como Verspagen et al. (2006) y Robson y Hamilton (2003) se encontrarían tasas mayores, pero estos autores utilizaron diferentes métodos de conteo: clorofila *a* por fluorescencia y conteo con microscopio óptico respectivamente por lo que sus resultados no son comparables. A pesar de utilizar solamente los datos de Tonk (2007) el patrón coincide con lo que encontraron otros autores (Black et al., 2011; Robson y Hamilton, 2003; Verspagen et al., 2006). *M. aeruginosa* crece con su tasa máxima hasta una salinidad de 10, a partir de la cual la tasa comienza a caer llegando a 0 a salinidades de 16, este patrón coincide con los resultados de Black et al., (2011) y Robson y Hamilton, (2004) aunque para salinidades mayores ya que estos autores plantean que *M. aeruginosa* puede crecer hasta salinidades de 25, 20 y 25,7.

En relación con la temperatura y de acuerdo a nuestros resultados *M. aeruginosa* crece de manera exponencial llegando al máximo valor de  $1,3 \text{ día}^{-1}$  a  $35^{\circ}\text{C}$ , superando la tasa máxima calculada de 0,41. Estos resultados coinciden con Verspagen et al. (2006) quienes también describieron un crecimiento exponencial. Si dispusiéramos de datos a temperaturas mayores probablemente se podría observar el decaimiento de la tasa. Este es el caso de Nalewajko y Murphy (2001) encontraron que *M. aeruginosa* crecía hasta los  $32^{\circ}\text{C}$  con una tasa de  $1,6 \text{ día}^{-1}$  comenzado a disminuir a temperaturas mayores. Krüger y Eloff (1978) encontraron que la tasa máxima fue de  $3 \text{ día}^{-1}$  a  $32^{\circ}\text{C}$  mientras que el límite de crecimiento fue de  $40^{\circ}\text{C}$  donde la tasa se volvió 0.

Finalmente, según nuestra parametrización la tasa de crecimiento aumenta de forma casi lineal con la irradiancia. A partir de  $27 \text{ Wm}^{-2}$ , la tasa permanece constante en  $0,41 \text{ día}^{-1}$ . Zevenboom y Mur (1984) encontraron un comportamiento similar en la tasa de crecimiento que llega a su valor máximo a los  $20 \text{ Wm}^{-2}$  mientras que Nicklisch y Kohl (1983) encontraron su crecimiento óptimo a  $24 \text{ Wm}^{-2}$ . En nuestros resultados vemos que *M. aeruginosa* como era de esperar no muestra fotoinhibición.

A partir de las respuestas de las tasas de crecimiento a los tres principales gradientes ambientales se logró construir un modelo mecanicista que describió el crecimiento de *M. aeruginosa* con una tasa máxima de  $0,17 \text{ día}^{-1}$  en condiciones óptimas encontradas en los muestreos: sal 0,1, temperatura  $30^\circ\text{C}$  e irradiancia  $370 \text{ Wm}^{-2}$ . Esta tasa es menor a la máxima teórica calculada de  $0,41 \text{ día}^{-1}$  para un rango de irradiancia de 3 a  $300 \text{ Wm}^{-2}$  y temperatura de  $22^\circ\text{C}$  y salinidad de 0 y a las tasas encontradas por otros autores para esta especie:  $0,26$  a  $1,2 \text{ día}^{-1}$  para experimentos realizados midiendo colonias en condiciones de  $40 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $8,7 \text{ Wm}^{-2}$ ) y fotoperíodo de 16/8 luz/oscuridad, pH 8,3 y temperaturas de 15, 20, 25 y  $30^\circ\text{C}$  (Coles y Jones, 2000); salinidades de 5,6; 11; 16,6; y 26,4; fotoperíodo de 16 horas de luz,  $20^\circ\text{C}$  y  $170 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $36,9 \text{ Wm}^{-2}$ ) (Robson y Hamilton, 2003) y  $12,6 \mu\text{E.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $2,7 \text{ Wm}^{-2}$ ) de iluminación continua y  $23^\circ\text{C}$  (Reynolds et al., 1981) y tasas de  $2,2$  a  $3 \text{ día}^{-1}$  en experimentos donde se contaron células en condiciones de  $10 \mu\text{E.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $2,2 \text{ Wm}^{-2}$ ) y  $28^\circ\text{C}$  (Krüger y Eloff, 1978) y  $200 \mu\text{E.m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $43,5 \text{ Wm}^{-2}$ ),  $16^\circ\text{C}$

a 36°C (van der Westhuizen y Eloff, 1985). Esta diferencia puede darse en primer lugar por las distintas condiciones a las cuáles se hicieron los experimentos, la adaptación de los organismos al medio experimental, los tamaños de los mismo y por último a las técnicas utilizadas por los diferentes autores para medir la tasa de crecimiento (Robson y Hamilton 2003). Por ejemplo, si las estimaciones hacen para células individuales o colonias, siendo esta última menor (Reynolds 1981).

Nuestros modelos se basaron en tres variables: salinidad y temperatura en el caso del CART y además irradiancia para el modelo mecanicista. Modelos similares han sido utilizadas exitosamente para predecir floraciones de *M. aeruginosa* a partir de temperatura y salinidad (Paerl, 1996; Recknagel et al., 1997; Robson y Hamilton, 2004). Otros autores también utilizaron modelos mecanicistas para describir eutrofización utilizando tasas de crecimiento de fitoplancton en zonas estuarinas (Baird et al., 2003) y modelos donde se incluyeron luz, temperatura y salinidad para describir la tasa de crecimiento de *M. aeruginosa* en un estuario (Verspagen et al., 2006). Utilizando un algoritmo de Random Forests (método similar al CART) y con un set de datos independiente Segura et al., (2017) encontraron que las floraciones en el Río de la Plata ocurren típicamente a temperaturas mayores a 20°C y salinidades menores a 5 coincidiendo con nuestros resultados del CART.

Una de las más importantes aplicaciones de los modelos de predicción es en la gestión de los usos de los ecosistemas. Un ejemplo de

la aplicación es el sistema de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de EEUU, quienes tienen un sistema operacional de pronóstico para floraciones de algas tóxicas en línea (<https://tidesandcurrents.noaa.gov/>). Este sistema combina imágenes satelitales, información, observaciones *in situ*, modelos hidrodinámicos y atmosféricos y modelos biológicos para realizar pronósticos y medidas de manejo (NOAA, 2018). Nuestro CART se podría complementar con este tipo de información para obtener un sistema de predicción de aparición de floraciones más completo y a la vez evaluar las condiciones de las playas a la hora de tomar una decisión por parte de las autoridades.

De acuerdo con el modelo mecanicista, la salinidad tiene más influencia sobre la tasa de crecimiento, que la temperatura y la irradiancia. Los valores umbrales de salinidad y temperatura obtenidos por el CART para presencia de floraciones fueron utilizados para estimar la tasa de crecimiento predicha por el modelo, resultando en tasas de  $0,05 \text{ día}^{-1}$  y  $0,17 \text{ día}^{-1}$ , coincidiendo estos valores con los calculados utilizando el modelo mecanicista.

## **8. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS**

Con este trabajo se contribuyó a la recopilación y sistematización de información ambiental correspondiente a 9 veranos en 24 playas de

Montevideo que habilita diversos análisis de interés, en particular en relación a la presencia de floraciones de *M.aeruginosa*.

Se analizó de manera novedosa información ambiental de las playas de Montevideo. Se desarrolló un modelo predictivo con información fácil de obtener e interpretar para la predicción de la ocurrencia de floraciones. Además se desarrolló un modelo mecanicista de crecimiento de *M. aeruginosa*, también basado en información de fácil acceso e interpretación. Estas son herramientas útiles para el monitoreo de las floraciones especialmente en temporada estival. Por ej., utilizando el promedio de la temperatura de los 3 días anteriores y la salinidad se pueden tomar medidas de gestión adecuadas por parte de las autoridades como poner la bandera de alerta o cerrar las playas. Además pueden ser complementadas con herramientas moleculares para detección de genes que codifican para cianotoxinas (Bonilla et al., 2015; Martínez de la Escalera et al., 2017).

Las variables que más influyeron en la presencia y crecimiento de las floraciones de *M. aeruginosa* fueron la temperatura del aire y la salinidad. Las precipitaciones *in situ* no influyeron en el crecimiento de *M. aeruginosa*. Se estima que podrían estar influyendo las precipitaciones en la zona de Salto Grande. La irradiancia no tuvo mayor influencia en el desarrollo de las floraciones ya que está directamente asociada a la temperatura. La salinidad fue la variable que más influyó en la tasa de crecimiento.

Este trabajo representa además, un avance hacia la identificación de los mecanismos asociados al establecimiento de las floraciones en las playas de Montevideo. Se infiere que las floraciones encontradas en las playas del Montevideo pueden provenir desde sitios alejados como embalses en los ríos tributarios, como los ríos Río Negro, Uruguay y Paraná; una vez en el estuario se desarrollan si encuentran condiciones ambientales adecuadas y son eventualmente acumuladas en las playas por el viento; sin embargo el modelo de crecimiento mostraría un componente de crecimiento local que no se debería despreciar.

Por otro lado encontramos que las floraciones responden a dos escalas de variación espacial: una local que responde a la heterogeneidad de las playas en cuanto a su morfología, que tan expuestas o protegidas se encuentran, la presencia de tributarios, la influencia del frente de salinidad, la temperatura y salinidad así como la influencia de la dirección del viento que permite o no que se establezcan de manera diferencial las floraciones. A mayor escala espacial a nivel del estuario se encuentran las variaciones de las precipitaciones y temperaturas en esa zona, los caudales de los Ríos Uruguay y Paraná, de Salto Grande y la dirección del viento.

Se plantean una serie de perspectivas generadas a partir de este trabajo:

- Mejorar la base de datos, incluyendo nuevas variables, construyendo matrices con datos diarios de variables ambientales y meteorológicas, especialmente temperatura del agua y salinidad

para mejorar las predicciones de los modelos de manera que estos puedan arrojar resultados aún más robustos.

- Por otra parte, en el caso del muestreo realizado por la IM, a la hora de medir variables biológicas, se plantea comparar muestras de espuma entre sí y de floraciones dispersas entre sí para evaluar la correlación entre clorofila *a* y microcistina en las playas de Montevideo.
- Utilizar los resultados generados para complementar el sistema en línea de la IM (<http://www.montevideo.gub.uy/playas>).
- Mejorar el modelo de CART desarrollado a partir de nuevos datos generados por el monitoreo de rutina de la IM.
- En el modelo mecanicista se podría incluir resultados de otros autores para obtener un espectro mayor de las tasas de crecimiento como generar resultados propios mediante cultivos así como agregar más variables a la función generada.

## 9. Referencias Bibliográficas

- Acha, E.M., Macchi, G.J., 2000. Spawning of Brazilian menhaden, *Brevoortia aurea*, en the Río de la Plata estuary off Argentina and Uruguay. *Fishery Bulletin (NOAA)* 98 (2), 227–235.
- Acha, E., Mianzan, H., Guerrero, R., Carreto, J., Giberto, D., Montoya, N., y Carignan, M. (2008). An overview of physical and ecological processes in the Rio de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*, 28: 1579– 1588.

- Acha, E., Mianzan, H., Lasta, C., Guerero, R. (1999). Estuarine spawning of the witemouth croaker *Micropogonias furnieri* (Pisces: Sciaenidae), in the Río de la Plata, Argentina. *Marine and Freshwater Research*, 50: 57–65.
- Andrinolo, D., Pereira, P., Giannuzzi, L., Aura, C., Massera, S., Caneo, M. y Echenique, R. (2007). Occurrence of *Microcystis aeruginosa* and microcystins in Río de la Plata river (Argentina). *Acta Toxicológica Argentina*, 15: 8–14.
- APHA-AWWA-WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Ed. (21<sup>ra</sup> ed). Washington, DC.
- Atkins, R., Rose, T., Robb, R., y Brown, M. (2001). The *Microcystis* cyanobacteria bloom in the Swan River – February 2000. *Water Science and Technology*, 43: 107–114.
- Azevedo, S., Carmichael, W., Jochimsen, E., Rinehart, K., Lau, S., Shaw, G., y Eaglesham, G. (2002). Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru/Brazil. *Toxicology*, 181: 441–446.
- Baird, M., Walker, S., Wallace, C., Webster, I., y Parslow, J. (2003). The use of mechanistic descriptions of algal growth and zooplankton grazing in an estuarine eutrophication model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 685–695.
- Black, K., Yilmaz, M., y Philips, E. (2011). Growth and Toxin Production by *Microcystis Aeruginosa* PCC 7806 (Kutzing) Lemmerman at Elevated Salt Concentrations. *Journal of Environmental Protection*, 2: 669–674.
- Blottière, L., Rossi, M., Madricardo, F., y Hulot, F. (2014). Modeling the role of wind and warming on *Microcystis aeruginosa* blooms in shallow lakes with different trophic status. *Theoretical Ecology*, 7: 35–52.
- Bonilla, S. (2009). *Cianobacterias planctónicas del Uruguay. Manual para la identificación y medidas de gestión*. (S. Bonilla, Ed.). Montevideo, Uruguay: Documento Técnico PHI-LAC N°16.
- Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal y L., Aubriot, L. (2015). Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. *INNOTEC 2015*, 10: 9–22.
- Bordet, F. (2009). *Monitoreo Emergencia de Floración de Cianofíceas: Áreas Recreativas-Embalse de Salto grande*. Informe. Período 2007-

2009. Salto Grande. Uruguay.

- Bordet, F., Lopéz, C., y Panozzo Zénere, V. (2012). Monitoreo emergencia de floración de cianobacterias: áreas recreativas Salto Grande. En: *Gerencia de Ingeniería y Planeamiento. Programas ambientales de Salto Grande. 2da edición. Publicación de trabajos.* (p 11–27).
- Box, J. D. (1981). Enumeration of cell concentrations in suspensions of colonial freshwater microalgae, with particular reference to *Microcystis aeruginosa*. *British Phycological Journal*, 16: 153–164.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45: 5–32.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., y Stone, C. (1984). *Classification and Regression Trees*. Belmont, California: Wadsworth International.
- Brena, B., Díaz, L., Sienra, D., Ferrari, G., Ferraz, N., Hellman, U. y Last, J. (2006). ITREOH building of regional capacity to monitor recreational water: Development of a non-commercial microcystin ELISA and its impact on public health policy. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 12: 377–385.
- Calliari, D., Gómez, M., y Gómez, N. (2005). Biomass and composition of the phytoplankton in the Río de la Plata: large-scale distribution and relationship with environmental variables during a spring cruise. *Continental Shelf Research*, 25: 197–210.
- Calliari, E., Brugnoli, E., Ferrari, G., y Vizziano, D. (2009). Phytoplankton distribution and production along a wide environmental gradient in the South-West Atlantic off Uruguay. *Hydrobiologia*, 620: 47–61.
- CARP. (1990). *Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata. Informe de Avance 1989* (Vol. 2). Montevideo.
- Chorus, I. (2012). *Current approaches to Cyanotoxin risk assessment, risk management and regulations in different countries*. Dessau-Roßlau: Federal Environment Agency (Umweltbundesamt), 1862-4804.
- Chu, Z., Jin, X., y Inamori, Y. (2007). The effect of temperature on growth characteristics and competitions of *Microcystis aeruginosa* and *Oscillatoria mougeotii* in a shallow, eutrophic lake simulator system. *Hydrobiologia*: 581, 217–223.
- Coles, J.F., y Jones, R. (2000). Effect of temperature on photosynthesis-light response and growth of four phytoplankton species isolated from a tidal freshwater river. *Journal of Phycology*, 36: 7–16.

- Crisci, C., Ghattas, B., Perera, G. (2012). A review of supervised machine learning algorithms and their applications to ecological data. *Ecological Modelling*. 240, 113-122.
- Crisci, C., Terra R., Pacheco, J.P., Ghattas, B., Bidegain, M., Goyenola, G., Lagomarsino, J.J., Méndez, G., Mazzeo, M. (2017). Multi-model approach to predict phytoplankton biomass and composition dynamics in a eutrophic shallow lake. *Ecological Modelling*: 360, 80-93.
- Dada, A., y Hamilton, D. (2016). Predictive Models for Determination of *E. coli* Concentrations at Inland Recreational Beaches. *Water Air and Soil Pollution*, 224- 347.
- De León, L. (2012). *Monitoreo de Playas 2011-2012*. Montevideo.
- De León, L., y Yunes, J. (2001). First report of a *Microcystis aeruginosa* toxic bloom in La Plata River. *Environmental Toxicology and Water Quality*, 16: 110–112.
- Díaz Sepulveda, J. (2011). Revisión de los árboles de clasificación y regresión (CART). *Revista Pensamiento Americano*, 4(7): 75–80.
- Elliott, J., Thackeray, S., Huntingford, C., y Jones, R. (2005). Combining a Regional Climate Model with a phytoplankton community model to predict future changes in phytoplankton in lakes. *Freshwater Biology*, 46: 1291–1297.
- Engstrom, D.R., Schottler, S. P., Leavitt, P.R., y Havens, K.E. (2006). A re-evaluation of the cultural eutrophication of Lake Okeechobee using multiproxy sediment record. *Ecological Applications*, 16: 1194–1206.
- Falconer, I. (1996). Potential impact on human health of toxic cyanobacteria. *Phycologia*, 35 (6): 6–11.
- Fennel, W., y Neuman, T. (2004). *Introduction to the modelling of Marine Ecosystems*. (D. Halpern, Ed.), *Elsevier Oceanography Series 72*. Amsterdam.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., 2008. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2007-2008. Montevideo.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., 2007. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2006-2007. Montevideo.

- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., 2006. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2005-2006. Montevideo.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., Echezarreta, M., 2014. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2013-2014. Montevideo.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., Echezarreta, M., D'Alessandro, B., 2013. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2012-2013. Montevideo.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., Echezarreta, M., Saona, G., Rodríguez, A., 2012. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2011-2012. Montevideo.
- Feola, G., Brena, B., Cacho, C., Rodríguez, A., Sienna, D., Saona, G., Espinola, J., D'Alessandro, B., Espinosa, N. 2011(b) Estudio de la calidad de agua, sedimento y biota del Río de la Plata. Evaluación de línea de base. Informe Técnico. Montevideo.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., Echezarreta, M., Saona, G., Rodríguez, A., 2011. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2010-2011.
- Feola, G., Brena, B., Risso, J., Sienna, D., Saona, G., Echezarreta, M., 2010. Programa de Monitoreo de Agua de Playas y Costa de Montevideo. Informe Técnico: Playas. Informe temporada estival: 2009-2010. Montevideo.
- Ferrari, G., y Vidal, L. (2006). Fitoplancton de la zona costera uruguaya: Río de la Plata y océano atlántico. En: R. Menafra, L. Rodríguez-Gallego, F. Scarabino, y D. Conde (Eds.), *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya* (45–56 p). Vida Silvestre: Montevideo.
- Fossati, M., y Piedra-Cueva, I. (2008). Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 32: 1066–1086.
- Framiñan, M. B., y Brown, O. B. (1996). Study of the Río de la Plata turbidity front, Part 1: spatial and temporal distribution. *Continental Shelf Research*, 16(10): 1259–1282.

- García-Rodríguez, F., Brugnoli, E., Muniz, P., Venturini, N., Burone, L., Hutton, M. y Verocai, L. (2014). Warm-phase ENSO events modulate the continental freshwater input and the trophic state of sediments in a large South American estuary. *Marine and Freshwater Research*, 65: 1–11.
- Giannuzzi, L., Carvajal, G., Corradini, M., Araujo Andrade, C., Echenique, R., y Andrinolo, D. (2012). Occurrence of *Microcystis aeruginosa* and microcystins in Río De La Plata River (Argentina). *Journal of Toxicology*, 9: 1–15.
- Giannuzzi, L., Sedan, D., Echenique, R., y Andrinolo, D. (2011). An Acute Case of Intoxication with Cyanobacteria and Cyanotoxins in Recreational Water in Salto Grande Dam, Argentina. *Marine Drugs*, 9: 2164–2175.
- Gómez, N., Hualde, P., Licursi, M., y Bauer, D. (2004). Spring phytoplankton of Río de la Plata: a temperate estuary of South America. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61: 301–309.
- González-Piana, M., Fabián, D., Piccardo, A., y Chalar, G. (2017). Dynamics of Total Microcystin LR Concentration in Three Subtropical Hydroelectric Generation Reservoirs in Uruguay, South America. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 99: 488–492.
- Guerrero, R., Acha, E., Framiñan, M., y Lasta, C. (1997). Physical oceanography of the Río de la Plata estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*: 17, 727–742.
- Ha, J., Hidaka, T., y Tsuno, H. (2011). Analysis of factors affecting the ratio of microcystin to chlorophyll-a in cyanobacterial blooms using real-time polymerase chain reaction. *Environmental Toxicology*, 26: 21–28.
- Harke, M., Steffen, M., Gobler, C., Otten, T., Wilhelm, S., Woodf, S., y Paerl, H. (2016). A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. *Harmful Algae*, 54: 4–20.
- Howard, A. (2001). Modeling movement patterns of the cyanobacterium, *Microcystis*. *Ecological Applications*, 11: 304-310.
- Huret, M., Dadou, I., Dumas, F., Lazure, P., y Garçon, V. (2005). Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume. *Continental Shelf Research*, 25(5–6): 629–653.
- Instituto Nacional de Meteorología (INUMET) (2018)

<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas>

- Itayama, T., Koide, A., Yasukawa, T., Shiku, H., Matsue, T., y Inamori, Y. (2005). Study on a Water Environmental Problem From a Viewpoint of a Nonlinear Complex System. En: *International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications* (142–145 p). Brujas.
- Jacoby, J., Collier, D., Welch, E., Hardy, F., y Crayton, M. (2000). Environmental factors associated with a toxic bloom of *Microcystis aeruginosa*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57: 231–240.
- Kalff, J. (2002). *Limnology*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Kappers, F. (1984). On the population dynamics of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. Ph.D. Thesis, Amsterdam University. Daecor (Ed.).
- Koné, V., Machu, E., Penven, P., Andersen, V., Garçon, V., Fréon, P. y Demarcq, H. (2005). Modeling the primary and secondary productions of the southern Benguela upwelling system: A comparative study through two biogeochemical models. *Global Biogeochemical Cycles*, 19: GB4021.
- Krüger, G., y Eloff, J. (1978). The effect of temperature on specific growth rate and activation energy of *Microcystis* and *Synechococcus* isolates relevant to the onset of natural blooms. *Journal of the Limnological Society of Southern Africa*, 4(1): 9–20.
- Kruk, C., Devercelli, M., Huszar, V., Hernandez, H., Beamud, G., Diaz, M. y Segura, A. (2017). Classification of Reynolds phytoplankton functional groups using individual traits and machine learning techniques. *Freshwater Biology*, 62: 1681–1692.
- Kruk, C., Huszar, V., Peeters, E., Bonilla, S., Costa, L., Lüring, M. y Scheffer, M. (2010). A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. *Freshwater Biology*, 55: 614–627.
- Kruk, C., Martínez, A., Nogueira, L., Alonso, C., y Calliari, D. (2014). Morphological traits variability reflects light limitation of phytoplankton production in a highly productive subtropical estuary (Río de la Plata, South America). *Marine Biology*, 162: 331–341.
- Kruk, C. y Segura, A. (2012). The habitat template of phytoplankton morphology-based functional groups. *Hydrobiologia*, 698: 191–202.

- Kruk, C., Segura, A., Nogueira, L., Alcántara, I., Calliari, D., Martínez de la Escalera, G., Carballo, C. y Piccini, C. (2017). A multilevel trait-based approach to the ecological performance of *Microcystis aeruginosa* complex from headwaters to the ocean. *Harmful Algae*, 70: 23–36.
- Kruk, C., Segura, A., Nogueira, L., Carballo, C., Martínez de la Escalera, G., Calliari, D. y Piccini, C. (2015). Herramientas para el monitoreo y sistema de alerta de floraciones de cianobacterias nocivas: Río Uruguay y Río de la Plata. *INNOTEC 2015*, 10: 23–39.
- Kumar, S., Spaulding, S., Stohlgren, T., Hermann, K., Schmidt, T., y Bahls, L. (2009). Potential habitat distribution for the freshwater diatom *Didymosphenia geminata* in the continental US. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7: 415–420.
- Kurucz, A., Masello, A., Méndez, S., Cranston, R y Wellas, P. Calidad ambiental del Río de la Plata. En: Wells, P., Daborn, G., eds. El Río de la Plata. Una revisión ambiental. Un informe de antecedentes del Proyecto EcoPlata. Nova Scotia: Dalhousie University Halifax; 1998.p. 71–86.
- Lewis, R. (2000). *An Introduction to Classification and Regression Tree (CART) Analysis*. Paper Presented at Annual Meeting of the Society for Academic Emergency Medicine in San Francisco, California.
- May, C., Koseff, J., Lucas, L., Cloern, J. y Schoellhamer, D. (2003). Effects of spatial and temporal variability of turbidity. *Marine Ecology Progress Series*, 254:111-128.
- Martínez de la Escalera, G., Kruk, C., Segura, A., Nogueira, L., Alcántara, I. y Piccini, C. (2017). Dynamics of toxic genotypes of *Microcystis aeruginosa* complex (MAC) through a wide freshwater to marine environmental gradient. *Harmful Algae*, 62: 73–83.
- Mazur-Marzec, H., Browarczyk-Matusiak, G., Forycka, K., Kobos, J., y Pliński, M. (2010). Morphological, genetic, chemical and ecophysiological characterisation of two *Microcystis aeruginosa* isolates from the Vistula Lagoon, southern Baltic. *Oceanologia*, 52: 127–146.
- Meis, M y Llano, M. (2018). Hydrostatistical study of the Paraná and Uruguay Rivers. *International Journal of River Basin Management*, 1814-2060.
- Mendez, S., Gómez, M., y Ferrari, G. (1997). Estudios planctónicos del Río

de la Plata y su frente oceánico. Un informe de antecedentes del proyecto EcoPlata. En: P. G. Wells y G. R. Daborn (Eds.), *El Río de la Plata una revisión Ambiental* (87–116 p). Montevideo: EcoPlata.

Muniz, P., Danulat, E., Yannicelli, B., García-Alonso, J., Medina, G., y Bícego, M. (2004). Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in sediments of Montevideo Harbour (Uruguay). *Environment International*, 29: 1019–1028.

Muniz, P., Venturini, N., y Gómez-Erache, M. (2011). Spatial distribution of chromium and lead in the benthic environment of coastal areas of the Río de la Plata estuary (Montevideo, Uruguay). *Brazilian Journal of Biology*, 64: 103–116.

Muniz, P., Venturini, N., Hutton, M., Kandratavicius, N., Pita, A., Brugnoli, E. y García-Rodríguez, F. (2011). Ecosystem health of Montevideo coastal zone: A multi approach using some different benthic indicators to improve a ten-year-ago assessment. *Journal of Sea Research*, 65: 38–50.

Nagy, G., Bidegain, M., Caffera, R., Blixen, F., Ferrari, G., Lagomarsino, J. y Sención, G. (2006). *Assessing vulnerability to climate variability and change in estuarine waters and coastal fisheries of the Rio de la Plata* (AIACC Working Paper N° 22).

Nagy, G. (2002). Distribution patterns of nutrients and symptoms of eutrophication in the Rio de la Plata River Estuary System. *Area*, 125–139.

Nagy, G., Martínez, C., Caffera, M., Pedrosa, G., Forbes, E., Perdomo A. (1997). The hydrological and climatic setting of the Río de la Plata: Wells, P., Daborn, G., (Eds). 2:17-68. Cap. 2. En: *The Rio de la Plata, an environmental overview. An EcoPlata project background report*. Halifax, Nova Scotia: Dalhousie University.

Nagy, G., Gómez-Erache, M., López, C. H., y Perdomo, A. (2002). Distribution patterns of nutrients and symptoms of eutrophication in the Rio de la Plata River Estuary System. *Hydrobiologia*, 475/476: 125–139.

Nalewajko, C., y Murphy, T. (2001). Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach. *Limnology*, 2: 45–48.

- National Oceanic and Atmospheric administration (NOAA). (2018). <https://tidesandcurrents.noaa.gov/>.
- National Oceanic and Atmospheric administration (NOAA). National Weather Service. Climate Prediction Center. (2018b). [http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Nicklisch, A., y Kohl, J. (1983). Growth kinetics of *Microcystis aeruginosa* (KUTZ) KUTZ as a basis for modelling its population dynamics. *International Review of Hydrobiology*, 68: 317–326.
- O'Farrell, I., Bordet, F., y Griselda, C. (2012). Bloom forming cyanobacterial complexes co-occurring in a subtropical large reservoir: validation of dominant ecostrategies. *Hydrobiologia*, 698: 175–190.
- Oliver, R., y Ganf, G. (2000). Freshwater blooms. En: M. Whiton y M. Potts (Eds.), *The Ecology of Cyanobacteria*. Dordrecht. (49–194p).
- Orr, P., Jones, G., y Douglas, G. (2004). Response of cultured *Microcystis aeruginosa* from the Swan River, Australia, to elevated salt concentration and consequences for bloom and toxin management in estuaries. *Marine and Freshwater Research*, 55: 277–283.
- Otsuka, S., Suda, S., Li, R., Watanabe, M., Oyaizu, H., Matsumoto, S., y Watanabe, M. (1999). Characterization of morphospecies and strains of the genus *Microcystis* (Cyanobacteria) for a reconsideration of species classification. *Phycological Research*, 47: 189–197.
- Otsuka, S., Suda, S., Shibata, S., Oyaizu, H., Matsumoto, S., Watanabe, M. (2001). A proposal for the unification of five species of the cyanobacterial genus *Microcystis* Kützing ex Lemmermann 1907 under the Rules of the Bacteriological Code. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 51: 873–879.
- Paerl, H. (1988). Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine and inland waters. *Limnology and Oceanography*, 33: 823–847.
- Paerl, H. (1996). A comparison of cyanobacterial bloom dynamics in freshwater, estuarine and marine environments. *Phycologia*, 35: 25–35.
- Paerl, H. y Huisman, J. (2009). Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports*, 1: 27–37.

- Pearson, L., Dittmann, E., Mazmouz, R., Ongley, S., D'Agostino, P., y Neilan, B. (2016). The genetics, biosynthesis and regulation of toxic specialized metabolites of cyanobacteria. *Harmful Algae*, 54: 98–111.
- Philander, S. (1990). *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. California: Academic Press.
- Pírez, M., Gonzalez-Sapienza, G., Sienra, D., Ferrari, G., Last, M., Last, J. y Brena, B. (2013). Limited analytical capacity for cyanotoxins in developing countries may hide serious environmental health problems: Simple and affordable methods may be the answer. *Journal of Environmental Management*, 114: 63–71.
- Rastogi, R., Sinha, R., y Incharoensakdi, A. (2014). The cyanotoxin-microcystins: current overview. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 13: 215–249.
- Recknagel, F., French, M., Harkonen, P., y Yabunaka, K. (1997). Artificial neural network approach for modelling and prediction of algal blooms. *Ecological Modelling*, 96: 11–28.
- Reynolds, C. (2007). Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton: facultative responses to the environment. *Hydrobiologia*, 578: 37–45.
- Reynolds, C., Jawroski, G., Cmieche, H. y Leedale, G. (1981). On the annual cycle of the blue-green alga *M. aeruginosa* Kütz. Emend. Elenkin. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 293: 419–477.
- Reynolds, C. (2006). *Ecology of phytoplankton. Ecology, biodiversity and conservation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Reynolds, C., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L., y Melo, S. (2002). Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24: 417–428.
- Reynolds, C., Oliver, R., y Walsby, A. (1987). Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *Journal of Marine and Freshwater Research*, 21: 379–390.
- Ripley, B. (1996). *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Robarts, R., y Zohary, T. (1987). Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming

- cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 21: 391–399.
- Robson, B., y Hamilton, D. (2003). Summer flow event induces a cyanobacterial bloom in a seasonal Western Australian estuary. *Marine and Freshwater Research*, 54: 139–151.
- Robson, B., y Hamilton, D. (2004). Three-Dimensional Modelling of a Microcystis bloom event in a Western Australian Estuary. *Ecological Modelling*, 174: 203–222.
- Saizar, A. (1997). Assessment of impacts of a potential sea-level rise on the coast of Montevideo, Uruguay. *Climate Research*, 9: 7379.
- Santoro, P., Fossati, M., y Piedra-Cueva, I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, 60: 51–63.
- Sathicq, M., Bauer, D., y Gómez, N. (2015). Influence of El Niño Southern Oscillation phenomenon on coastal phytoplankton in a mixohaline ecosystem on the southeastern of South America: Río de la Plata estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 28: 26–33.
- Sathicq, M., Gómez, N., Andrinolo, D., Sedán, D., y Donadelli, J. (2014). Temporal distribution of cyanobacteria in the coast of a shallow temperate estuary (Río de la Plata): some implications for its monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186: 7115–7125.
- Segura, A., Piccini, C., Nogueirac, L., Alcántarac, I., Calliarid, D., y Kruk, C. (2017). Increased sampled volume improves *Microcystis aeruginosa* complex (MAC) colonies detection and prediction using Random Forests. *Ecological Indicators*, 79: 347–354.
- Sienra, D., y Ferrari, G. (2006). Monitoreo de cianobacterias en la costa de Montevideo. En L. Rodríguez.-Gallego, R. Menafrá F. Scarabino y D. Conde (Eds.), En: *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya* (413–419). Vida Silvestre: Montevideo.
- Smayda, T. J. (1997). What is a bloom? *Limnology and Oceanography*, 42: 1132–1136.
- Sobrino, C., Matthiensen, A., Vidal, S., y Galvão, H. (2004). Occurrence of Microcystins along the Guadiana estuary. *Limnetica*, 23: 133–144.
- SOHMA. (1978). *Observaciones Mareograficas, Puerto de Montevideo*,

Uruguay (Vol. 25). Montevideo.

- Timofeev, R. (2004). *Classification and Regression Trees (CART) Theory and Applications*. Berlin.
- Tonk, L. (2007). Salt tolerance of the harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Aquatic Microbial Ecology*, 46: 117–123.
- van der Westhuizen, A., y Eloff, J. (1985). Effect of temperature and light on the toxicity and growth of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* (UV-006). *Planta*, 163: 55–59.
- Verspagen, J., Snelder, E., Visser, P., Huisman, J., Mur, L. y Ibelings, B. (2004). Recruitment of benthic *Microcystis* (Cyanophyceae) to the water column: internal buoyancy changes or resuspension? *Journal of Phycology*, 260–270.
- Verspagen, J., Passarge, J., Johnk, K., Visser, P., Peperzak, L., Boers, P. y Huisman, J. (2006). Water management strategies against toxic *Microcystis* blooms in the Dutch delta. *Ecological Applications*, 16: 313–327.
- Vidal, F., Sedan, D., D'Agostino, D., Cavalieri, M., Mullen, E., Parot Varela, M. y Andrinolo, D. (2017). Recreational Exposure during Algal Bloom in Carrasco Beach, Uruguay: A Liver Failure Case Report. *Toxins*, 9: 2657–2675.
- Watanabe, M., y Oishi, S. (1985). Effects of Environmental Factors on Toxicity of a Cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) under Culture Conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, 49: 1342–1344.
- Wetzel, R. (1983). *Limnology*. Filadelfia, USA: CBC College Publishing.
- Wiedner, C., Visser, P., Fastner, J., Metcalf, J., Codd, G., y Mur, L. (2003). Effects of Light on the microcystin Content of *Microcystis* Strain PCC 7806. *Applied and Environmental Microbiology*, 60: 475–1481.
- Wu, X., Kong, F., Chen, Y., Qian, X., Zhang, L., Yu, Y. y Xing, P. (2010). Horizontal distribution and transport processes of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake (Taihu, China). *Limnologica*, 40: 8–15.
- Yannicelli, B. y Castro, L. (2013). Ecophysiological constraints on the larvae of *Pleuroncodes monodon* and the implications for its reproductive strategy in poorly oxygenated waters of the Chile-Peru undercurrent. *Journal of Plankton Research*, 35: 566–581.

- Zevenboom, W., y Mur, L. (1984). Growth and photosynthetic response of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* in relation to photoperiodicity and irradiance. *Archives of Microbiology*, 139: 232–239.
- Zhao, J., Ramin, M., Cheng, V., y Arhonditsis, G. (2008). Competition patterns among phytoplankton functional groups: How useful are the complex mathematical models? *Acta Oecologica*, 33: 324–344.
- Zurawell, R., Chen, H., Burke, J. y Prepas, E. (2005). Hepatotoxic cyanobacteria: A review of the biological importance of microcystins in freshwater environments. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews*, 1–37.

