

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MAPOCHO FRENTE A  
ESCENARIOS FUTUROS**

**CAMILA ECHEVERRÍA S.<sup>1</sup>**  
**GONZALO PIZARRO P.<sup>2</sup>**  
**SEBASTIÁN VICUÑA D.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

Los modelos de calidad del agua ayudan a comprender la realidad y anticiparse a ciertas problemáticas que se podrían generar en el futuro. Actualmente, estudios corroboran que el cambio climático puede generar efectos adversos en la calidad del agua de algunos ríos. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de calidad de aguas para el río Mapocho frente a escenarios futuros, considerando como variables principales el cambio climático, crecimiento/decrecimiento poblacional, industrial y agrícola. La modelación se desarrolla en el *software* QUAL2K; en él se implementan los escenarios climatológicos RCPs (*Representative Concentration Pathways*) desarrollados por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). En todos los escenarios futuros la concentración de OD disminuye con respecto al escenario base y las concentraciones de los demás parámetros simulados aumentan (CBODf, NH<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub>). Se concluye que el Cambio Climático genera efectos en la cantidad y calidad del agua del río Mapocho. Tanto en términos de cantidad de caudal como de calidad del agua, el Escenario3 (aumento poblacional e industrial, con Cambio Climático RCP8.5. Año 2030) es el escenario más adverso y el Escenario1 (aumento poblacional e industrial, en ausencia de Cambio Climático. Año 2030) es el más favorable.

---

<sup>1</sup>Estudiante de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica de Chile - [cecheve1@uc.cl](mailto:cecheve1@uc.cl)

<sup>2</sup>Profesor Titular, Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental - [gpizarro@ing.puc.cl](mailto:gpizarro@ing.puc.cl)

<sup>3</sup>Profesor Titular, Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Director Ejecutivo Centro de Cambio Global UC - [svicuna@uc.cl](mailto:svicuna@uc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

En el año 1925 nacen los modelos de calidad de agua como una forma de predecir los efectos de descargas de efluentes (primarios y no tratados) a cuerpos superficiales de agua. En aquella época, los principales contaminantes eran las bacterias y la disminución de la concentración de oxígeno disuelto que provocaban en el agua, por lo que el enfoque estaba en la modelación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Los modelos de calidad del agua han ido evolucionando acorde a la aparición de nuevos contaminantes producto de nuevos problemas (efluentes secundarios, eutroficación, compuestos tóxicos, entre otros), variando así el enfoque de la modelación según las necesidades que presenta la sociedad (Chapra, 2011).

En la actualidad, existen diversos cambios, tanto a nivel global como local, que podrían afectar la calidad del agua de los ríos en el futuro. A nivel local se tiene el crecimiento industrial y poblacional que está experimentando la Cuenca del Río Maipo. Estos crecimientos significan un aumento de los residuos industriales líquidos (RILes) descargados por parte de las industrias y de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, los cuales podrían generar un deterioro de la calidad del agua de los ríos. A nivel global, se tiene el cambio climático y los efectos que éste podría generar (Bonelli et al., 2014; Meza et al., 2014).

En algunos países se ha estudiado el efecto que tiene el cambio climático en la calidad del agua de sus ríos, demostrando un fuerte impacto en parámetros como DBO, OD y  $\text{NH}_4^+$  debido a la disminución de caudal y aumento de temperatura (Mimikou et al., 2000; Wilby et al., 2006; Luo et al., 2013).

En países como Estados Unidos, el “*Clean Water Act*” incentiva el uso de modelos de calidad de agua para toma de decisiones y legislación (Chapra, 2011). En Chile, se están desarrollando las Normas Secundarias de Calidad del Agua para diversos ríos. Se han hecho estudios y modelaciones de calidad del agua para el desarrollo de estas normas, pero no se ha incorporado el efecto que podría generar el cambio climático.

Los modelos de calidad del agua permiten identificar los diferentes factores que afectan la calidad del agua del río y su autodepuración. Las descargas efectuadas en un río a través de fuentes puntuales como industrias y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, generan un deterioro en la calidad del agua. Ecológicamente, la repercusión más dañina de la contaminación de aguas es la caída de los niveles de oxígeno disuelto, ya que éste posee gran impacto en la comunidad acuática (Haider, Al, & Haydar, 2013). Comprender los procesos físicos de la contaminación de fuentes puntuales es fundamental para evaluar la calidad del agua del río e identificar las fuentes de mayor contaminación en una cuenca (Wu & Chen, 2013), y también, para la toma de decisiones respecto a planificación urbana y gestión del recurso hídrico.

## 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La hipótesis de este trabajo es que el cambio climático genera un deterioro de la calidad del agua

del río Mapocho y que con la ayuda de herramientas computacionales se pueden tomar decisiones que permitan evitar efectos adversos sobre el medio acuático. De esta forma, se ha planteado el objetivo de desarrollar un modelo de calidad de aguas para el río Mapocho que incorpore un análisis de escenarios futuros. Las principales variables a considerar en los diferentes escenarios son el cambio climático, el crecimiento/decrecimiento poblacional, industrial y agrícola.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **Descripción del Modelo**

El modelo QUAL2K (Chapra and Pelletier, 2003) simula el comportamiento de 18 variables de calidad del agua en ríos y arroyos. El modelo supone flujo unidimensional, completamente mezclado, permanente y longitudinalmente variado. Supone variación diurna de calor y de la calidad del agua (escala de tiempo circadiano). Es un modelo estático, trabaja en escala diaria, pero cuenta con variación horaria.

En el modelo, los ríos se dividen en tramos (*reaches*), en los cuales se mantienen constantes las características hidráulicas. A su vez, cada tramo es dividido en elementos computacionales en los cuales se realizan los balances de masa, calor y se aplican las ecuaciones de equilibrio químico y cinéticas biológicas. El modelo simula las interacciones entre los ciclos del nitrógeno y del fósforo, producción y consumo de oxígeno (fotosíntesis, reaeración y demanda bioquímica de oxígeno), producción y crecimiento de plantas.

#### **Caracterización de la Cuenca**

##### *Descripción General de la Cuenca y Superficie a Modelar*

La cuenca del Río Maipo se encuentra ubicada en la zona central de Chile. Se extiende entre los paralelos 32°55' – 34°15' latitud sur y meridianos 69°55' – 71°33' longitud oeste, cubriendo una superficie total de 15.380 km<sup>2</sup> y prácticamente la totalidad de la Región Metropolitana y una mínima superficie de las Regiones de Valparaíso (Provincia de San Antonio y Valparaíso) y del Libertador Bernardo O'Higgins (Provincia de Cachapoal).

De régimen pluvionival, los principales ríos en la cuenca son el Maipo y el Mapocho. El Río Maipo tiene una longitud de 250 kilómetros, naciendo en la frontera con Argentina y desembocando en el Océano Pacífico. Es la principal fuente de agua de la Región Metropolitana cubriendo alrededor del 70% de la demanda actual de agua potable y cerca de un 90% de las demandas de regadío. Por otro lado, el Río Mapocho es el principal río de la ciudad de Santiago. Tiene una longitud de 96 kilómetros, nace en el Cerro El Plomo y desemboca en el Río Maipo.

Santiago es la ciudad más importante de la cuenca. El crecimiento que ha sufrido la capital ha afectado a ciudades cercanas como San Bernardo, Padre Hurtado y Puente Alto, las que han sido

incorporadas al Gran Santiago, el que abarca una superficie de 2.265 Km<sup>2</sup>.

La zona de estudio abarca desde el río Mapocho en Puente Pudahuel y el Estero Lampa antes de la confluencia con el río Mapocho, hasta la confluencia del río Mapocho con el río Maipo.

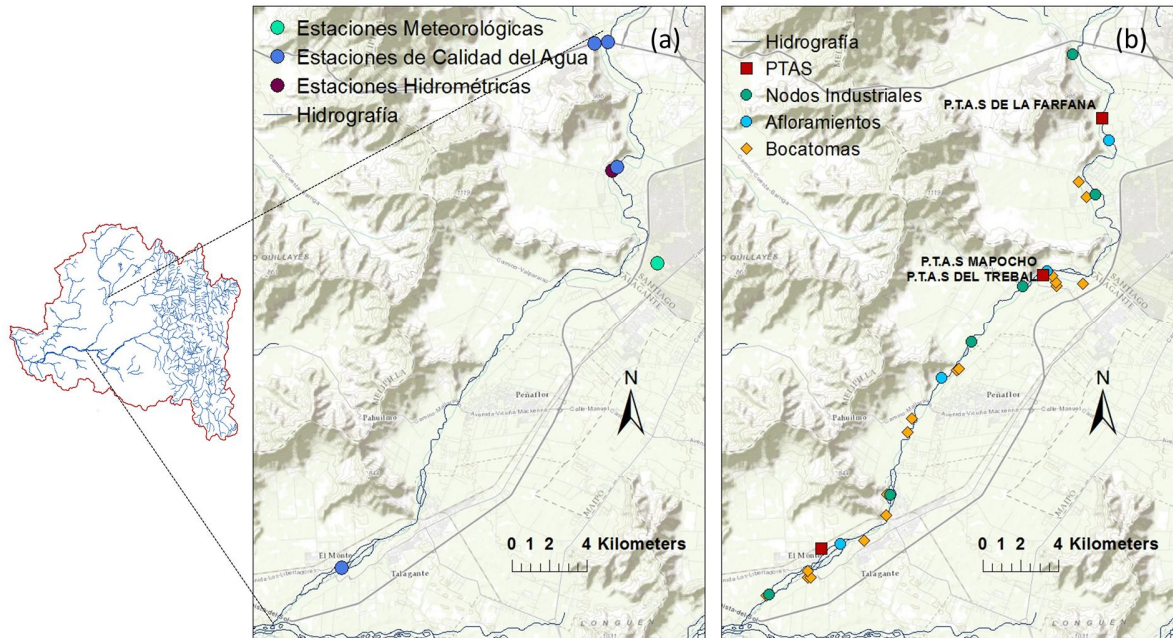


Figura 1. Estaciones meteorológicas, de calidad del agua e hidrométricas (a) y fuentes puntuales de descargas al río y extracciones (plantas de tratamiento de aguas servidas, RILes, afloramientos de aguas subterráneas y canales) en la zona de estudio.

#### *Estaciones Climatológicas, Hidrométricas y de Calidad del Agua dentro de la zona de estudio*

Dentro del área de estudio se encuentran cuatro estaciones de calidad del agua y una estación hidrométrica, todas ellas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA). La información proveniente de las dos primeras estaciones de calidad del agua se utilizan como información base en las cabeceras del modelo. La estación hidrométrica se utiliza como base para el cálculo del caudal en las cabeceras, a través de balance de masa. Además, se cuenta con una estación meteorológicas índice cuya área de alcance fue determinada con la metodología de Polígonos de Thiessen. En la Figura 1 (a) se pueden ver las diferentes estaciones en la zona de estudio.

#### *Usuarios de la Cuenca (doméstico, agrícola e industrial)*

Existen diversos usuarios del agua a distintos niveles, los cuales se han caracterizado y se han incorporado en la modelación a través de los vertimientos y/o extracciones que realizan en el río (ver Figura 1 (b)).

El sector doméstico es abastecido de agua potable por empresas sanitarias. Las aguas usadas y descargadas por este sector, en su totalidad, son transportadas a las diferentes Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS). Dentro de la zona de estudio se encuentran cuatro PTAS, siendo tres de éstas las principales de la cuenca (La Farfana, El Trebal y Mapocho).

El sector agrícola se encuentra principalmente al sur oeste de la ciudad y es caracterizado en la modelación como extracciones realizadas al río a través de canales. En la zona de estudio se encuentran diecisiete canales de extracción de agua directa del río Mapocho. En la modelación no se considera el aporte de agua que genera el sector agrícola al río, ya que no existe información sobre la contaminación por fuentes difusas que produce la agricultura en esta zona. En este trabajo no se considera el aporte de fuentes difusas al río.

Los usuarios industriales utilizan el agua y luego descargan sus residuos industriales líquidos (RILes) a diferentes cuerpos, todos normados a través de Decretos Supremos (DS). En la modelación se contemplan las descargas superficiales (D.S.90) realizadas en el área de estudio y las descargas a alcantarillado (D.S.609), las cuales son tratadas en las PTAS y consideradas en el modelo a través de sus descargas.

## **Análisis de fuentes de descarga y extracción puntual**

### *Descargas de las PTAS*

Se cuenta con información proveniente del Ministerio del Medio Ambiente correspondiente a datos de caudal y calidad de las descargas de las cuatro PTAS contempladas en la modelación para el año 2008 y 2009. Esta información se complementa con los datos obtenidos en campañas a terreno. Para el año 2012 (año base para la modelación) se tiene el caudal aproximado y el porcentaje de saneamiento de cada PTAS, información entregada por la empresa Aguas Andinas.

Se analiza la estacionalidad del caudal descargado en los años 2008 y 2009, para los periodos noviembre-enero, febrero-abril. Esta diferencia porcentual entre los periodos se mantiene constante tanto para el escenario base como para los futuros escenarios. También se considera constante la calidad del agua del vertimiento de cada PTAS.

### *Descargas Industriales*

Se tienen aproximadamente 750 industrias que son fiscalizadas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y que descargan sus residuos a cuerpos superficiales, aguas subterráneas o alcantarillado. En la modelación se consideran todas las industrias que descargan un caudal alto, perteneciente al 90% del caudal acumulado de las descargas totales y/o son consideradas un establecimiento emisor según la norma. Estas industrias se agrupan por comuna y se generan nodos industriales para cada comuna. Para cada nodo industrial se realiza un balance de masa y se genera una descarga por nodo, con el fin de simplificar la modelación. Se considera un total de seis nodos industriales que descargan directamente al río. La ubicación del punto de descarga del nodo industrial se determina como un promedio de las distancias de los puntos de descarga de las industrias que componen los nodos. Esta simplificación genera limitaciones en la modelación ya que no se considera cada punto de vertimiento particular sino un agregado de éstos, lo cual no ocurre en la realidad.

### *Afloramientos de aguas subterráneas*

La zona de estudio cuenta con cuatro sectores de afloramientos de agua subterránea. Se consideran estos afloramientos como fuentes puntuales de descarga. Los caudales de

afloramiento son tomados del Modelo Maipo - Mapocho presentado en el Plan Director (Arrau Del Canto, 2008). Se supone máximo aporte en el periodo de noviembre a enero y se calcula el aporte en los demás periodos según el porcentaje del caudal del río que representa cada afloramiento.

La calidad del agua de los afloramientos se obtiene también del Plan Director y se complementa con literatura. Cada sector de afloramiento de aguas subterráneas se asocia a algún pozo cercano en el cual se realicen mediciones periódicas.

### *Canales*

Para los meses de noviembre a enero se asume que los canales utilizan su capacidad máxima, ya que es la época de mayor demanda de agua por los cultivos. Tres canales extraen un porcentaje de su capacidad máxima en estos meses debido a que el caudal que trae el río no alcanza a abastecer la capacidad total que éstos tienen. Para los demás meses, el caudal extraído se calcula en base a la proporción de agua que extraen del río en los meses de verano.

## **Campañas en Terreno**

Se realizaron dos campañas a terreno con el fin de conocer mejor el área de estudio, estimar algunas características hidromorfológicas (secciones transversales, coeficiente de Manning, entre otros) y obtener datos que permitan calibrar y validar la modelación.

La primera campaña fue realizada en el mes de diciembre del año 2013. Se tomaron muestras de agua en ocho puntos a lo largo del río Mapocho. La segunda campaña se llevó a cabo en abril del año 2014 y se tomaron muestras de agua en 12 puntos del río. En la Figura 2 se encuentran los puntos de muestreo de las campañas a terreno. En ambas campañas se analizaron nutrientes, metales totales y disueltos, y parámetros de calidad del agua como Oxígeno Disuelto y Demanda Biológica de Oxígeno.

En ambas campañas a terreno las concentraciones de metales resultaron ser muy bajas, en muchos casos bajo el límite inferior de detección, por lo que se descarta la idea de integrar un nuevo software en el cual se modelen las concentraciones de metales y que luego se acople a la modelación de calidad de aguas en el QUAL2K.

## **Escenarios**

Para la construcción de escenarios futuros se considera el crecimiento/decrecimiento poblacional, agrícola e industrial y el cambio climático. El horizonte de tiempo es el año 2030.

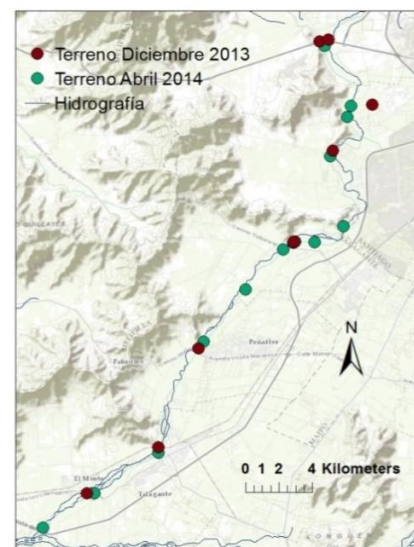


Figura 2. Puntos de muestreo en campañas.

Para el crecimiento/decrecimiento poblacional, agrícola e industrial se utiliza información del trabajo, aún en desarrollo, realizado por investigadores del Centro de Cambio Global UC, en el cual se utilizó el programa CLUE-s (*Conversion of Land Use Modelling and its Effects*) (Henríquez & Usón, 2014).

### *Crecimiento Urbano*

El crecimiento urbano contempla el crecimiento poblacional, el cual se ve reflejado principalmente en el aumento de las descargas de las PTAS, y el crecimiento industrial.

Se utiliza la proyección poblacional media, estimada a partir de las proyecciones poblacionales realizadas por las empresas sanitarias de la región en sus planes de desarrollo. Para el año 2030 se estima una población de 7.6 millones de habitantes con una demanda de 135 mil hectáreas (ver Tabla 1).

Tabla 1. Proyección de usos de suelo urbano y agrícola.

Año	Población	Demanda (has)	% aumento	Año	Demanda (has)	% disminución
2010	6883563	76484	0	2010	206000	0
2030	7600000	135000	176,51	2030	204000	0,97

Fuente: Elaboración propia con información obtenida del Informe N°2: Construcción de escenarios de usos de suelos futuros de la cuenca del Maipo. Proyecto MAPA: Maipo Plan de Adaptación.

La proyección de las descargas de las PTAS se hace a partir del porcentaje de saneamiento de la población por cada PTAS, manteniendo este porcentaje constante y considerando la proyección poblacional. Se considera que cada PTAS irá aumentando su capacidad de tratamiento con el paso del tiempo. Se supone un consumo de agua por habitante igual a 218 litros/día. La Tabla 3 presenta los caudales descargados por las diferentes PTAS en los periodos de evaluación.

Tabla 3. Proyección del caudal (m<sup>3</sup>/s) descargado por cada PTAS.

Año	Caudal Descargado Noviembre-Enero				Caudal Descargado Febrero-Abril			
	La Farfana	El Trebal	Mapocho	Talagante	La Farfana	El Trebal	Mapocho	Talagante
2010	8,68	4,34	4,34	0,40	8,30	4,23	4,23	0,43
2030	9,59	4,79	4,79	0,44	9,17	4,66	4,66	0,47

La proyección de las descargas industriales se hizo a partir de la relación entre el caudal total descargado por las industrias consideradas en la modelación y la población existente, asumiendo proporcionalidad directa entre población e industrias. En la Tabla 4 se pueden ver los caudales descargados por los diferentes Nodos Industriales.

Tabla 4. Proyección de RILes.

Año	Población	Q (m <sup>3</sup> /s) Nodo Peñaflo		Q (m <sup>3</sup> /s) Nodo Talagante	
		Febrero - Abril	Noviembre - Enero	Febrero - Abril	Noviembre - Enero
2010	6883563	0,8986	0,7177	0,0010	0,0013
2030	7600000	0,9921	0,7924	0,0011	0,0015

### Decrecimiento Agrícola

Se utiliza la demanda de usos de suelo agrícola proyectada por el Gobierno Regional (GORE). Se considera que no varían los caudales extraídos por los canales ya que las variaciones en el uso de suelo son prácticamente imperceptibles.

### Cambio Climático

Se utilizan dos de los cuatro escenarios RCPs (*Representative Concentration Pathways*) desarrollados por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) el año 2013-2014 (Jubb, Canadell, & Dix, 2013). Se considera para cada RCP (RCP4,5 y RCP8,5) la probabilidad de ocurrencia de un 50% y se consideran tres impactos relevantes del cambio climático: cambios en el caudal, temperatura del río y meteorología.

Se tienen los caudales proyectados para la Estación Hidrométrica Los Almendros. La estación considerada en este estudio es la Estación hidrométrica Rinconada Maipú. Se correlacionan los caudales promedio mensuales históricos (1988-2008) entre ambas estaciones y se obtiene un coeficiente de correlación igual a 0,384 para los 12 meses del año y uno igual a 0,983 considerando sólo los periodos en análisis (noviembre-enero y febrero-abril). Esta diferencia se debe a la eliminación de los meses que causan estacionalidad. Para mayor detalle, ver Figura 3.

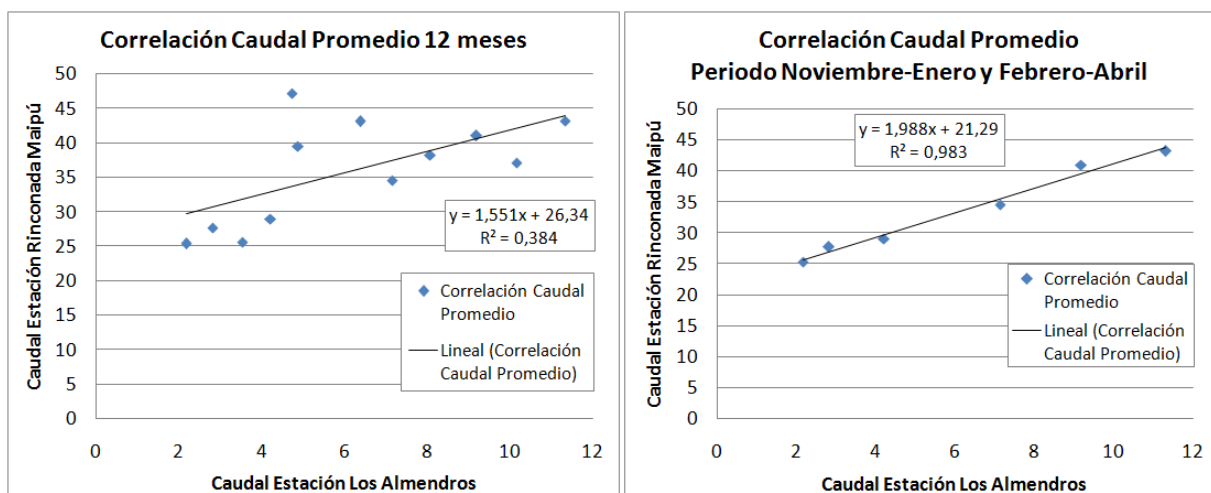


Figura 3. Correlación de caudales para las estaciones Los Almendros y Rinconada Maipú.

Esta correlación se asume constante en el tiempo, ya que la disminución esperada de precipitaciones debido al efecto del cambio climático, no afecta al periodo de tiempo en análisis. Otro efecto del cambio climático evaluado en este trabajo es la variación de la temperatura del agua. Se considera un aumento de la temperatura del agua proporcional al aumento de la temperatura del aire (Luo, Ficklin, Liu, & Zhang, 2013). En el RCP8,5 se genera una diferencia de temperatura respecto al año base de 0,52°C y en el RCP4,5 la diferencia es de 1,43. Esta diferencia mayor para el RCP4,5 se debe a que la modelación del Cambio Climático es estocástica, y al considerar un año particular (2030), no necesariamente refleja la tendencia de cambio.

La temperatura del aire máxima, mínima y temperatura de rocío para los dos escenarios RCP



evaluados en el año 2030, se calculan a partir de proporciones históricas. La velocidad del viento se asume constante.

En este trabajo se evalúa la concentración de cuatro parámetros de calidad del agua a lo largo del río Mapocho (OD: oxígeno disuelto, CBODf: Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea rápida, NH<sub>4</sub>: amonio y NO<sub>3</sub>: Nitrato). Estos parámetros son evaluados en cuatro escenarios futuros (meses de febrero a abril): - Escenario 1: Aumento poblacional e industrial, en ausencia de Cambio Climático. Año 2030.- Escenario 2: Aumento poblacional e industrial, con Cambio Climático RCP4.5. Año 2030.- Escenario 3: Aumento poblacional e industrial, con Cambio Climático RCP8.5. Año 2030.

## 4. RESULTADOS

### Calibración y Validación

Se utiliza como factor de calibración una función de ajuste (ecuación 1), la cual se determina como el recíproco del peso ponderado de la raíz de la normalización del error cuadrático medio entre lo simulado por el modelo y los datos observados para los constituyentes de la calidad del agua.

$$f(x) = \left[ \sum_{i=1}^n w_i \right] \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{w_i} \left[ \frac{(\sum_{j=1}^m o_{ij}/m)}{[\sum (P_{ij}-O_{ij})^2/m]^{1/2}} \right] \right] \quad (1)$$

Donde  $O_{ij}$  = valores observados,  $P_{ij}$  = valores simulados,  $m$  = número de pares de valores simulados y observados,  $w_i$  = factor de ponderación y  $n$  = número de las diferentes variables de estado incluidas en la función.

Los parámetros considerados en esta función son la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea, el Oxígeno Disuelto, Nitrógeno Orgánico, Amonio, Nitrato, Fósforo Orgánico y Fósforo Inorgánico.

Los parámetros fueron calibrados y validados maximizando esta función. El modelo se calibra con los datos obtenidos en la campaña de abril del 2014, maximizando el valor coeficiente de ajuste, siendo igual a 70,6445. La validación se hace con los datos de campaña de diciembre del año 2013 y entrega un coeficiente de ajuste igual a 74,6857. La Figura 4 y Figura 5 muestra la calibración y validación, respectivamente, de cuatro de los parámetros modelados. En el eje de abscisas se encuentra la distancia en el río, medida en kilómetros, desde la cabecera (kilómetro 47) hasta la desembocadura del río Mapocho en el río Maipo (kilómetro 0). El eje de ordenadas corresponde a las concentraciones de los parámetros.

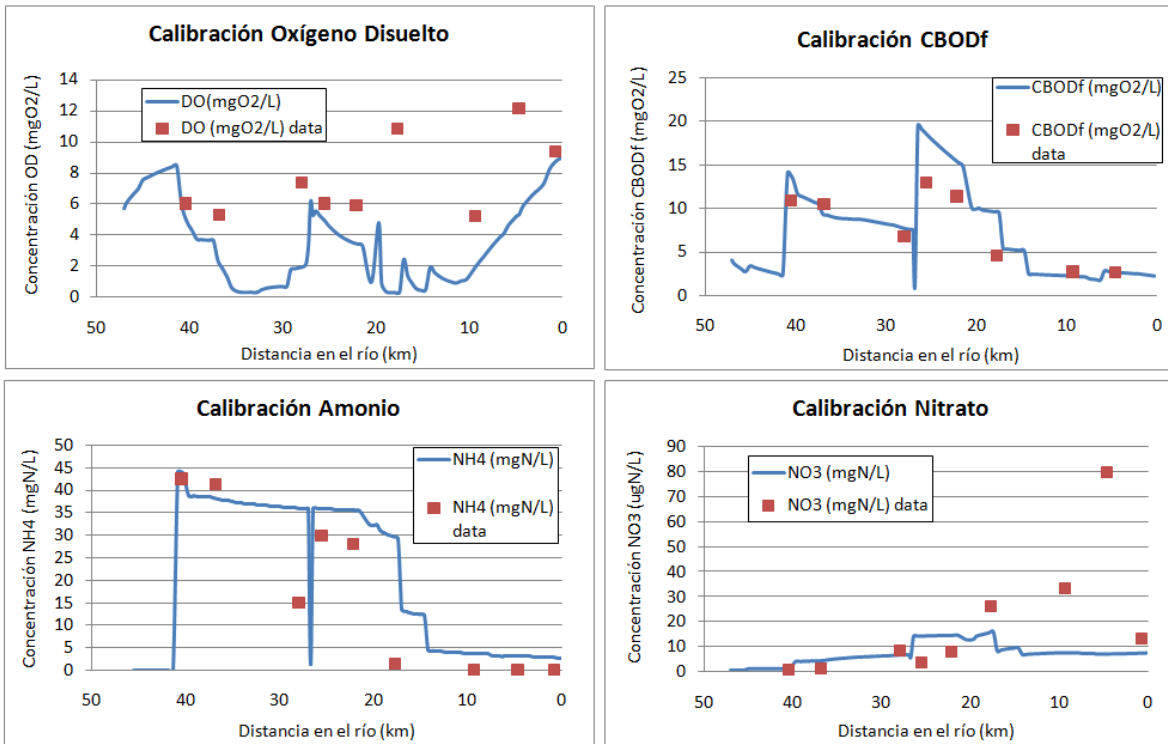


Figura 4. Calibración del modelo.

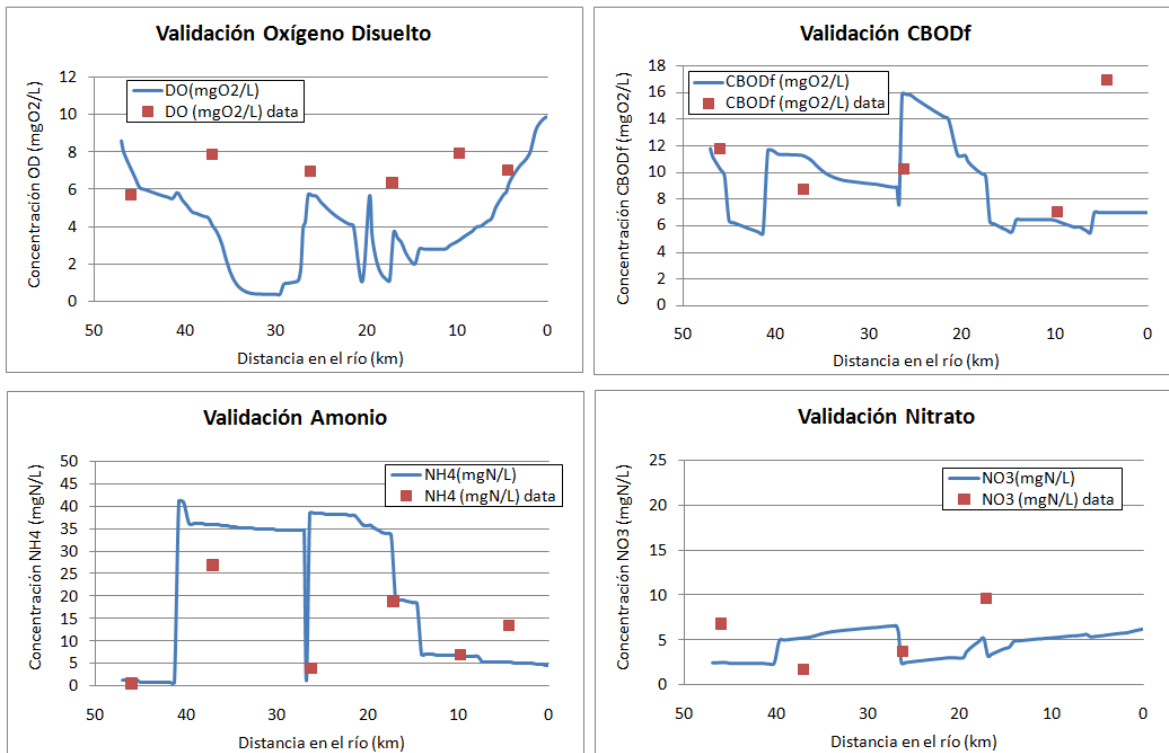


Figura 5. Validación del modelo.

## Análisis de concentración de parámetros en escenarios futuros

El Escenario Base es el escenario de la calibración (febrero-abril del año 2012).

El Escenario1 refleja la condición en la que se encontraría el río Mapocho en el año 2030 en ausencia de cambio climático, considerando crecimiento poblacional e industrial. En este escenario disminuyen los peaks de OD, el comportamiento de la CBODf es similar a la del año 2012 y las concentraciones de amonio y nitrato aumentan (Figura 6).

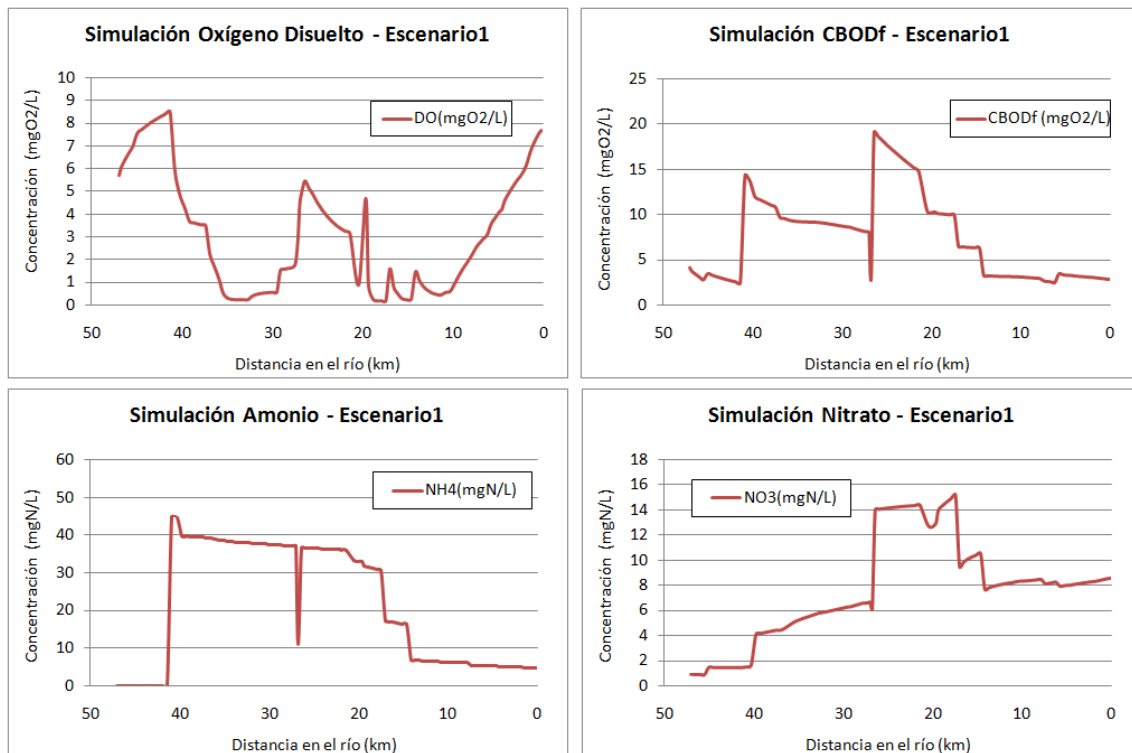


Figura 6. Proyección de la concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenario1.

Los resultados con la información disponible sobre cambio climático se reflejan en el Escenario 2 y Escenario 3 (Figura 7 y Figura 8, respectivamente).

En el Escenario2, los caudales extraídos por los canales ubicados entre Puente Pudahuel y las PTAS El Trebal y Mapocho deben disminuir su extracción a un 94% para que el sistema pueda operar (el río se encuentre con caudal mayor que 0 m<sup>3</sup>/s). Aplicada esta condición, las concentraciones de los parámetros de calidad del agua a lo largo del río se pueden ver en la Figura 7. En comparación al escenario base, hay mayores fluctuaciones de las concentraciones de OD, aumentando las concentraciones máximas y disminuyendo las mínimas. El comportamiento de la CBODf es similar al del año 2012, presenta un pequeño aumento de las concentraciones después de la descarga de la PTAS La Farfana. Se puede ver un aumento de las concentraciones de Amonio y Nitrato.

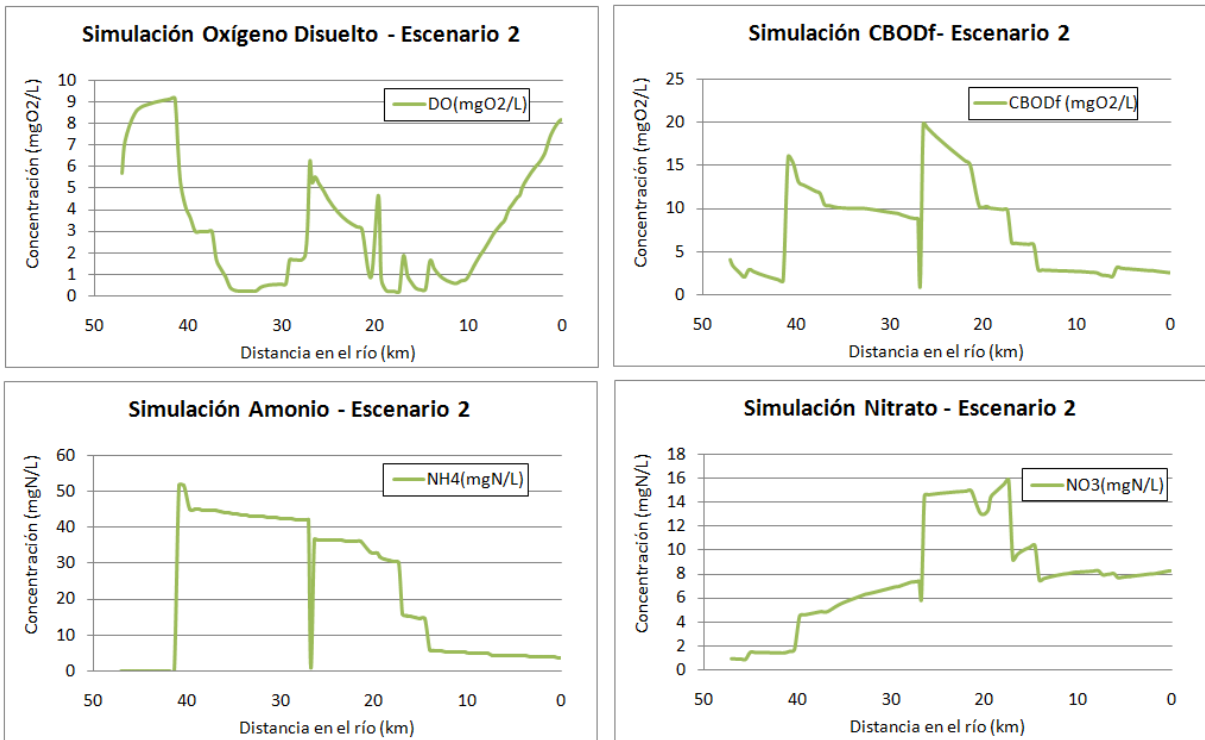


Figura 7. Proyección de la concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenario2.

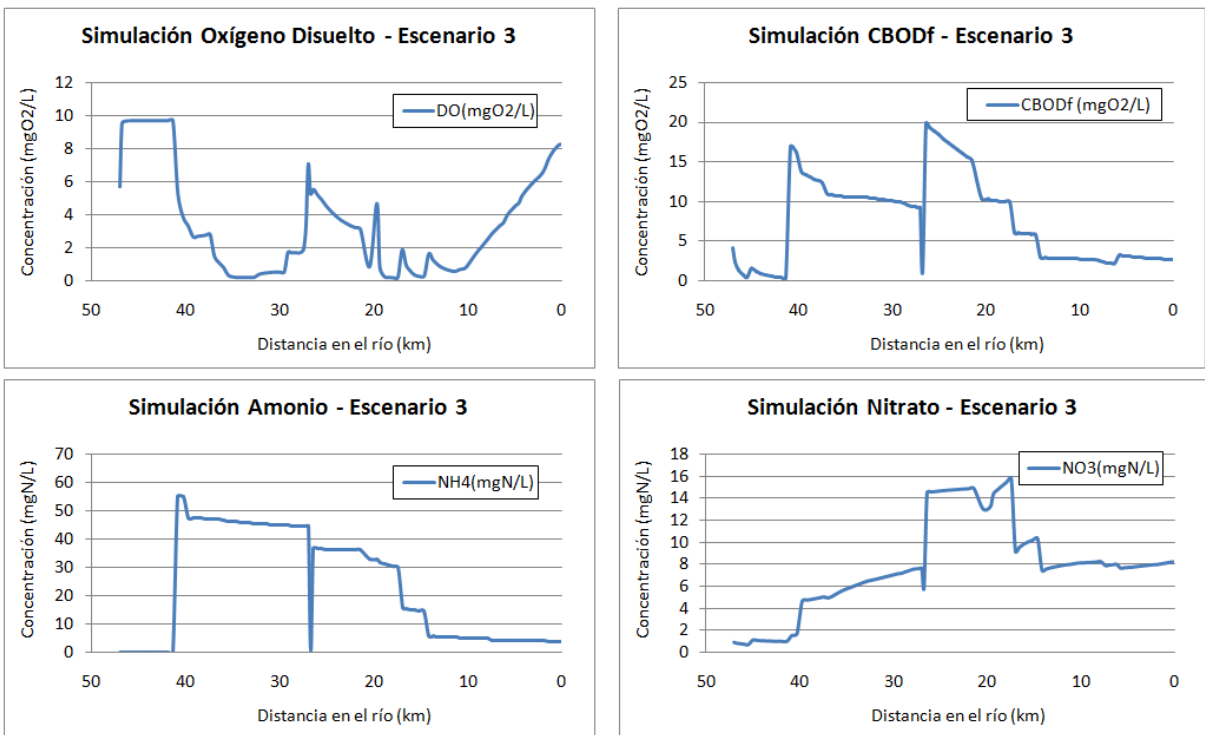


Figura 8. Proyección de la concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenario3.

En el Escenario 3 existe una drástica disminución de caudal en las cabeceras de los ríos. Para este escenario se genera una disminución de un 11% de la captación de los canales respecto a la captación que tenían en el año 2012. Aplicada esta condición, la simulación presenta un aumento de las concentraciones máximas de todos los parámetros, especialmente de la CBODf y Amonio.

En la Tabla 6 se pueden ver las concentraciones promedio de los parámetros de calidad del agua para los escenarios futuros y base. En todos los escenarios futuros la concentración de OD disminuye con respecto al escenario base y las concentraciones de los demás parámetros aumentan (CBODf, NH<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub>).

Tabla 6. Concentración promedio de los parámetros OD, CBODf, NH<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub> en los escenarios.

Concentración Promedio	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario Base
OD (mgO <sub>2</sub> /l)	3,11	3,32	3,44	3,48
CBODf (mgO <sub>2</sub> /l)	7,25	7,4	7,41	6,87
NH <sub>4</sub> (mgN/l)	20,95	22,01	22,79	19,48
NO <sub>3</sub> (mgN/l)	7,53	7,66	7,69	7,42

Se comparan las concentraciones por parámetro en los diferentes escenarios junto a la NSCA (Figura 9).

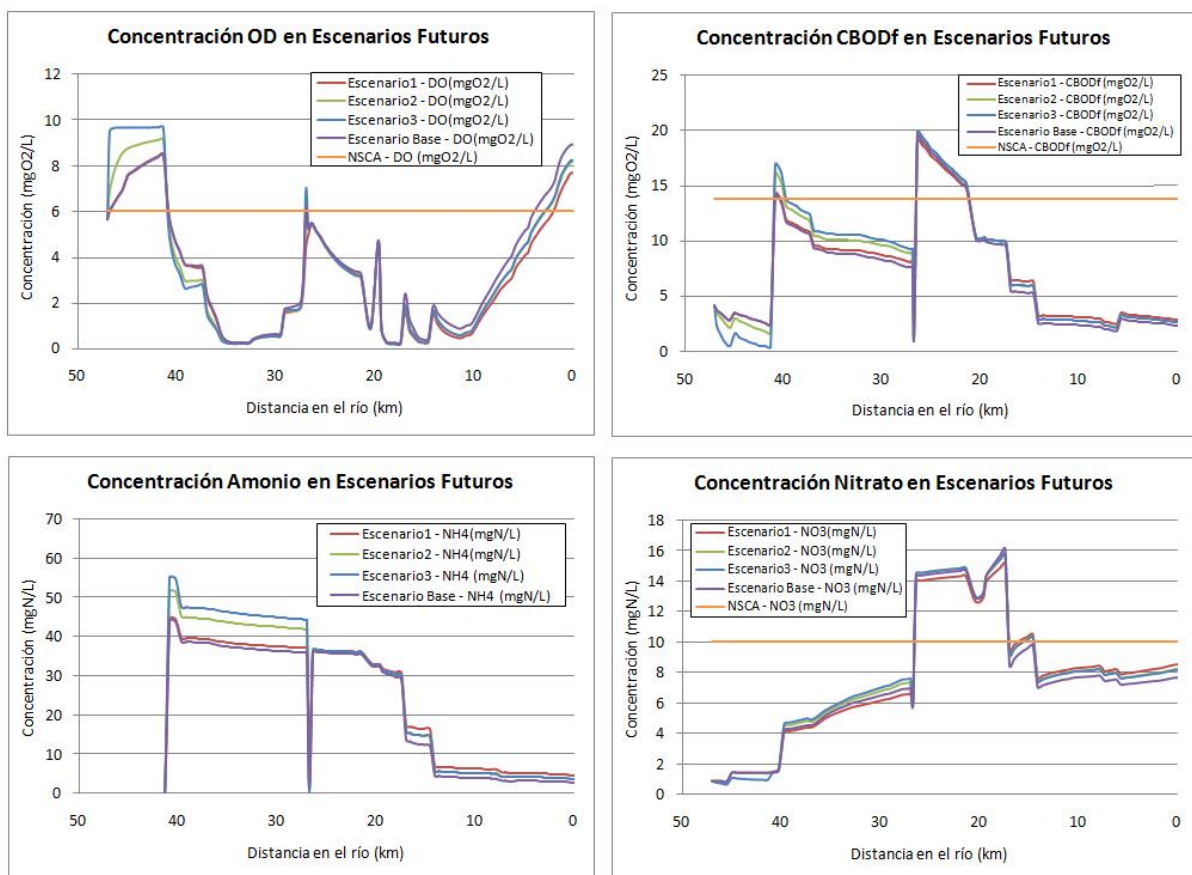


Figura 9. Comparación de la proyección de la concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenarios Futuros y la NSCA.

Se puede ver que las concentraciones de OD se encuentran bajo la norma (6 mg/l) en la mayor parte del río para todos los escenarios futuros. En el tramo final se pueden diferenciar los distintos escenarios, dando cuenta que en cualquier escenario se encontrarán menores concentraciones de oxígeno disuelto respecto a la línea base. Respecto a la CBODf, se muestra un incumplimiento de la norma (10 mg/l de DBO5 ~ 13,75 mg/l CBODf) en dos zonas del río, las cuales corresponden a las zonas de las descargas de las principales PTAS de la ciudad. El NO<sub>3</sub> no cumple con la norma durante aproximadamente 10 kilómetros, en los cuales se ve sobrepasada en alrededor de 4 mg/l. Cabe señalar que el amonio no es regulado por esta norma.

Para todos estos resultados se deben tener en cuenta las limitaciones de este modelo y metodología empleada. Al ser un modelo estático, no permite un fiel reflejo de la dinámica real, sobre todo en un río tan intervenido como el Mapocho. Se pueden distinguir limitaciones en la metodología empleada, como considerar algunas fuentes difusas como puntuales (por ejemplo, los acuíferos) y generar nodos de descarga industrial; esto simplifica la modelación, pero genera ruido en el modelo. Además, se trabaja con escenarios de Cambio Climático que aún están siendo evaluados.

## **5. CONCLUSIONES**

El Cambio Climático genera efectos en la cantidad y calidad del agua del río Mapocho. Tanto en términos de cantidad de caudal como de calidad del agua, el Escenario3 es el escenario más adverso ya que provoca una disminución importante de la cantidad de caudal disponible en las cabeceras de la modelación, lo cual genera como consecuencia una menor dilución, aumentando así las concentraciones promedio de todos los parámetros de calidad del agua, excepto la concentración de OD la cual en promedio, sigue siendo menor en comparación al escenario base. Además, este escenario obligaría a que el sector agrícola se adapte a esta nueva condición y disminuya la cantidad de caudal extraído por los canales del río. El Escenario3 presenta también un aumento en las concentraciones promedio de todos los parámetros de calidad del agua en comparación a los demás escenarios futuros (Escenario1 y Escenario2), siendo el amonio el parámetro más afectado. Por otra parte, el escenario futuro más favorable es el Escenario1, el cual supone ausencia de Cambio Climático.

Se recomienda la generación de medidas de adaptación para poder asegurar un futuro cumplimiento de la Norma Secundaria de Calidad del Agua.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece el financiamiento al Proyecto MAPA (Proyecto IDRC 107081-001) y a CEDEUS, financiado por CONICYT a través de su Programa Fondap.

## REFERENCIAS

Arrau Del Canto, L. (2008). Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos Cuenca del Río Maipo.

Chapra, S. C. (2011). Rubbish, stink, and death: The historical evolution, present state, and future direction of water-quality management and modeling. *Environmental Engineering Research*, 16(3), 113–119. <http://doi.org/10.4491/eer.2011.16.3.113>

Cuenca del Río Maipo. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

Haider, H., Al, W., & Haydar, S. (2013). A Review of Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand Models for Large Rivers, 12, 127–142.

Henríquez, L., & Usón, T. (2014). Informe N ° 2 Construcción de escenarios de usos de suelos futuros de la cuenca del Maipo.

Jubb, A. I., Canadell, P., & Dix, M. (2013). Representative Concentration Pathways ( RCPs ). *Australian Climate Change Science Program*, 5–7.

Luo, Y., Ficklin, D. L., Liu, X., & Zhang, M. (2013). Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with a watershed modeling approach. *Science of the Total Environment*, 450-451, 72–82. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.004>

Mimikou, M. a., Baltas, E., Varanou, E., & Pantazis, K. (2000). Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *Journal of Hydrology*, 234, 95–109. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00244-4](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00244-4)

Wilby, R. L., Whitehead, P. G., Wade, a. J., Butterfield, D., Davis, R. J., & Watts, G. (2006). Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. *Journal of Hydrology*, 330, 204–220. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.033>

Wu, Y., & Chen, J. (2013). Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China. *Ecological Indicators*, 32, 294–304. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.04.002>