

VCH-FC  
Q. Ambiental  
V 335  
C.1



FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**VISIÓN ACTUAL SOBRE *Didymosphenia geminata*, POSIBLES  
MEDIDAS DE CONTROL Y ESTUDIO EN UNA SUBCUENCA  
CHILENA**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento  
parcial de los requisitos para optar al Título de:

**Químico Ambiental**

**Adrián Guillermo Vásquez Doorman**

Director de Seminario de Título: Daniel Luna Sáez (Endesa)  
Profesor Patrocinante: Vivian Montecino Banderet

Abril de 2015  
Santiago – Chile



## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

**ADRIÁN GUILLERMO VÁSQUEZ DOORMAN**

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en el cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

### COMISIÓN DE EVALUACIÓN

*Daniel Luna Sáez*

**Director de Seminario de Título**

*Vivian Montecino Banderet*

**Profesor Patrocinante**

*María Cecilia Rojas Garrido*

**Corrector**

*Julio Hidalgo*

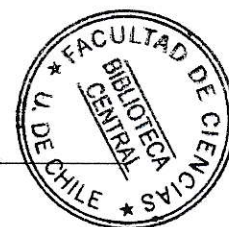
**Corrector**

*Adrián V. Doorman*

*Vivian Montecino Banderet*

*M. Cecilia Rojas Garrido*

*Julio Hidalgo*



Santiago de Chile, Abril de 2015



Adrián Guillermo Vásquez Doorman nació el 16 de Agosto de 1990 en la ciudad de Santiago de Chile. Cursó su enseñanza básica en la Escuela Santa Marta (Ñuñoa) y posteriormente la enseñanza media en el Liceo Lenka Franulic, de la misma comuna. El año 2009 ingresó a la carrera de Química Ambiental de la Universidad de Chile. En el verano de 2013 realiza su Unidad de Investigación en el Centro Nacional del Medio Ambiente (Cenma), bajo la tutela de la Dra. Isel Cortés Nodarse. En Octubre de ese mismo año, ingresa a Endesa como memorista donde realiza su Seminario de Título sobre *Didymosphenia geminata* en Chile y el mundo, principalmente en búsqueda de medidas de control y entender su comportamiento en distintos ecosistemas. Finalmente, el año 2015 se titula como Químico Ambiental de la Universidad de Chile.

## **Agradecimientos**

A José Luis Rodríguez, que gracias a él en primera instancia logré entrar a Endesa a realizar mi Seminario de Título; y por supuesto también a sus colegas, Carlos Campos, Galo D'alencón por su apoyo y gestión, y finalmente a Daniel Luna, mi Director del Seminario que estuvo siempre orientándome y dispuesto a ayudarme.

A la consultora AMAKAIK, y en particular a su directora Carolina Díaz y a su colega Úrsula Romero, por su incuestionable buena voluntad, buen soporte técnico y ayuda de diversa índole para labores de terreno.

A mis ex-jefes y ex-compañeros de Endesa Medio Ambiente, por recibirme de muy buena manera, en un ambiente agradable, y en particular a Cristian G. que fue quien más me ayudó por el tema de los terrenos. También a Bernardino, Omar, Daniela C., Mario C., Juan Luis, Constanza, Evelyn, Vilma, entre otros, que me ayudaron en otras oportunidades.

A mis profesoras: Vivian Montecino y Cecilia Rojas por orientarme cuando lo necesité, al igual que mi ex-jefa y jefa de carrera Sylvia Copaja y Cecilia Labbé por el apoyo que me dio cada una en su momento y contexto.

A mi polola por estar siempre ahí, incondicionalmente conmigo, dándome ánimos en momentos difíciles y por recordarme que la vida no es solo estudiar y trabajar.

A mi familia y amigos que de repente se acordaban que estaba en "modo tesis" y me alentaban para que terminara luego (no funcionó mucho jaja).



## TABLA DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Antecedentes Generales .....	1
1.1.1 Expansión, invasividad y mecanismos de dispersión .....	2
1.1.2 Características botánicas de <i>D. geminata</i> .....	6
1.1.3 Consecuencias ambientales y económicas del didymo .....	21
1.2 Antecedentes Específicos: Chile.....	26
1.2.1 Expansión de didymo .....	26
1.2.2 Características químicas y físicas de ríos contaminados.....	30
1.3 Métodos analíticos para cuantificación de fosfato disuelto .....	32
1.4 Planteamiento del Seminario y Área de Estudio seleccionada.....	34
1.5 Hipótesis y Objetivos .....	35
1.5.1 Hipótesis .....	35
1.5.2 Objetivo General .....	35
1.5.3 Objetivos Específicos .....	35
<b>II. METODOLOGÍA</b> .....	<b>36</b>
2.1 Análisis bibliográfico .....	36
2.2 Campaña a terreno.....	36
2.2.1 Puntos de muestreo .....	36
2.2.2 Metodología de muestreo.....	38
2.2.3 Procesamiento de muestras.....	39
2.2.4 Métodos analíticos: caracterización de las muestras de agua .....	40

<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>42</b>
3.1 Revisión Bibliográfica.....	42
3.1.1 Antecedentes del lago Neltume.....	42
3.2.1 Antecedentes de los ríos.....	47
3.2 Resultados de la campaña en terreno .....	52
3.2.1. Observaciones y características de los puntos de muestreo .....	52
3.2. Posibles medidas de control de abundancia .....	59
3.2.1 Manejo de nutrientes.....	59
3.2.2 Regulación del caudal y perturbación del sustrato .....	60
3.2.3 Biocidas (alguicidas) .....	63
3.2.4 Sombreado .....	65
3.3. Prevención de dispersión.....	65
3.4. Observaciones finales.....	66
<b>IV. CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>V. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>
<b>VI. ANEXO.....</b>	<b>82</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Concentraciones de Fosfato en ríos de Vancouver, Canadá, afectados con didymo. Valores promedio entre los años 1989 y 1994 (Bothwell y col. 2009). _____	10
<b>Tabla 2.</b> Resumen de la cronología de <i>D. geminata</i> en Chile. _____	27
<b>Tabla 3.</b> Cronología de Resoluciones e Informes Técnicos emitidos por SUBPESCA y SERNAPESCA desde la primera declaración de emergencia de plaga en Futaleufú hasta la más reciente confirmación de <i>D. geminata</i> . _____	28
<b>Tabla 4.</b> Espesor y cobertura de floraciones algales en 8 puntos de las regiones de La Araucanía y Los Ríos. Campaña de Amakaik en verano 2013. _____	30
<b>Tabla 5.</b> Métodos analíticos usados por trabajos citados en este seminario. _____	33
<b>Tabla 6.</b> Puntos de muestreo: coordenadas, cantidad y tipo de muestras biológicas recolectadas en el bentos y en el plancton, y presencia de <i>D. geminata</i> a 01/2013. _____	38
<b>Tabla 7.</b> Características promedio de dos puntos de muestreo del agua superficial del lago Neltume a noviembre de 2012 (U. Austral de Chile 2012) _____	43
<b>Tabla 8.</b> Características promedio del agua superficial del lago Neltume entre primavera 2006 e invierno 2008, más el invierno de 2010. 8 campañas (Endesa 2010). _____	44
<b>Tabla 9.</b> Características fisicoquímicas y de bacterias promedio del agua superficial del lago Neltume entre diciembre 2012 y diciembre 2013, según campañas de Endesa. _____	45
<b>Tabla 10.</b> Parámetros tróficos promedio del lago Neltume en diciembre de 2013. _____	46
<b>Tabla 11.</b> Rango de características de los ríos del área de estudio según Endesa (2010) y Sernageomin (2003). _____	50
<b>Tabla 12.</b> Características fisicoquímicas promedio del río Fuy entre 2006 y 2014 (DGA) _____	51
<b>Tabla 13.</b> Características fisicoquímicas del agua de los ríos muestreados. Las estaciones de muestreo sin color indican ausencia de floraciones algales masivas, mientras que el color de la celda corresponde al color de la floración. _____	55
<b>Tabla 14.</b> Presencia/ausencia (U. de Chile) y abundancias (Amakaik) absolutas y relativas (en paréntesis) de <i>D. geminata</i> . _____	56
<b>Tabla 15.</b> Porcentaje de cobertura y apariencia de <i>D. geminata</i> en tapetes en intervalos de un metro a lo largo del fondo del río Waitaki en un transecto a lo ancho del canal, aguas abajo de la confluencia con el arroyo Otiake más rico en nutrientes (noviembre de 2008) (Kilroy & Bothwell 2012) _____	89
<b>Tabla 16.</b> Promedios, rangos y valores máximos (en paréntesis) para la clasificación del estado trófico en lagos templados según (Universidad Austral de Chile 2012). _____	90
<b>Tabla 17.</b> Límites para la clasificación trófica de ríos templados según Dodds y col. (1998) _____	90



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución mundial de los registros de <i>D. geminata</i> (Whitton y col. 2009) _____	2
<b>Figura 2.</b> Mapa del mundo que predice las regiones con hábitats aptos para <i>D. geminata</i> (Mapa por McNyset, U.S. Environmental Protection Agency, en Spaulding & Elwell 2007) _____	3
<b>Figura 3.</b> Pescador norteamericano en un río argentino (izquierda, por Matt Wilhelm, Federation of Fly Fishers) y botas de neopreno con suela de fieltro sobre una floración didymo (derecha, por Sara Spaulding) (Spaulding & Elwell 2007). _____	5
<b>Figura 4.</b> Didymo cubriendo un bolón. El autor (Bothwell 2012) destaca los 3-4 cm de material extracelular (café claro) y las células superficiales vivas o viables (< 0,5 mm). _____	6
<b>Figura 5.</b> Célula viva o viable de <i>D. geminata</i> , con algunas <i>Achnanthydium</i> spp. adheridas a su tallo (izquierda); numerosas células de <i>D. geminata</i> y sus tallos (centro); floración de didymo en el río Espolón, Chile (derecha). Imágenes de Spaulding 2010. _____	8
<b>Figura 6.</b> Concentración promedio de Fosfato en el tiempo, en dos ríos de Nueva Zelanda que alguna vez presentaron floraciones didymo, expresadas con color beige (Kilroy 2013). _____	11
<b>Figura 7.</b> Células de <i>D. geminata</i> y sus tallos teñidos en la parte alta, indicando la ubicación de la fosfomonoesterasa. _____	11
<b>Figura 8.</b> Efectos de <i>D. geminata</i> y hierro en el fósforo disuelto. Tasa de remoción de fósforo por sustratos con y sin didymo (cuadrados negros y círculos blancos, respectivamente), de una solución de 20 µg(P)/L y hierro añadido hasta 0,3 mg/L (Bothwell y col. 2012) _____	12
<b>Figura 9.</b> Fósforo total (µg/L) versus frecuencia de sitios con <i>D. geminata</i> presente en ríos del oeste de Estados Unidos (izquierda). Nitrato (mg/L) versus frecuencia de sitios con <i>D. geminata</i> presente (derecha). (Fuente: Spaulding & Elwell 2007) _____	13
<b>Figura 10.</b> Longitud de tallos de <i>D. geminata</i> en función de la radiación activa fotosintéticamente (PAR), a 3 distintas temperaturas. Las líneas representan relaciones significativas. (Fuente: Kilroy & Bothwell 2011) (Adaptado). _____	16
<b>Figura 11.</b> Floración didymo en el lago Nahuel Huapi, Argentina. (A) Detalle de la proliferación de <i>D. geminata</i> , (B) Primer plano del desarrollo de <i>D. geminata</i> sobre las piedras. (Fuente: Beamud y col. 2013) _____	19
<b>Figura 12.</b> Una rejilla de un canal de suministro de agua es tapada por floraciones de didymo. La superficie oscura son principalmente células, y la clara, tallos (Spaulding & Elwell 2007). _	24
<b>Figura 13.</b> Diferentes tonalidades de didymo en Nueva Zelanda (Fuente: Kilroy 2012). _____	25
<b>Figura 14.</b> Fotografías del río Lower Waiau, antes (2004) y después (2012) de la invasión de didymo (Imágenes por Kilroy 2013). _____	25



<b>Figura 15.</b> Ubicación aproximada del Área de Estudio seleccionada (círculo rojo). Subcuenca del Río Valdivia Alto, XIV Región de Los Ríos, Chile. _____	34
<b>Figura 16.</b> Ubicación de los puntos de muestreo en ríos Fuy, Neltume, Chanchán y Llanquihue. Subcuenca del río Valdivia Alto (Imagen original de Google Earth®, (-39.833, -71.977)). Puntos rojos, verde y azules significan respecto de <i>D. geminata</i> : “presencia”, “ausencia” y “sin datos”, respectivamente, basado en Amakaik-EcoHyd (2013). _____	37
<b>Figura 17.</b> Mapa geológico del área de estudio (Sernageomin 2003). En rojo y al centro: río Fuy _____	47
<b>Figura 18.</b> Precipitaciones y caudales mensuales promedio de río Fuy desde 2006 (DGA). _	48
<b>Figura 19.</b> Resultados en cuanto a presencia y ausencia de <i>D. geminata</i> en los ríos del área de estudio; puntos rojos y verdes respectivamente. _____	54
<b>Figura 20.</b> Frecuencia de células en división en el primer estudio de Bothwell & Kilroy (2011) ante distintos niveles de nutrientes en función del tiempo en días. _____	82
<b>Figura 21.</b> Longitud promedio de tallos ante distintos tratamientos de luminosidad y nutrientes. Barra sin color: agua del río Waitaki. (a) Barra negra: +100 y +10 µg/L de N y P respectivamente. (b) Barras rayadas y negras: +5 y +50 µg/L de P respectivamente. _____	83
<b>Figura 22.</b> Longitud de tallo promedio de <i>D. geminata</i> en función de la frecuencia de células en división (Kilroy 2013). _____	83
<b>Figura 23.</b> Relación significativa entre (a) frecuencia de células en división (FDC) y promedio del fósforo disuelto promedio, y (b) FDC y crecimiento algal (SCI) en 15 ríos de la Isla Sur de Nueva Zelanda donde <i>D. geminata</i> estaba presente (Fuente: Kilroy & Bothwell 2012) _____	84
<b>Figura 24.</b> Relación entre el Fosfato disuelto promedio y el índice de crecimiento algal en los 31 sitios muestreados por Kilroy & Bothwell (2012) (Fuente: Kilroy 2013) _____	85
<b>Figura 25.</b> Comparación floraciones didymo en dos ríos neozelandeses, con nivel de Fosfato promedio de 7,5 y <3 µg/L respectivamente (Kilroy 2013) _____	86
<b>Figura 26.</b> (a) Biovolumen algal en 31 sitios estudiados entre enero y marzo de 2010. (b) Porcentaje de cobertura en cada sitio según 6 categorías. Los sitios fueron ordenados en orden creciente de Fosfato disuelto, mostrado en (a). (Kilroy & Bothwell 2012) _____	87
<b>Figura 27.</b> Gradiente de didymo controlado por nutrientes. Confluencia del arroyo Otiake y un brazo del río Waitaki, NZ (Bothwell 2012). Los nutrientes son: Nitrato, Fósforo disuelto total (TDP) y Fósforo reactivo disuelto o Fósforo de Fosfato (DRP). _____	88

## RESUMEN

La microalga *Didymosphenia geminata* (descrita por Lyngbye en 1819) es una diatomea bentónica de agua dulce, formadora de tallos extracelulares, que empezó a ser foco de investigación luego de que mundialmente se expandiera, con mayor biomasa, a fines de los años 80's. Si bien no es tóxica, puede provocar diversos impactos en ambientes (ultra)oligotróficos: a la biodiversidad, a la generación hidroeléctrica, al turismo, entre otros.

A pesar de numerosos estudios internacionales aún no hay consenso sobre los factores ambientales específicos que expliquen su actual distribución mundial a cabalidad. Sin embargo, la variable más recurrente es el fósforo reactivo disuelto o Fosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), para el cual se han encontrado relaciones negativas entre su concentración y la biomasa y también la presencia de *D. geminata* en ríos de diversos países (Canadá, EE.UU., Inglaterra, Nueva Zelanda y España). No obstante, en Chile no se ha podido establecer alguna relación negativa. Esto debido en gran parte a dos factores: 1) en varios estudios, los límites de detección de los métodos cuantificadores de Fosfato no fueron lo suficientemente bajos, impidiendo determinar su concentración, y 2) no existe un monitoreo sistemático en el tiempo de los ríos afectados que permita analizar la relación Fosfato/Biomasa-didymo (como en Nueva Zelanda). Inclusive, en un estudio se aprecia lo que pareciera ser una relación positiva entre el nivel de Fosfato y la biomasa (más Fosfato, más biomasa de *D. geminata*).

En Nueva Zelanda se han probado métodos para controlar o eliminar esta plaga, como regular el caudal post-represas y el uso de biocidas, pero no han sido muy efectivos en el largo plazo. Debido a esto, sólo es posible intentar controlar su propagación, o bien intentar entender por qué florece desmesuradamente y concentrar los esfuerzos en evitar este fenómeno de crecimiento masivo.

En este estudio en la subcuenca del río Valdivia Alto (Chile), la información obtenida no fue suficiente para relacionar con significancia estadística la distribución o abundancia de *D. geminata* a factores ambientales químicos o físicos, pero a nivel área de estudio y puntualmente en el tiempo, se encontró que no hay relación entre la abundancia de *D. geminata* y la concentración de fosfato o las características del sustrato, que son las variables más relevantes según la literatura científica además del caudal, el cual en este estudio no se caracterizó minuciosamente.

Finalmente se llegó a la conclusión de que, como el problema es la abundancia de tallos (biomasa) y su distribución ha aumentado y además varía año a año, los esfuerzos deberían concentrarse en buscar aquellos parámetros ambientales que afecten su abundancia en Chile, monitoreando química y biológicamente los ríos en épocas de crecimiento celular (primavera-verano), considerando los posibles caudales altos y prefiriendo métodos analíticos con bajos límites de detección, particularmente de  $\text{PO}_4^{3-}$ , por ejemplo el SM 4500-P E del ácido ascórbico.



## ABSTRACT

The stalked, freshwater benthic diatom *Didymosphenia geminata* (Lyngbye in 1819) began to be a focus of investigation when it drastically shifted its original habitat and historic abundance by the end of the 80's. While it is non-toxic, it can trigger several impacts in (ultra)oligotrophic environments: biodiversity, hydroelectric generation, tourism, and others.

Despite numerous international studies, there are still no environmental factors that could fully explain its worldwide distribution. The most recurrent factor is the dissolved reactive phosphorus or phosphate (DRP,  $PO_4^{3-}$ ). A negative correlation has been found between DRP concentration and both *D. geminata* biomass and presence in several rivers of many countries (Canada, USA, England, New Zealand and Spain). However, no negative correlations have been established in Chile. This is mainly due to two factors: 1) in several studies, the methods' detection limits for phosphate were not low enough, impeding to determinate its concentration; and 2) there is no systematic monitoring of affected rivers over time to allow analysis of the DRP/didymo biomass relationship (as in New Zealand). In controversy, a study done by Amakaik-Ecohyd showed a positive correlation between DRP level and didymo biomass (the more phosphate, the more didymo biomass).

Methods to control or eradicate this pest have been tested in New Zealand, like flushing flows and the use of biocides, but they haven't been very effective in long-term. Therefore it is only possible to attempt to control its spreading, or try to



understand why does it grow excessively, and focus the efforts in avoid that phenomenon of massive growing.

In this study of the High Valdivia River subbasin (Chile), the data was not enough to correlate the distribution or abundance of *D. geminata* with environmental factors, whether physical or chemical. Nonetheless, at study area level and punctually in time, it has been found that there is no relationship between *D. geminata*'s abundance and phosphate concentration nor substrate characteristics, which are the most relevant variables according to scientific literature in addition to river flow, which couldn't be meticulously characterized in this study.

In conclusion, researches should focus on finding environmental parameters that affect didymo abundance in Chile, because the actual problem is the increase in biomass and its distribution, which varies every year. Researchers should also focus on monitoring rivers, both chemically and biologically, during algal growth periods (spring-summer). Studies should consider naturally high flows and prefer analytical methods with low detection limits, in particular for DRP, for example SM 4500-P E Ascorbic Acid Method.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes Generales

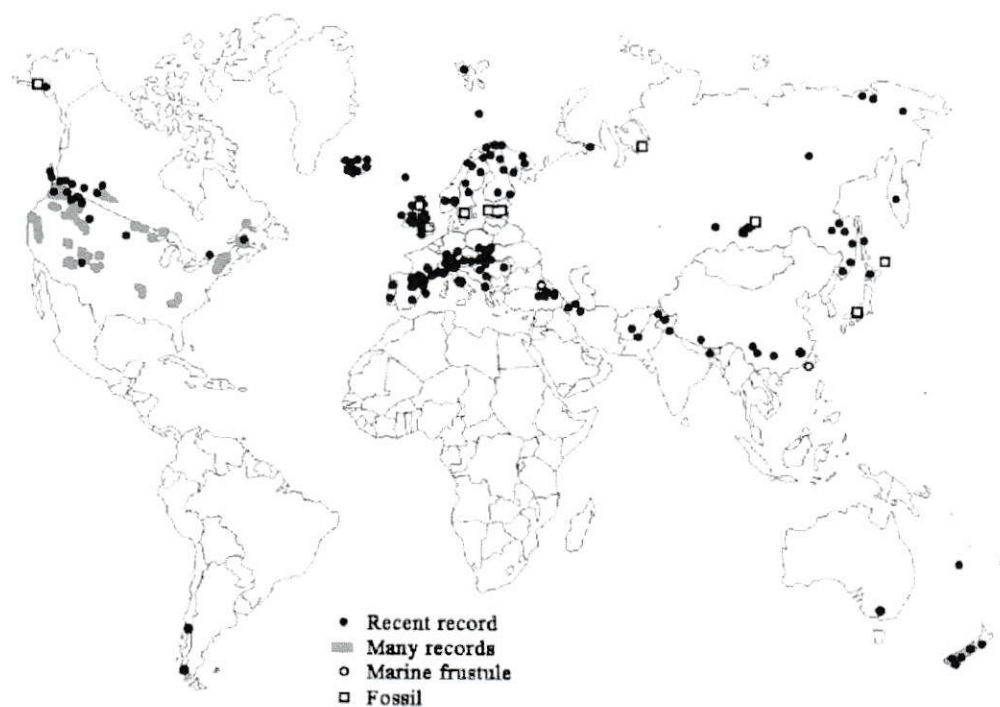
Hasta el año pasado, y seguramente hasta hoy, *D. geminata* se describía como una peste de imposible erradicación en Nueva Zelanda (Hammond 2013), y probablemente en el resto del mundo también, dado que los intentos por eliminarla han sido inefectivos y/o ineficientes. Incluso si se usase un biocida altamente eficiente, existe una probabilidad alta de algunas células sobrevivan (Flöder & Kilroy 2009), pudiendo repoblar el área.

Nacional y mundialmente se han realizado decenas de estudios buscando relaciones significativas entre parámetros ambientales y la distribución de *D. geminata*, pero con éxito relativo, e incluso son contradictorios con otros países. A esto se suma el hecho de que en este tipo de estudio se supone implícitamente que todos los ríos del análisis han estado en contacto con la microalga, y el que no la tenga presente, se califica como con características no-aptas para *D. geminata*. Es decir, sucede que año a año *D. geminata* expande su hábitat, por lo que si se estudia el patrón de distribución un determinado año, al año siguiente nuevos ríos pueden estar colonizados y resulta que en el año anterior habían catalogado como no-aptos para *D. geminata*.

A continuación se presenta una revisión bibliográfica actualizada de los distintos aspectos involucrados en la presencia de *D. geminata* en cursos de agua y su expansión en Chile.

### 1.1.1 Expansión, invasividad y mecanismos de dispersión

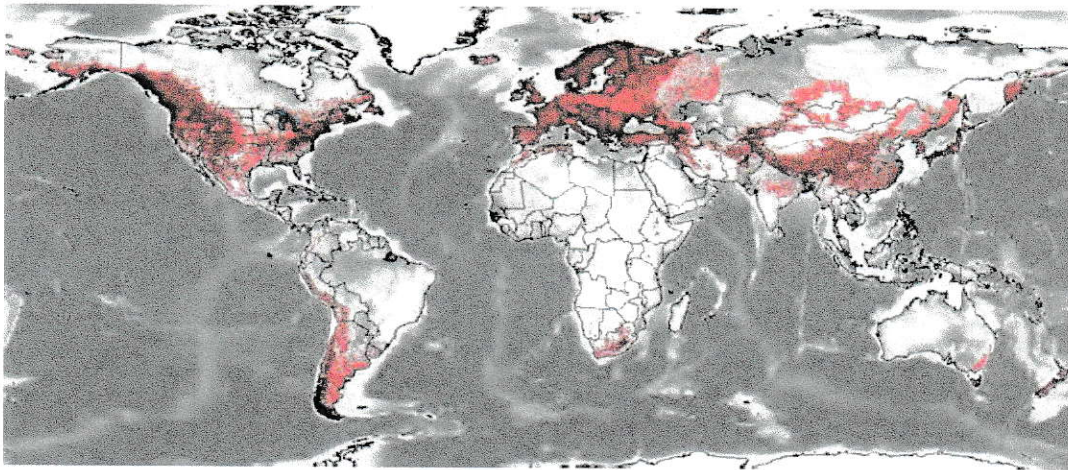
Desde sus primeras floraciones nocivas y raras en 1988, en Vancouver Canadá, *D. geminata* se ha esparcido rápidamente a nivel mundial. Su distribución aproximada hasta el año 2009 (Figura 1) fue creada a partir de los registros de sus células. Por otro lado, su capacidad invasiva se ilustra en la Figura 2, un mapa que muestra los sitios susceptibles de ser colonizados eventualmente por esta microalga.



**Figura 1.** Distribución mundial de los registros de *D. geminata* (Whitton y col. 2009)

La dispersión de *D. geminata* es muy rápida, característica de las especies invasoras. De manera natural lo hace siguiendo el curso de los ríos y lagos, y también se sabe que algunos animales pueden transportar células vivas de *D. geminata*, sobre todo aves, peces y mamíferos, incluso el viento (Kilroy 2004). Algunos parámetros o mecanismos responsables de su dispersión se describen a continuación.





**Figura 2.** Mapa del mundo que predice las regiones con hábitats aptos para *D. geminata* (Mapa por McNyset, U.S. Environmental Protection Agency, en Spaulding & Elwell 2007)

- **Cambio Climático.** Se cree que su capacidad invasiva fue incrementada por el cambio climático, el cual ha resultado en inviernos más calientes y una mayor radiación ultravioleta (Kilroy 2004). Esto también es mencionado por Bothwell & Spaulding (2008), pero como una especulación de que el calentamiento global se puede asociar al cambio en la distribución de *D. geminata*.

El aumento de radiación UV puede favorecer el crecimiento en biomasa de *didymo* ya sea por la disminución de sus depredadores o por la limitación de otras especies de algas que competirían por su hábitat (Dahlberg 2010).

También, un deshielo prematuro y fuerte en primavera disminuiría los nutrientes para la estación de crecimiento (verano), así como también la cobertura de nubes, aumentando la radiación fotosintéticamente activa; entre otros factores (Taylor & Bothwell 2014)

- **Dispersión natural.** La más parsimoniosa es la que se da cuando existe *didymo* en zonas altas de las cuencas, que por efecto de la corriente es llevado hacia



aguas abajo, pudiendo las células eventualmente asentarse en un sustrato y proliferar. Luego existe la dispersión por animales, ya sea acuáticos, terrestres o voladores, silvestres o domésticos. En general la fauna es un vector potencial de dispersión (Spaulding & Elwell 2007). Un ejemplo acuático/terrestre es el caso del visón<sup>1</sup> americano (*Neovison vison*), especie introducida en Chile y considerada plaga, que es capaz de transportar células vivas de *D. geminata* (Bus Leone y col. 2014). Estos autores también plantean que salmones y truchas podrían transportar la microalga adherida a sus mucosidades o escamas.

Finalmente, una dispersión aérea natural se puede dar por el viento y por las aves, aunque el primero ocurre más bien en diatomeas marinas (Kilroy 2004). Asimismo es raro y poco estudiado el transporte por aves, que se puede dar por la ingesta y posterior expulsión de células viables de *D. geminata*, o por haber sido llevadas en patas y/o plumas, pero nunca por distancias muy largas, por lo que se habla de dispersión local (Kilroy 2004). Cabe destacar que Bus Leone y col. (2014) durante su estudio en Chile encontraron gansos posados en floraciones de didymo, por lo que el contacto entre aves y microalgas existe

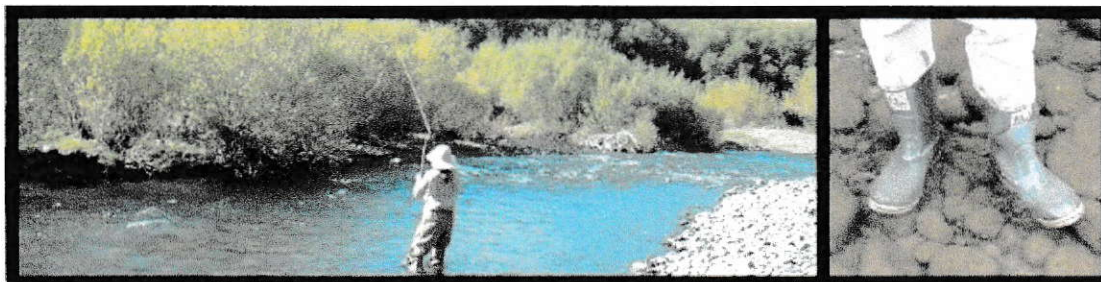
**Dispersión antropogénica.** Se cree que esta vía es la responsable de llevar *D. geminata* entre países, y sobre todo entre continentes (la llegada a América del Sur y a Nueva Zelanda) debido a la capacidad de soportar varios días fuera de su hábitat. En la isla sur de Nueva Zelanda, la microalga se esparció de tal manera y velocidad que sugiere que se trata de una dispersión humana, puesto que la mayoría de los sitios con *D. geminata* son muy accesibles y con intensa actividad recreativa como pesca, *kayaking* y uso de vehículos todo-terreno (Kilroy 2008). Kilroy & Unwin (2011),

---

<sup>1</sup> Un mustélido, como las comadrejas, hurones y nutrias.

encontraron que los vectores más probables de dispersión fueron pesca y *kayaking*, siguiéndole moto-lanchas, canales de hidroelectricidad o regadío y el uso de vehículos 4x4, siendo menos importante las actividades de picnic, natación y el acarreo de ganado. Cada una de estas vías influye de manera diferente si la dispersión es aguas arriba, aguas abajo o entre ríos.

Asimismo en EE.UU. *D. geminata* también fue potencialmente transportada por pescadores, su equipaje (Figura 3) y por otras actividades recreacionales (Kirkwood y col. 2007; Bothwell y col. 2009). Sin embargo, Schweiger y col. (2011) encontraron floraciones en lugares remotos de Montana EE.UU., las cuales rara vez o nunca son visitadas, por lo cual esta no sería la única vía de dispersión.



**Figura 3.** Pescador norteamericano en un río argentino (izquierda, por Matt Wilhelm, Federation of Fly Fishers) y botas de neopreno con suela de fieltro sobre una floración didymo (derecha, por Sara Spaulding) (Spaulding & Elwell 2007).

En cuanto a materiales adecuados para el transporte de *D. geminata*, Kilroy y col. (2007a) encontraron que las botas con suela de fieltro (Figura 3 derecha) transportan fácilmente a las células, comparado con las de cuero, goma y neoprán. Es por esto principalmente que en siete estados de EEUU y Nueva Zelanda se ha prohibido el uso de botas con suela de fieltro (Taylor & Bothwell 2014).

### 1.1.2 Características botánicas de *D. geminata*

*Didymosphenia geminata* (reino Protista) es una diatomea bentónica<sup>2</sup> de agua dulce, descrita por Lyngbye en 1819 en las Islas Faroe<sup>3</sup> bajo el nombre *Echinella geminata* (hoy sinónimo de *D. geminata*, y de *Gomphonema geminatum*) (Spaulding 2010). Debido a su aspecto (Figura 4), se la denomina comúnmente “Moco de Roca” (*Rock Snot*) o “didymo”.



**Figura 4.** Didymo cubriendo un bolón. El autor (Bothwell 2012) destaca los 3-4 cm de material extracelular (café claro) y las células superficiales vivas o viables (< 0,5 mm).

Si bien las diatomeas son importantes pues alcanzan a representar un 25% de la producción primaria de carbono orgánico, el interés en el estudio del didymo se basa principalmente en que se convirtió en un alga invasora y molesta, luego de haber permanecido catalogada como “rara y poco frecuente” (Spaulding & Elwell 2007).

Como todas las diatomeas, además de luz, *D. geminata* necesita nutrientes para crecer y desarrollarse, pero esta microalga, contrariamente a la mayoría de los microorganismos, tiene la particularidad de aumentar su biomasa prefiriendo sistemas oligotróficos (Kilroy 2004, Whitton y col. 2009, Reid & Torres 2014). Además, puede vivir en ríos poco contaminados, montañosos de relativa alta turbulencia y cizallamiento (tensión de corte) (Kirkwood y col. 2007). En este mismo sentido, es muy

<sup>2</sup> Habita normalmente en el bentos, en la comunidad del fondo acuático.

<sup>3</sup> En el Atlántico Norte entre Islandia, Reino Unido y Noruega.



difícil encontrar reportes de floraciones de algas epilíticas (sobre rocas) en sistemas lóticos (ríos, arroyos) oligotróficos, pero esta diatomea parece ser una excepción (Kirkwood y col., 2009). Algunos autores llaman a esta situación “la paradoja del didymo” (Cullis y col. 2012)

### 1.1.2.1 Floración de didymo

Dentro de los centenares de géneros de diatomeas existentes, *Didymosphenia* es uno de los escasos (junto con *Gomphonema*, *Gomphoneis*, *Cymbella*) que producen material extracelular del tipo “tallo”, como un pedúnculo que nace de su base (Furey y col. 2014) con la cual se mantiene adherida al sustrato. Asimismo, cabe destacar que su reproducción principal es vegetativa, es decir asexual, de manera que cuando una célula se divide, su tallo también lo hace (Spaulding & Elwell 2007).

Cuando didymo crece demasiado, corresponde a una floración algal (FAN), definida como “masas de células y tallos que se extienden por más de 1 km y persisten por varios meses del año” (Spaulding & Elwell 2007). El material extracelular (cola, tallo o pedúnculo) difiere del resto de diatomeas (Gretz 2008) y de las típicas matas de perifiton<sup>4</sup> ya que no se desprende fácilmente cuando envejece ni con la agitación del flujo (Miller y col. 2009).

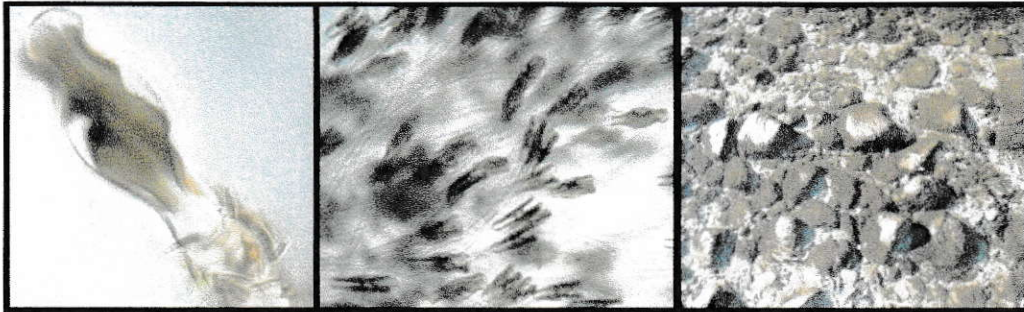
Las FAN de la microalga presentan diversos impactos pero el de más fácil verificación, cuando alcanza cierto nivel, es el visual o estético, pues las floraciones de aspecto viscoso cubren parcial o totalmente el sustrato de ríos (Figura 5 derecha) y las orillas de los lagos. Además de recubrir bolones, pueden ocurrir sobre vegetación y objetos

---

<sup>4</sup> Comunidad compleja de algas, cianobacterias, microorganismos heterótrofos y detritus que se encuentra recubriendo las superficies sumergidas en la mayoría de los ecosistemas acuáticos



no naturales, adoptando diversas formas. Asimismo, los tapetes de didymo pueden alcanzar 20 cm de grosor y extenderse por más de 20 km (Blanco & Ector 2009).



**Figura 5.** Célula viva o viable de *D. geminata*, con algunas *Achnanthydium spp.* adheridas a su tallo (izquierda); numerosas células de *D. geminata* y sus tallos (centro); floración de didymo en el río Espolón, Chile (derecha). Imágenes de Spaulding 2010.

Las floraciones son molestas por su material taloso, que compone alrededor del 90% de la colonia (McLaughlin 2009) y contiene principalmente polisacáridos sulfatados con alto contenido de ácido urónico, y de proteínas, muy resistentes a la degradación (Gretz 2008) (Figura 5 centro). Su biomasa es 250 veces mayor que el contenido de clorofila, indicando que los tallos extracelulares son los responsables del gran grosor de las floraciones, y no las células (Larned y col. 2006).

#### 1.1.2.2 Factores determinantes de floraciones

Desde sus primeras floraciones en Vancouver, se ha visto que la tolerancia de didymo a los cambios en el hábitat ha aumentado. Hasta finales del año 2010, se describía como más frecuente en aguas frías y montañosas (Kumar y col. 2009), con velocidades moderadas, sustrato estable (Kilroy y col. 2006), flujo bajo y constante (Sherbot & Bothwell 1993; Kirkwood y col. 2007) y con alta luminosidad (Lindstrøm & Skulberg 2008). Cabe destacar que se habla principalmente de su distribución, y se describen parámetros más bien físicos e hidrológicos, puesto que con los químicos

aún no se habían logrado conclusiones como las de Kilroy & Bothwell (2011) sobre Fósforo y Nitrógeno, además, las relaciones entre didymo y la química del agua seguían pobremente entendidas (Rost y col. 2011). A continuación se revisa el efecto de algunos parámetros físicos y químicos en el crecimiento de didymo.

#### 1.1.2.2.1 Parámetros Químicos

El comportamiento de *D. geminata* es diferente al resto de las algas y otros organismos, que en general proliferan en condiciones eutróficas (Kirkwood y col. 2009; Bothwell & Kilroy 2011). Y si bien Kawecka & Sanecki (2003) reportaron didymo en ríos mesotróficos de Polonia, las floraciones solo se daban inmediatamente después de represas, las cuales incrementan la claridad del agua mediante la sedimentación de partículas, sirviendo de sumidero de nutrientes, y particularmente fósforo (Kirkwood y col. 2009).

- **Fósforo.** En Nueva Zelanda las floraciones de didymo ocurren en ríos con concentraciones de Ortofosfato o Fosfato menor a 15  $\mu\text{g/L}$  como promedio (Bothwell & Kilroy 2011). Esto es concordante con Miller y col. (2009) que definen a *D. geminata* como especie frecuente en sistemas con bajas concentraciones de fósforo, y a su vez con Bothwell y col. (2009) quienes mostraron que las floraciones de didymo iniciadas en 1989 en Vancouver, Canadá, se dieron solo en ríos con niveles de Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) entre 6,6 y 13,2  $\mu\text{g/L}$  como promedio (Tabla 1).

**Tabla 1.** Concentraciones de Fosfato en ríos de Vancouver, Canadá, afectados con didymo. Valores promedio entre los años 1989 y 1994 (Bothwell y col. 2009).

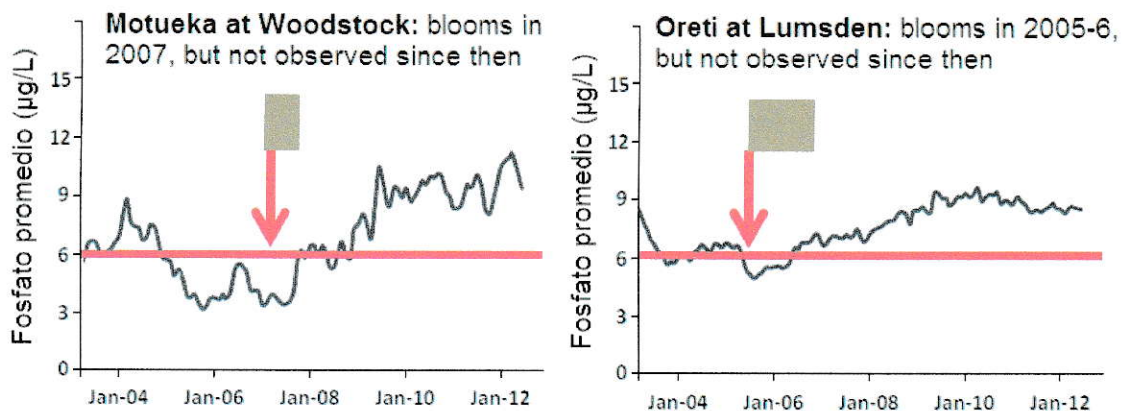
Río	[PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ] (µg/L)	Río	[PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ] (µg/L)	Río	[PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ] (µg/L)
Heber	6,6	Oyster	9,3	Little Qualicum	13,2
lower Gold	6,6	Somass	9,6	Englishman	6,9
Stamp	10,8	Puntledge	8,1	Nanaimo	9,6

Asimismo, no existen floraciones de didymo en ríos aguas abajo de descargas puntuales nutritivas, en Vancouver Canadá, (Bothwell & Kilroy 2011) ni en Lamerbreras España (Ladrera y col. 2015), donde el componente principal es el Fosfato. Por ejemplo en esta última referencia, el nivel de Fosfato aumentó de 42 µg/L antes de la descarga a 297 µg/L después de ella.

Y así como también, en Nueva Zelanda, didymo no está presente en arroyos alimentados por manantiales con alto contenido de nutrientes, que fluyen a ríos principales oligotróficos fuertemente atacados por el alga, a pesar de las inoculaciones repetidas durante inundaciones (Larned y col. 2007; Sutherland y col. 2007).

Estos sucesos sugieren que *D. geminata* no se desarrollaría, o al menos no completamente, en aguas ricas en nutrientes particularmente Fosfato. Relacionado con esto, según Lindstrøm & Skulberg (2008), en Noruega la diatomea tiende a desaparecer cuando el carbono orgánico total excede los 6,5 mg/L y el fósforo total los 20 µg(P)/L (60 µg(PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)/L si correspondiera a Fosfato). Por su parte, Kilroy (2013), muestra 2 ríos donde didymo desapareció luego de que la concentración de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> superara de 6 µg/L (Figura 6).

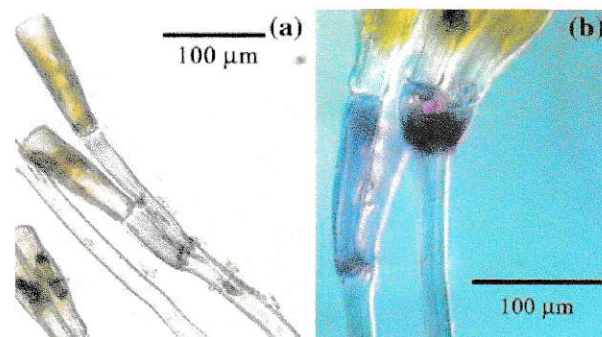




**Figura 6.** Concentración promedio de Fosfato en el tiempo, en dos ríos de Nueva Zelanda que alguna vez presentaron floraciones didymo, expresadas con color beige (Kilroy 2013).

Varios estudios en Nueva Zelanda han investigado la relación entre el Fosfato disuelto y *D. geminata* (ver Anexo) encontrando que la tasa de división celular de *D. geminata* aumenta con la concentración de Fosfato disuelto en tanto las floraciones disminuyen.

En presencia de **fósforo orgánico**, el crecimiento se ve favorecido en ríos del Reino Unido (Ellwood & Whitton 2007) donde este nutriente es la mayor fuente de fósforo. La diatomea utiliza una enzima ubicada en la parte alta de sus tallos (Figura 7) con la que puede aprovechar el fósforo orgánico del agua, cuando el inorgánico (de fácil disponibilidad) es deficiente.



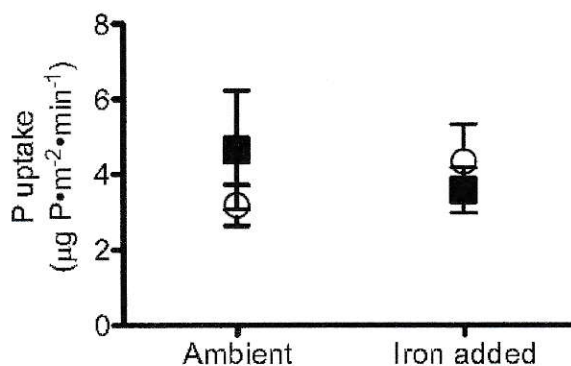
**Figura 7.** Células de *D. geminata* y sus tallos teñidos en la parte alta, indicando la ubicación de la fosfomonoesterasa.



El esquema general de la reacción se presenta a continuación, donde “R” corresponde al resto de la molécula orgánica y HOH corresponde a H<sub>2</sub>O.



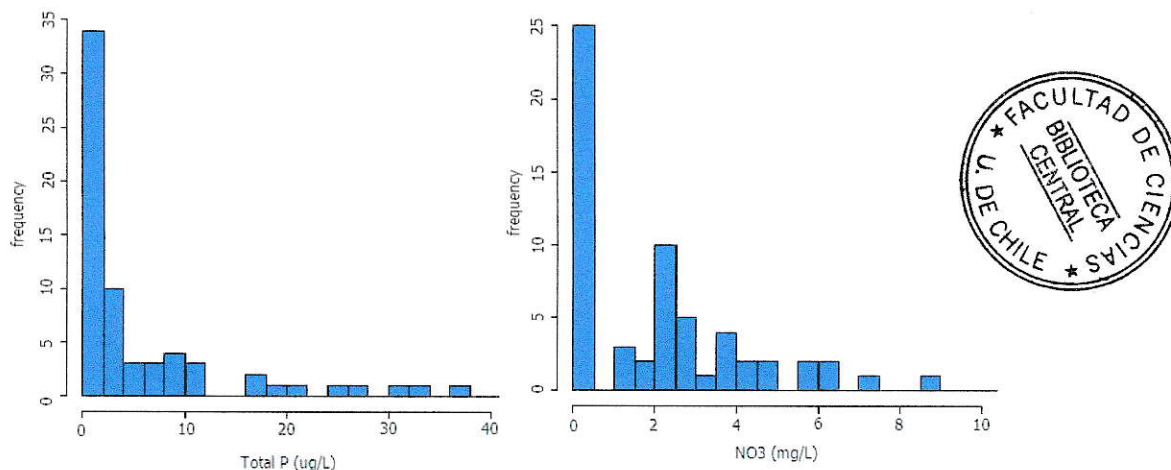
- **Hierro.** La mayoría de las floraciones masivas se dan en ríos pobres en hierro, consecuente con los resultados de James y col. (2014) respecto de la cobertura. Aunque Sundareshwar y col. (2011) describen que *D. geminata* es capaz de absorber fósforo adicional utilizando hierro y capturarlo en sus tallos mediante un proceso óxido-reducción, sus resultados fueron desestimados dado que las condiciones experimentales utilizadas se alejaban de la situación real (Bothwell y col. 2012). Experimentos posteriores (Bothwell y col. 2012) mostraron que el enriquecimiento de hierro en el agua no aumentaba la absorción de Fósforo por parte de la diatomea (Figura 8).



**Figura 8.** Efectos de *D. geminata* y hierro en el fósforo disuelto. Tasa de remoción de fósforo por sustratos con y sin didymo (cuadrados negros y círculos blancos, respectivamente), de una solución de 20 µg(P)/L y hierro añadido hasta 0,3 mg/L (Bothwell y col. 2012)

- **Nitrógeno.** *D. geminata* en EEUU se presenta más frecuentemente en ríos con aguas pobres tanto en fósforo (total) como en nitrógeno (Nitrato), como se ve en la Figura 9. Si bien éste es un nutriente esencial, en los experimentos de Bothwell &

Kilroy (2011) su adición solo provocó un aumento inicial de la frecuencia de división celular, que no se mantuvo en el tiempo. Sin embargo, Miller y col. (2009) no encontraron una correlación significativa entre el N inorgánico disuelto y la abundancia de *D. geminata*, en Colorado, EEUU.



**Figura 9.** Fósforo total ( $\mu\text{g/L}$ ) versus frecuencia de sitios con *D. geminata* presente en ríos del oeste de Estados Unidos (izquierda). Nitrato ( $\text{mg/L}$ ) versus frecuencia de sitios con *D. geminata* presente (derecha). (Fuente: Spaulding & Elwell 2007)

- **Calcio.** Se requiere una cantidad mínima de calcio para el desarrollo de esta alga, aunque en diversos países los límites pueden diferir (Whitton y col. 2009). Por ejemplo, en un estudio de 35 ríos de Sierra Nevada, California EE.UU. (Rost y col. 2011) se encontró una correlación positiva entre porcentaje de calcio y la presencia de *D. geminata*. En Noruega no se ha encontrado *D. geminata* en aguas correspondientes a la zona suroeste del país con concentraciones de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) menores a 1,8  $\text{mg/L}$ , (Lindstrøm & Skulberg 2008).

Algunos valores altos de calcio en cuerpos de agua con *D. geminata* son el Lago Baikal, Rusia, con un valor que bordea los 15  $\text{mg/L}$  (Whitton y col. 2009), y aún más altos son 5 ríos de Polonia, cuyo calcio promedio es de unos 45  $\text{mg/L}$  (Kawecka &

Sanecki 2003). Por último, Hammond (2013) en NZ encontró que el calcio geológico (aquel presente en el lecho de la cuenca y disponible con previa meteorización) era determinante en la colonización de *D. geminata*.

- **Silicio.** Hammond (2013) menciona que no hay estudios de colonización ni crecimiento. Dado que este nutriente es necesario para la formación de la frústula (pared celular) en las diatomeas (Kilroy 2004; Tapia 2012), y es esencial para la división celular y el crecimiento (Cullis y col. 2012), éste debe estar presente, pero no se especifica si necesariamente en el agua o en sustratos finos (Whitton y col. 2009). Sólo en dos publicaciones se menciona que se presentó mayor sílice (o silicatos, según referencia) en ríos con *D. geminata*, pero los datos fueron insuficientes para concluir si es un factor conectado con los *blooms* (Sherbot & Bothwell 1993).

- **Sulfato.** Lindstrøm & Skulberg (2008), en Noruega, determinaron que *D. geminata* requiere una concentración mínima de 2,5 mg/L de sulfato para proliferar, lo que puede tener sustento en que los tallos de didymo se componen principalmente de polisacáridos sulfatados y proteínas (Gretz 2008).

En Sierra Nevada EEUU, Rost y col. (2011) encontraron que los ríos con presencia de *D. geminata* tenían en promedio 2 a 3 veces más sulfato que los sin la microalga, pero no mencionan floraciones o *blooms*. Además, algunos ríos con *D. geminata* tenían menos sulfato del sugerido por Lindstrøm & Skulberg (2008), por lo que aparentemente no es un requisito determinante para su presencia.

- **pH.** Pocos estudios han encontrado correlaciones entre el valor de pH y la presencia de *D. geminata* o diferencias significativas entre sitios con o sin didymo (p. ej., Kirkwood y col. 2007; Amakaik-EcoHyd 2013). Sherbot & Bothwell (1993) no



encontraron una relación con el pH en Vancouver, Canadá. Si bien en Noruega no se ha encontrado didymo en ríos con pH menor a 6,5 (Lindstrøm & Skulberg 2008), en Nueva Zelanda se ha registrado hasta a pH 9,62 (Larned y col. 2007).

- **Contaminantes.** Inicialmente *D. geminata* era descrita en ríos prístinos y libres de contaminación (Blanco & Ector 2009), incluso fue usada como bioindicadora de estas condiciones (Kirkwood y col. 2007), concordando con la descripción de Lindstrøm & Skulberg (2008) de que esta diatomea es sensible a la contaminación. Sin embargo, se detectó en Polonia (Kawecka & Sanecki 2003) y en el río Tisza, Serbia (Subakov-Simic & Cvijan 2005), con ingreso de nutrientes antrópicos en el primer caso, y altos niveles de amonio y metales en el segundo, incluso con un evento de contaminación por cianuro en el 2000. Por otro lado, Jellyman y col. (2011) mencionan a autores noruegos de 1991 quienes presenciaron ausencia de didymo en un río contaminado por la minería, incluyendo una concentración de cobre de 8 µg/L.

#### 1.1.2.2.2 Parámetros Físicos

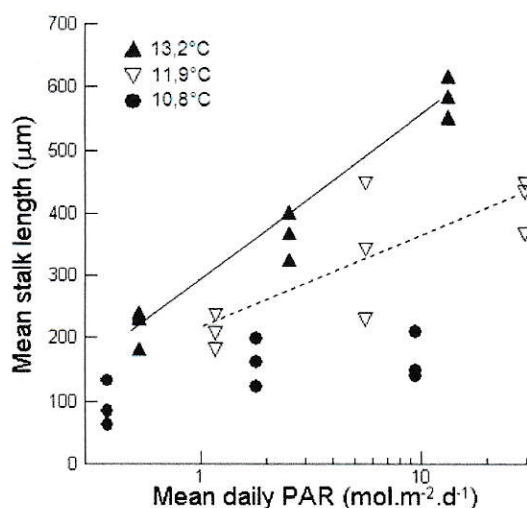
- **Temperatura.** Aunque *D. geminata* prefiere aguas frías (Kilroy 2004; Whitton y col. 2009), se ha informado presencia de colonias en un rango de 0-27°C en varios países (Tapia 2012, Whitton y col. 2009; Spaulding y Elwell 2007, Schweiger y col. (2011). Sin embargo, la biomasa es mayor cuando en el periodo de reproducción no se superan los 18°C (Lindstrøm & Skulberg 2008).

A pesar del gran rango de temperatura, Cullis y col. (2012) consideran que éste sigue siendo un factor importante en la definición del hábitat (revisar Kumar y col. 2009; Whitton y col. 2009) aunque en ríos más fríos frecuentemente hay bajos nutrientes y



alta luminosidad, lo cual puede ser más relevante que la temperatura al comienzo de la formación de los tallos.

Sin embargo en experimentos realizados por Kilroy & Bothwell (2011) a 11, 12 y 13 °C se observó un aumento de longitud del tallo para una misma cantidad de radiación (Figura 10).



**Figura 10.** Longitud de tallos de *D. geminata* en función de la radiación activa fotosintéticamente (PAR), a 3 distintas temperaturas. Las líneas representan relaciones significativas. (Fuente: Kilroy & Bothwell 2011) (Adaptado).

- Conductividad eléctrica.** *D. geminata* se describe como preferente de aguas con baja conductividad (30-70 µS/cm) (Patrick & Reimer 1975), pero se ha informado su presencia en ríos aún con 1200 µS/cm (Kilroy y col. 2005b, Tapia 2012). La bibliografía en el tema no muestra evidencia suficiente que permita establecer correlaciones significativas entre baja conductividad y presencia o abundancia de didymo (Kirkwood y col. 2007, Tapia 2012; Amakaik-EcoHyd 2013 Miller y col. 2009, Schweiger y col. 2011),
- Turbiedad del agua.** Aunque varios investigadores describen al alga como preferente de aguas claras, (Kirkwood y col. 2007), esto parece no ser excluyente ya

que recientemente se ha informado su presencia con un espesor de más de 2 cm y una cobertura cercana al 100%, en un sitio clasificado subjetivamente como “muy turbio” (Amakaik-EcoHyd 2013, ver foto en Anexo 01)

- **Radiación o Luminosidad.** Las floraciones y producción de tallos de *D. geminata* se favorecen en lugares con alta luminosidad (Bothwell & Kilroy 2011) ya sea por una mayor cantidad de células (en condiciones nutritivas) o por floraciones con tallos más largos (en condiciones de escasos nutrientes). Esto se corrobora, por ejemplo, en un estudio realizado en ríos de Dakota del Sur que presentan una relación inversa entre disponibilidad de luz con la presencia y abundancia de *D. geminata* (James y col. (2014).
- **Profundidad.** Aunque es descrita (Lindstrøm & Skulberg 2008, Kilroy 2004; Spaulding & Elwell 2007) como preferente de hábitats poco profundos, puede alcanzar una profundidad entre 1,5 y 20 m. de acuerdo con antecedentes publicados por investigadores de diferentes países (Sastre y col. 2011, Whitton y col. 2009, Sutherland y col. 2005).
- **Sustrato (fondo acuático)** A pesar de que en 2009 aún se contaba con poca información sobre su influencia, existía consenso en que didymo se desarrolla mejor en lugares rocosos (Whitton y col. 2009, Kilroy y col. 2005b, 2007b, Lindstrøm & Skulberg 2008) ya que las rocas más grandes y duras soportan mayores velocidades en los ríos. En trabajos más recientes se encontró una mayor cobertura y severidad en sustratos de mayor tamaño, estables en ríos de alta montaña en España (Ladrera y col. 2015), mientras que Schweiger y col. (2011) informaron una leve relación positiva entre abundancia de didymo y porcentaje de bolones (de hasta 25 cm). En

experimentos realizados con sustratos reales, llevados al laboratorio, *D. geminata* parece estar bien adaptada a ambientes con alto esfuerzo de corte; y sería la perturbación física del sustrato (movimiento del mismo) la más efectiva para su remoción (Cullis 2011, Cullis y col. 2013).

En cuanto al tipo de sustrato, Rost y col. (2011) encontraron que el porcentaje de roca meta-sedimentaria<sup>5</sup> proporcionó el mejor modelo para predecir la presencia de *D. geminata* en Sierra Nevada, mientras que la roca volcánica tuvo una leve relación negativa. Esto se podría relacionar con Nueva Zelanda, donde la isla Norte libre de didymo posee rocas volcánicas, no metamórficas, mientras que la isla Sur con didymo posee rocas metamórficas, y escasas volcánicas. Asimismo, Whitton y col. (2009) mencionan que la diatomea produce floraciones estacionales en ríos con rocas volcánicas.

#### **1.1.2.2.3 Lagos como hábitat**

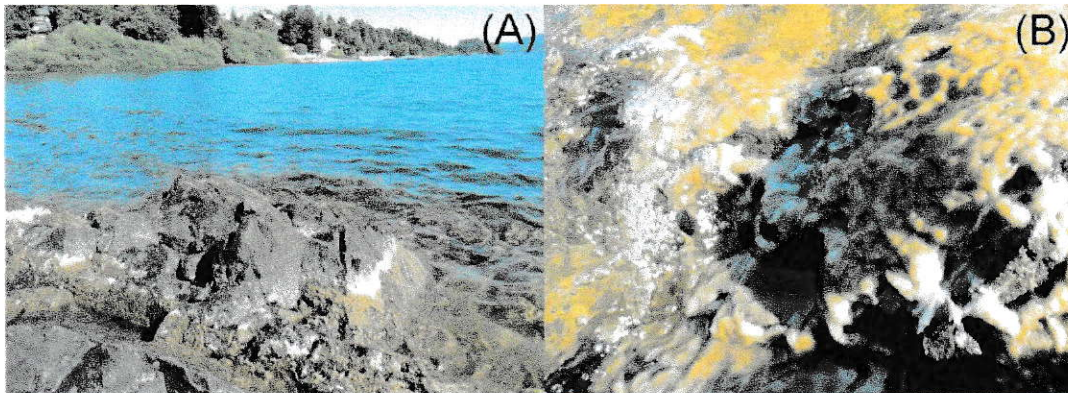
Si bien se conocen varias especies del género habitantes de lagos, *D. geminata* es más frecuentemente registrada en arroyos y ríos (Pite y col. 2009) donde parece alcanzar mayor biomasa (Kilroy y col. 2007b; Spaulding & Elwell 2007): Spaulding 2013). Sutherland (2005) encontró floraciones de didymo de regular magnitud en su estudio del Lago Manapouri, NZ y en otros países se cree que coloniza sustratos estables en la zona de oleaje de lagos (Whitton y col. 2009; Beville y col. 2012, McMahon y col. 2009), pero sin alcanzar gran abundancia (Spaulding 2013, Şahin 2000, Şahin 2001)

---

<sup>5</sup> Roca metamórfica de origen sedimentario.



Beamud y col. (2013) informan haber estudiado y registrado la primera floración de *D. geminata* en Sudamérica en el Lago Nahuel Huapi (Figura 11) donde didymo recubrió la parte con suelo volcánico mas no la parte de arena y guijarros con un grosor de no más de 2 cm según las imágenes



**Figura 11.** Floración didymo en el lago Nahuel Huapi, Argentina. (A) Detalle de la proliferación de *D. geminata*, (B) Primer plano del desarrollo de *D. geminata* sobre las piedras. (Fuente: Beamud y col. 2013)

#### 1.1.2.2.4 Hidrología y represas

Existe consenso general que el flujo regulado tras las represas provee de una zona óptima para el desarrollo de *D. geminata* (Cullis 2010), lo cual se debería al régimen de flujo, más que la cercanía a la represa (Kirkwood y col. 2007). Sin embargo, (Schweiger y col. 2011) *D. geminata* puede tolerar y crecer en flujos con regímenes variables típicos de ríos de montaña, aunque el desarrollo de las floraciones probablemente requiere una baja descarga promedio (Miller y col. 2009) con pocas variaciones de flujo. Esto se relacionaría directamente con la velocidad del flujo en el fondo, la cual afecta a las comunidades del perifiton al perturbar las capas de unión con el sustrato, la difusión de nutrientes y la habilidad de las células para permanecer pegadas al lecho, debido al estrés cortante dado por la velocidad de la corriente (Cullis 2010, Kirkwood y col. 2007).



Reforzando lo anterior, algunos estudios muestran que los flujos estables tienden a aumentar la biomasa de *D. geminata*, mientras que los aumentos de caudal movilizan el sustrato provocando que su biomasa disminuya (Larned y col. 2006; Sastre y col. 2013, CORFO Innova 2013, Sherbot & Bothwell 1993, Lindstrøm & Skulberg 2008). En este mismo sentido, según Kilroy y col. (2005a) la mejor variable que predice la biomasa de didymo es “cuánto tiempo ha pasado desde la última gran inundación con caudal de 75 o 100 m<sup>3</sup>/s”, puesto que éstas friegan y limpian el lecho, devolviendo el biovolumen a niveles anteriores; sólo deben ser lo suficientemente fuertes.

La invasión y brotes de *D. geminata* en Nueva Zelanda se han dado principalmente en ríos represados por centrales hidroeléctricas (Kilroy 2004; Kilroy y col. 2009 y 2007b, Spaulding & Elwell 2007, Lessard y col. 2013) De acuerdo a los investigadores la “influencia de lagos” fue el factor más importante tanto en cobertura como grosor de las floraciones.

Incluso Kirkwood y col. (2009) recalcan que la mayoría de los reportes de brotes de didymo son de ríos o canales con desvíos de flujo hidroeléctrico o represas, y cita 8 referencias. Por ejemplo, Noga y col. (2012) tras estudiar ríos del sur de Polonia encontraron células de *D. geminata* en prácticamente todos los puntos de muestreo, pero sólo en mayor abundancia en el río Ropa, bajo la represa Klimkówka durante la primavera, formando colonias mucilaginosas

En cuanto a la presencia y abundancia de didymo antes de las represas, no se encontró información como tal en la literatura.

### 1.1.3 Consecuencias ambientales y económicas del didymo

Según Kilroy (2004), dos impactos generales son relevantes: la limpieza de tomas de aguas debido a las floraciones, y la disminución en la pesca de agua dulce como resultado de cambios ambientales. También se mencionan problemas en canales de hidroelectricidad, pues el didymo eventualmente se despega de las rocas y se acumula en la rejilla de entrada a la sala de máquinas.

#### 1.1.3.1 Calidad química del agua

Este tipo de impacto es mencionado por algunos autores (Campbell 2005; Tapia 2012; CORFO Innova 2013) quienes indican que *D. geminata* altera el pH, la concentración de nutrientes y probablemente provoca fluctuaciones diurnas en el oxígeno disuelto. En general, *D. geminata* se describe como inofensiva para formas de vida acuática, así como tampoco es parasitaria, e incluso en densidades moderadas no presenta perjuicios directos a otros organismos (Kilroy & Bothwell 2010).

*D. geminata* no pareciera empeorar la calidad del agua para consumo, exceptuando quizá el sabor y el olor (Kilroy 2004). No hay evidencia de toxicidad o riesgo para la salud de las personas, salvo casos aislados de picazón en los ojos de bañistas aguas abajo de floraciones en Vancouver (Kilroy 2004), debido posiblemente a su naturaleza silíceas (Campbell 2005; Whitton y col. 2009),

#### 1.1.3.2 Peces e invertebrados

Es evidente que la densa capa mucilaginosa excluye a otras diatomeas, que son importante fuente de alimento para invertebrados acuáticos, y a su vez, éstos lo son para los peces. Además, didymo modifica el sustrato, ya que lo cubre parcial o

totalmente, dificultando e incluso imposibilitando la reproducción y posterior desarrollo de peces que requieren de un sustrato limpio (CORFO Innova 2013).

Los invertebrados cuya dieta incluye *D. geminata*, tienen ventaja respecto a otras especies del entorno acuático, desequilibrando así la trama trófica (Larned y col. 2006). En Canadá, por ejemplo se ha observado cambios en las comunidades de invertebrados bentónicos, que van desde los recursos alimenticios para peces (conocidos como EPT: efemerópteros, plecópteros, tricópteros) hasta otros alimentos menos preferidos por ellos como los quironómidos (Campbell 2005).

En Dakota del Sur (EE.UU.), se observó que la cantidad de EPT, usados como medidores de la calidad del agua era menor cuando mayor era la cobertura de didymo (Larson & Carreiro 2008), en tanto que las comunidades de quironómidos se ven favorecidas (McLaughlin (2009).

Por otro lado, en 3 ríos de Nueva Zelanda la cobertura de didymo aumentó la densidad de invertebrados bénticos, pero con cambios en la composición de estas comunidades, junto con una homogenización. (Kilroy y col. 2009).

En el caso de los peces (Kilroy 2010) al parecer el impacto depende del lugar y de la especie de pez. A pesar de la extensa investigación de Whitton y col. (2009), aún hace falta una síntesis de los potenciales impactos de didymo (Reid & Torres 2014).

En Europa, los salmones aparentemente no se ven afectados por la cobertura de didymo, ya que en una revisión de acciones de salmonicultura, *D. geminata* no fue mencionada como problema de preocupación para stocks de salmones o truchas. Noruega, por ejemplo, presenta algunos de los ríos del Atlántico más productivos de



salmón y son también los que tienen los más amplios crecimientos didymo (Whitton y col. 2009).

En Norteamérica en cambio, una gran disminución de la trucha marrón adulta en Rapid Creek, Dakota del Sur, coincidió con el inicio de crecimientos masivos de didymo en 2002. Caso contrario a la trucha arcoíris, donde la productividad no varía en ríos con y sin *D. geminata*, antes o durante el período de crecimientos de masas, por lo que didymo podría ser solo uno de los factores que determina la ecología de los peces (Whitton y col. 2009).

En algunas partes del Oeste de EE.UU., la pesca disminuyó un 90% entre 2003-2004 (Kilroy 2004). Actualmente y en este mismo país se ha visto que didymo aumenta la cantidad del parásito causante de *whirling disease* o enfermedad del torneo (de dar vueltas), que afecta a peces salmónidos sobre todo en etapas tempranas de desarrollo (Byle 2014).

Por otra parte, un estudio realizado en Nueva Zelanda muestra que los pequeños peces galáxidos se presentaban con alta densidad en zonas con didymo, sin grandes diferencias entre sitios con y sin didymo (Whitton y col. (2009).

### **1.1.3.3 Obstrucción en canales y tomas de agua.**

Al oeste de Estados Unidos se ha visto cómo algunas floraciones didymo bloquean rejillas de suministro de agua (Figura 12), haciendo necesario que se limpien los canales y rejillas mediante un raspado frecuente de la superficie. Por otro lado, las matas de que se sueltan del sustrato y van a canales de agua confunden a las personas, pues las hacen creer que se trata de aguas negras o servidas, por lo que las

plantas de tratamiento reciben quejas (Spaulding & Elwell 2007). También en Polonia, didymo proliferó aguas abajo de 2 represas y su material gelatinoso tapó filtros de agua, imposibilitando su uso (Kawecka & Sanecki 2003). La obstrucción de aducciones (bocatomas) de hidroelectricidad en Nueva Zelanda, se ha estimado que genera pérdidas de 100.000 NZD por día de detención de una estación hidroeléctrica (Sanson & Gerbeaux 2013)

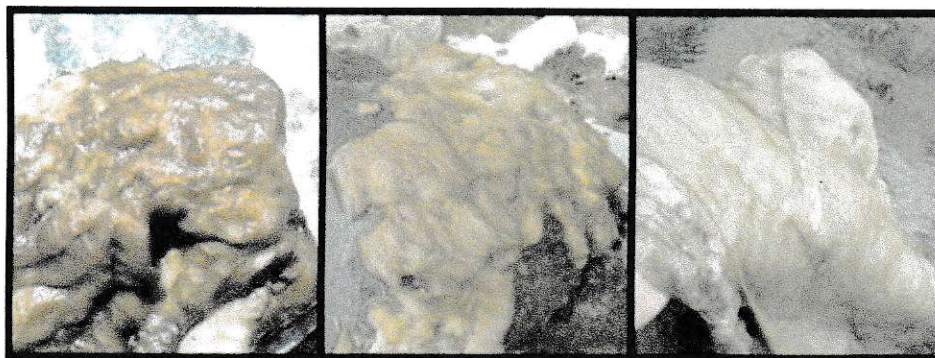


**Figura 12.** Una rejilla de un canal de suministro de agua es tapada por floraciones de didymo. La superficie oscura son principalmente células, y la clara, tallos (Spaulding & Elwell 2007).

#### 1.1.3.4 Recreación y Turismo

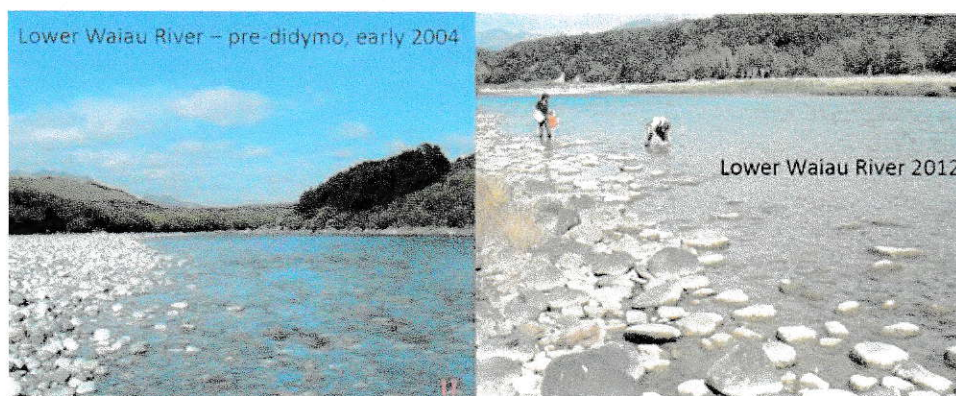
La cobertura mucilaginoso deteriora las zonas de natación, ensucia y a veces estropea aparejos de pesca y sedales (hilos), además de dificultar la detección de peces (Kilroy 2004). Por otra parte, dado que el color de didymo varía desde café-marrón hasta beige pálido (Figura 13), cuando los niveles del agua disminuyen y las floraciones quedan expuestas al sol, semejan papel higiénico, dando la impresión de descargas de aguas servidas (Kilroy 2004). Por consiguiente, esto afecta el turismo y por ende también a la economía local y del país, como en el caso de Nueva Zelanda (Branson 2006), que presenta gran cobertura de didymo.





**Figura 13.** Diferentes tonalidades de didymo en Nueva Zelanda (Fuente: Kilroy 2012).

El impacto estético, al ser más bien subjetivo, es difícil de evaluar y por ende no se encuentra en detalle en la literatura científica. Sin embargo, es sabido que existe pues varios autores la mencionan (Kilroy y col. 2004; Sutherland y col. 2007; Kumar y col. 2009; Beville y col. 2012; Reid & Torres 2014) y al menos uno lo desarrolla brevemente (Campbell 2005). Un ejemplo en la Figura 14.



**Figura 14.** Fotografías del río Lower Waiau, antes (2004) y después (2012) de la invasión de didymo (Imágenes por Kilroy 2013).



## 1.2 Antecedentes Específicos: Chile

### 1.2.1 Expansión de didymo

En Chile, didymo se detectó en mayo de 2010 en la cuenca del Río Yelcho, (X Región de los Lagos), y en octubre del mismo año se declaró área de plaga. Dada esta situación se procedió a establecer, implementar y mantener por SENAPESCA el “Programa de Vigilancia, Detección y Control de la plaga *Didymosphenia geminata*” el 2 de noviembre de 2010. El objetivo de este Programa es controlar su dispersión y proteger así el ambiente aminorando sus impactos económicos, principalmente mediante medidas de bioseguridad, como usar soluciones desinfectantes en objetos que hayan estado en contacto con aguas con *D. geminata*.

Todo lo anterior surge en base al DS N° 345/2005 “Reglamento de Plagas Hidrobiológicas” del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, modificado por el DS N° 239/2010. A pesar de las medidas, la expansión de *D. geminata* no se ha detenido, pues desde su descubrimiento en Futaleufú en 2010, ha invadido más de 40 ríos desde la región del Biobío hasta Magallanes (SERNAPESCA 2014). En Tabla 2 se presenta en forma cronológica los hitos más relevantes de *D. geminata* en Chile, y el documento legal o informe asociado, según corresponda, identificando los ríos que se fueron registrando con presencia del alga. Luego se presenta la Tabla 3, la cual es de elaboración propia y ahonda la temática de la Tabla 2 sobre la cronología documentada de didymo en Chile.

**Tabla 2.** Resumen de la cronología de *D. geminata* en Chile.

Fecha	Hito relacionado a didymo	Reg.	Doc. legal o Informe
2010 Abril	Subpesca recibe denuncia en Futaleufú	X	-
2010 Agosto 06	Declaración emergencia de plaga en Futaleufú	X	Res. Ex. N° 1342/2010
2010 Agosto 24	Propuesta área de plaga, Espolón y Futaleufú	X	Inf. Téc. D. AC. N° 1681/2010
2010 Octubre 06	Declaración de plaga en <b>Futaleufú, Espolón</b>	X	Res Ex N° 3064/2010
Oct'10-Jun'11	Numerosas prospecciones: POCH-UChile, CIEP	XIV, X, XI, XII	Informes públicos
2011 Octubre 27	Confirmado <b>entre Espolón y Baker</b> , expansión hacia el sur	X, XI	Res. Ex. N° 2812/2011
Nov'11-Abr'12	FIC-R 2010, "Investigación plaga moco de roca..."	XII	s/i
2012 Febrero	Denuncia en Río Puelo	X	-
2012 Septiembre	Confirmado en Río <b>Puelo</b>	X	"Estudio U Chile"
2012 Octubre	Vigilancia	X, XI	s/i
2012 Noviembre	Confirmado en <b>Alto Biobío</b>	IX	Res Ex N° 2634/2012
Nov'12-Jun'13	Prospección Amakaik -EcoHyd	IX, XIV	Informe público
2012 Dic 19	Emergencia de plaga <b>Fuy, Llanquihue, Enco, San Pedro</b>	XIV	Res. Ex. N° 3074/2012
2012-2013	FIC-R 2012, "Magallanes sin didymo: monitoreo..."	XII	s/i
2013 Junio	Confirmado en ríos <b>Blanco y Grande</b>	XII	Inf. Téc. D. AC. 609/2013
2013 Noviembre	FIP Evaluación en zona Centro-Sur Amakaik	XIV	s/i
2013 Diciembre	Confirmado en <b>Biobío</b> Pangué-Ralco	VIII	Res Ex N° 3417/2013
2014 Abril	Confirmado en <b>Huahum</b> y otros	VIII, XIV, XI	Res Ex N° 1065/2014

Fuente: SUBPESCA 2013 (adaptado). Para mayor detalle, revisar esta referencia y los documentos e informes en cuestión.

CIEP : Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia

FIC-R : Fondo de Innovación y Competitividad Regional.

FIP : Fondo de Investigación Pesquera

s/i : Sin información.

**Tabla 3.** Cronología de Resoluciones e Informes Técnicos emitidos por SUBPESCA y SERNAPESCA desde la primera declaración de emergencia de plaga en Futaleufú hasta la más reciente confirmación de *D. geminata*.

Documento	Mes día de publicación	Qué hace	Nuevos Ríos o Arroyos con didymo	Región	Fecha de detección
Resolución 1342/2010	Agosto 06	Declara emergencia de plaga cuenca Futaleufú	Espolón, Futaleufú	X	Mayo 2010
<b>Inf. Téc. D. AC. 1681/2010</b>	<b>Agosto 24</b>	<b>Propone Área Plaga</b>	<b>Espolón, Futaleufú</b>	<b>X</b>	<b>Mayo 2010</b>
<b>Inf. Téc. D. AC. 2064/2010</b>	<b>Septiembre 10</b>	<b>Propone Área Plaga</b>	<b>Espolón, Futaleufú</b>	<b>X</b>	<b>Mayo 2010</b>
<b><u>Resolución 3064/2010</u></b>	<b><u>Octubre 06</u></b>	<b><u>Declara área plaga</u></b>	<b><u>Espolón, Futaleufú</u></b>	<b><u>X</u></b>	<b><u>Mayo 2010</u></b>
Resolución 3078/2010	Octubre 08	Arregla coordenadas anteriores	Espolón, Futaleufú	X	Mayo 2010
Resolución 1753/2010	Octubre 12	Declara emergencia de plaga cuenca Simpson	Coyhaique, Aysén, Simpson, Cea / Cochrane	XI	Ago-Oct 2010
<b><u>Resolución 1866/2010</u></b>	<b><u>Noviembre 02</u></b>	<b><u>Programa de Vig., Det., y Ctrl acorde a Res. 3078/2010</u></b>	-	-	-
Resolución 57/2011	Enero 19	Declara área plaga	Puerto Aysén, alrededores y cuenca Baker	XI	Ago-Oct 2010
<b><u>Resolución 332/2011</u></b>	<b><u>Febrero 14</u></b>	<b><u>Protocolo de Limpieza y Desinfección</u></b>	-	-	-
Resolución 531/2011	Marzo 14	Declara emergencia de plaga Aysén y Baker	Puerto Aysén, alrededores y cuenca Baker	XI	Ago-Oct 2010
<b>Inf. Téc. D. AC. 1183/2011</b>	<b>Julio 15</b>	<b>Propone Ampliar área plaga</b>	<b>Noroeste, Palena, Yelcho. Lagos Espolón y Yelcho</b>	<b>X</b>	<b>Jul'10-Mar'11</b>
<b>Inf. Téc. D. AC. 1319/2011</b>	<b>Agosto 08</b>	<b>Arregla informe anterior</b>	<b>Noroeste, Palena, Yelcho. Lagos Espolón y Yelcho</b>	<b>X</b>	<b>Jul'10-Mar'11</b>
Resolución 2304/2011	Agosto 25	Modifica Res. 3064/2010 Área plaga	Noroeste, Palena, Yelcho. Lagos Espolón y Yelcho	X	Jul'10-Mar'11
<b>Inf. Téc. D. AC. 1622/2011</b>	<b>Septiembre 15</b>	<b>Propone remplazar Res. 3064/2010 y 2304/2011</b>	<b>Amplía anteriores -ver detalle en el Inf. Téc.-</b>	<b>X, XI</b>	<b>-</b>
Resolución 2812/2011	Octubre 17	Modifica Res. 3064/2010 Área plaga	Amplía anteriores -ver detalle en el Inf. Téc.-	X, XI	-
Resolución 50/2012	Enero 12	Declara emergencia de plaga	Puelo, Manso	X	s/i



<b><u>Resolución 90/2012</u></b>	<b><u>Enero 20</u></b>	<b><u>Programa de Vig., Det., y Ctrl acorde a Varios Docs.</u></b>	-	-	-
Resolución 2634/2012	Diciembre 06	Declara emergencia de plaga	Alto Biobío	IX	Noviembre 2012
Resolución 3074/2012	Diciembre 19	Declara emergencia de plaga	Fuy, Llanquihue, Enco, San Pedro	XIV	Nov-Dic 2012
<b>Inf. Téc. D. AC. 229/2013</b>	<b>Marzo 01</b>	<b>Propone Ampliar área plaga de Res. 3064/2010</b>	<b>Pucón, Liucura, amplía cuencas en varias regiones</b>	<b>IX, XIV, X, XI</b>	<b>Ene'12-Feb'13</b>
Resolución 996/2013	Abril 17	Modifica Res. 3064/2010 Área plaga	Pucón, Liucura, amplía cuencas en varias regiones	IX, XIV, X, XI	Ene'12-Feb'13
<b>Inf. Téc. D. AC. 609/2013</b>	<b>Junio 03</b>	<b>Propone Ampliar área plaga de Res. 996/2013</b>	<b>Grande y Blanco, más subcuencas</b>	<b>XII</b>	<b>Feb-Abr 2013</b>
Resolución 1927/2013	Julio 30	Modifica Res. 996/2013 Área plaga	Grande y Blanco, más subcuencas	XII	Feb-Abr 2013
Resolución 3417/2013	Diciembre 30	Declara emergencia de plaga	Río Biobío, Pangué y Ralco	VIII	Dic-2013
<b>Inf. Téc. D. AC. 253/2014</b>	<b>s/i</b>	<b>Propone Ampliar área plaga</b>	<b>Ríos Biobío, Huahum, Palena Alto, Tranquilo, Del Salto</b>	<b>VIII, XIV, XI</b>	<b>s/i</b>
<b><u>Resolución 1065/2014</u></b>	<b><u>Abril 17</u></b>	<b><u>Modifica Res. 996/2013 Área plaga</u></b>	<b><u>Ríos Biobío, Huahum, Palena Alto, Tranquilo, Del Salto</u></b>	<b><u>VIII, XIV, XI</u></b>	<b><u>s/i</u></b>
<b><u>Resolución 1070/2014</u></b>	<b><u>Abril 16</u></b>	<b><u>Nuevo Programa de Vig., Det., y Ctrl</u></b>	-	-	-
Resolución 4468/2014	Noviembre 13	Declara emergencia de plaga	Río Curriñe, sector Lago Maihue	XIV	-
Resolución 4928/2014	Diciembre 09	Declara emergencia de plaga	Arroyo s/nombre, Lago O'Higgins	XI	-

s/i : Sin información.

En negrita: Informes técnicos.

En negrita y subrayado: Hitos destacados.

**NOTA:** Para mayor especificación sobre los ríos, cuencas, sub-cuencas y sub-subcuencas declaradas plaga, ver documentos legales.

### 1.2.2 Características químicas y físicas de ríos contaminados

- **Fosfato.** En Chile, al menos en las regiones de La Araucanía (IX) y Los Ríos (XIV), la situación pareciera ser muy distinta a otros países, puesto que de 8 sitios de ríos con didymo bentónico analizados químicamente, solo 3 de ellos presentaron bajos niveles de Fosfato (3-9  $\mu\text{g/L}$ ), mientras que los otros 5 varían entre 21 y 52  $\mu\text{g/L}$  (Amakaik-EcoHyd 2013), como indica la Tabla 4. Es más, el comportamiento parece ser al revés: donde hay más Fosfato (Biobío), el espesor es mayor. Sin embargo, estas mediciones son puntuales en el tiempo, por lo que los niveles de  $\text{PO}_4^{3-}$  pueden haber sido menores cuando se inició el crecimiento del alga. Lamentablemente no existen estaciones de monitoreo de la DGA en el río Biobío de la región de la Araucanía para corroborar esto.

**Tabla 4.** Espesor y cobertura de floraciones algales en 8 puntos de las regiones de La Araucanía y Los Ríos. Campaña de Amakaik en verano 2013.

Río (Región)	Código del punto de muestreo	Espesor de floración (cm)	Cobertura de floración (%)	$[\text{PO}_4^{3-}]$ ( $\mu\text{g/L}$ )
Biobío (IX)	EXTRA-LOLEN/BIOBIO	> 2	30-80	37
Biobío (IX)	2B-BALSARAHUE-SNP	> 2	100	37
Biobío (IX)	5-BIOBIO-SNP	> 2	30-80	49
Trancura (XIV)	AMK-PUCON2	0	0	52
Fuy (XIV)	AMK-FUY2	< 2	30-80	3
Llanquihue (XIV)	AMK-LLANQHUE2	< 2	100	9
Enco (XIV)	AMK-ENCO2	< 2	30-80	21
San Pedro (XIV)	AMK-SANPEDRO2	< 2	30-80	3

- **pH.** El rango de pH donde se ha registrado esta plaga en Chile va desde 5,2 a 9,1 (Tapia, 2012). Sin embargo, nuevamente no se especifica la cantidad de didymo en cada uno de los puntos de muestreo, además de que las mediciones son puntuales en el tiempo. Aunque en la cuenca del Yelcho, X Región y las regiones de

Los Lagos y Aysén, no se encontró correlación significativa entre su abundancia y el pH (Tapia 2012, Miller y col. 2009)

- **Calcio.** En cuanto a los ríos chilenos, ninguno superó los 20 mg/L en los muestreos puntuales de las prospecciones de 2011-2012, con la mayoría de los valores menores a 10 mg/L (Tapia 2012; Amakaik-EcoHyd 2013), además, no se encontraron relaciones significativas entre la concentración de este nutriente y la presencia de didymo, lo que se podría relacionar con el amplio rango mencionado por Whitton y col. (2009) en los cuales se ha encontrado *D. geminata*, esto es 1,8 a 45 mg/L, similar a la situación de NZ, donde el rango de calcio es de 2,9-40 mg/L (Kilroy y col. 2005b).

- **Sustrato.** Esto no parece ser de importancia, pues en los ríos con didymo (Biobío, Fuy y aldaños, Futaleufú y aldaños, Puelo-Manso, Grande-Blanco, etc.) se presencia mucha roca volcánica, intrusiva y/o sedimentaria dependiendo de la cuenca y la altitud, mas no metamórfica, la cual si aparece, lo hace aguas abajo y en pocas cantidades (Sernageomin 2003).



### 1.3 Métodos analíticos para cuantificación de fosfato disuelto

Debido a que el Fosfato disuelto resultó ser relevante para el desarrollo micro- y macroscópico de *D. geminata*, la Tabla 5 muestra los métodos analíticos que usó cada referencia citada en este seminario, con sus respectivos límites de detección.

El método más recurrente es el Standard Methods SM 4500-P E (Ácido Ascórbico), ya sea en sus distintas ediciones (1992, 1995, 2005) o en métodos alternativos pero con los mismos principios y reactivos químicos (Reid & Torres 2014), e incluso en versiones automatizadas (Bothwell & Kilroy 2011), logrando en la mayoría de los casos un buen límite de detección entre 1 y 6  $\mu\text{g}(\text{PO}_4^{-3})/\text{L}$ .

Los métodos que claramente no cumplieron la función de determinar Fosfato en aguas continentales fueron el SM 4110-B (Cromatografía Iónica) y el SM 4500-P C (Ácido Vanado-molibdofosfórico) pues contaron con altísimos límites de detección (1000 y 1800  $\mu\text{g}(\text{PO}_4^{-3})/\text{L}$  respectivamente). Cabe destacar que la variabilidad de límites de detección respecto de un mismo método se debe principalmente a que depende de la estabilidad del instrumento analítico, de contar con una celda de 10 cm de paso de luz, y de que los “blancos” sean precisamente cero en las lecturas, cuyo factor es el más variable entre uno y otro análisis (Brian Reid, *pers. comm.*).

**Tabla 5. Métodos analíticos usados por trabajos citados en este seminario.**

Referencia o Trabajo	País	Método analítico para determinar Fosfato	Límite de Detección [ $\mu\text{g}(\text{PO}_4^{3-})/\text{L}$ ]
Web DGA (hasta 2011)*	Chile	"Kjeldahl – Colorimetría" (sin más información)	9
Bothwell y col. (2009)*	Canadá	-no informado-	$\leq 6,6^{**}$
Endesa (2010), Primavera 2006	Chile	SM 4500-P E (AAW 1995)	30
Endesa (2010), Oto 2007 - Inv 2008, Inv 2010	Chile	Test de $\text{P-PO}_4^{3-}$ Spectroquant Nova 60 Merck: Azul Fosfomolibdeno	30
POCH-UCHILE 2011, citados en Amakaik-EcoHyd (2013)	Chile	SM 4500-P C (AAW 2005)	1800
DGA - U. Austral (2012)	Chile	SM 4500-P E (AAW 2005)	6
Amakaik-EcoHyd (2013)	Chile	SM 4500-P E (AAW 2005)	1
Bothwell & Kilroy (2011); Kilroy & Bothwell (2012)	Nueva Zelanda	Lachat QuikChem FIA+ 8000 basado en SM 4500-P E (AAW 2005)	1,5 - 3,0***
Endesa (2012, 2013)	Chile	SM 4110-B Cromatografía iónica	1000
Beamud y col. (2013)	Argentina	SM 4500-P E (APHA 1992).	6
Reid & Torres (2014)	Chile	Ácido ascórbico en Strickland and Parsons 1965. Misma química de SM 4500-P E (AAW 2005)	3,0
Ladrera y col. (2015)	España	SM 4500-P E (AAW 2005)	$\leq 15^{**}$
Este seminario	Chile	SM 4500-P E (AAW 2005)	6

**AAW** : APHA-AWWA-WEF.

**APHA** : American Public Health Association

**AWWA** : American Water Works Association

**WEF** : Water Environment Federation

\*No informan el método utilizado, y al ser consultadas, no dan respuesta satisfactoria.

\*\*Referencia no informa límite de detección, por lo que se indica la menor concentración de Fosfato detectada.

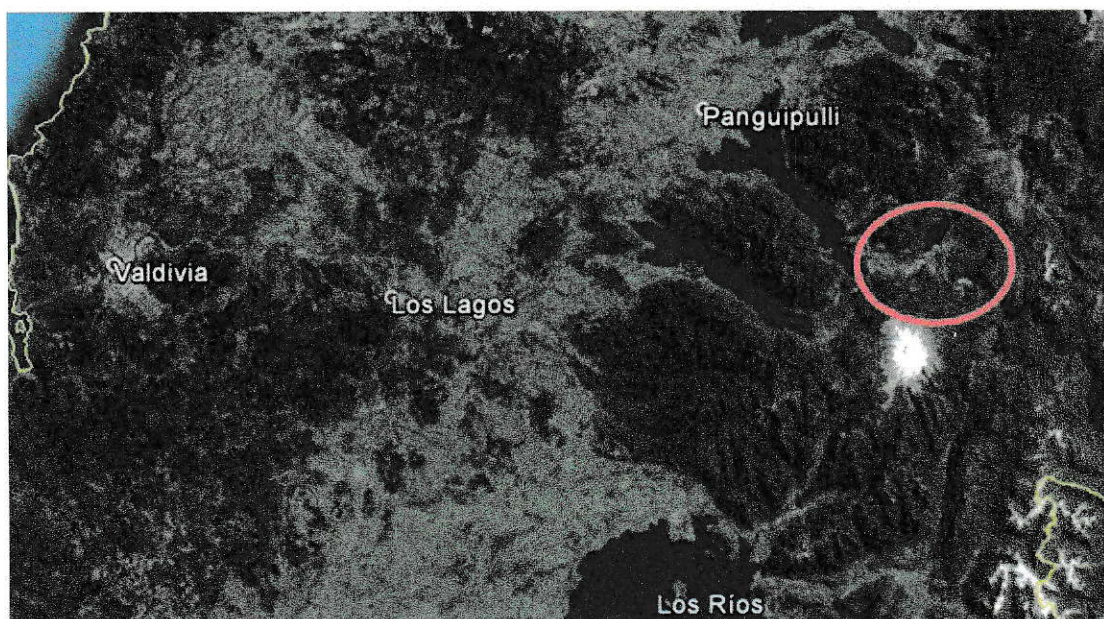
\*\*\*La autora indica que "en general el LD se encuentra en ese rango, basado en el triple de la desviación estándar de replicar un estándar de 1 ppb (P) con cada ejecución".



#### 1.4 Planteamiento del Seminario y Área de Estudio seleccionada

De acuerdo a los antecedentes presentados, no existe un patrón común en la expansión de didymo en el mundo debido a su gran capacidad adaptativa. Para controlar la dispersión de esta plaga en el sur de Chile es necesario realizar estudios comparativos entre las características químicas, físicas e hidrológicas de los sitios donde se encuentra y aquellos cercanos que aún no son invadidos por el alga.

Como caso de estudio de la expansión de *D. geminata* en Chile y su relación con la composición química de las aguas, en este seminario se seleccionó la Subcuenca del Río Valdivia Alto en la XIV Región de Los Ríos, sur de Chile (Figura 15) debido a que se dispone de antecedentes previos de diversos estudios y campañas en la zona. Además, existe el lago Neltume y algunos ríos cercanos a éste se encuentran fuera del “área de plaga” y sin registros de *D. geminata* hasta 2013 (SERNAPESCA 2014).



**Figura 15.** Ubicación aproximada del Área de Estudio seleccionada (círculo rojo). Subcuenca del Río Valdivia Alto, XIV Región de Los Ríos, Chile.



## **1.5 Hipótesis y Objetivos**

### **1.5.1 Hipótesis**

Las floraciones de *D. geminata* en la subcuenca del Río Valdivia Alto se relacionan significativamente con al menos un parámetro ambiental, ya sea químico o físico, que difiere de los ríos sin presencia microscópica o visible del alga.

### **1.5.2 Objetivo General**

Encontrar factores determinantes para la distribución y/o abundancia de *D. geminata* en ríos del sur de Chile, que puedan utilizarse en su control o mitigación.

### **1.5.3 Objetivos Específicos:**

1. Determinar si existen condiciones químicas, físicas y/o hidráulicas que favorecen la proliferación de didymo en ríos de la subcuenca Río Valdivia Alto.
2. Comprobar si la concentración de Fosfato en aguas de ríos chilenos con presencia abundante de *D. geminata* correlaciona con los postulados de Bothwell & Kilroy (2011, 2012), que indican fundamentalmente que didymo solo crece desmesuradamente cuando la disponibilidad de Fosfato disuelto disminuye a 6 µg/L o menos.
3. Evaluar la susceptibilidad del lago Neltume de presentar floraciones didymo luego de un eventual arribo de *D. geminata*.
4. Proponer mecanismos químicos o físicos de control del alga.

## **II. METODOLOGÍA**

### **2.1 Análisis bibliográfico**

Para esto se recopiló información de artículos científicos, tesis, informes, presentaciones, resúmenes de congresos, un estudio de impacto ambiental, etc., la mayoría de índole internacional, desde la década del 70 hasta la actualidad, incluyendo enero de 2015. Se considera que las últimas fuentes, de 2012 en adelante, son las más relevantes dado que diferencia a este seminario de trabajos anteriores debido a la actualidad y hallazgos.

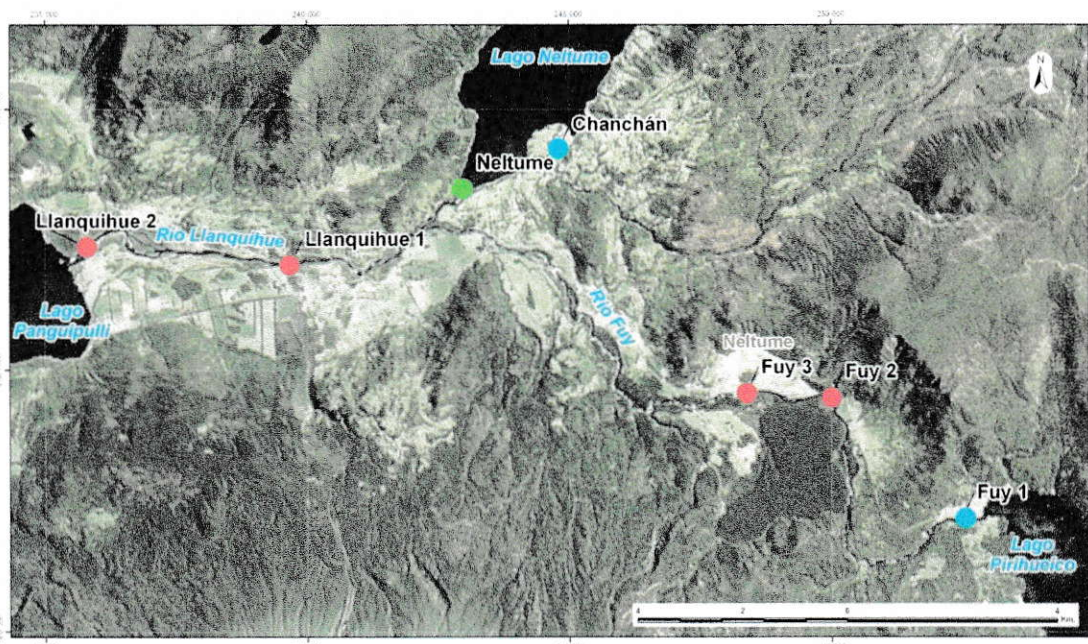
### **2.2 Campaña a terreno**

#### **2.2.1 Puntos de muestreo**

Entre el 25 y 27 de marzo de 2014 se realizó un muestreo en la comuna de Panguipulli ubicada en la XIV Región de Los Ríos, en particular en una parte de la subcuenca del Río Valdivia Alto correspondiente a los ríos Fuy y Llanquihue, y de manera adicional a los ríos Neltume y Chanchán, efluente y afluente del lago Neltume, respectivamente. Estos ríos y lago corresponden al área de estudio del seminario, (Lat S Long W - 39.833, -71.977), los cuales fueron muestreados como se describe a continuación.

Inicialmente se establecieron 8 estaciones de muestreo, de los cuales 7 están basados en el informe de Amakaik-EcoHyd (2013) de manera de tener una referencia de acceso a los puntos y de resultados previos para comparar: 3 puntos en río Fuy, 2 en río Neltume y 2 en río Llanquihue, agregando un punto en la naciente del río Fuy (total: 8), cercano a la estación de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA).

Sin embargo, el punto aguas abajo en el río Neltume no se pudo muestrear debido a las condiciones hidrológicas, y el tercer punto del Fuy tampoco debido a la imposibilidad de acceso pues es un predio privado y de peligrosa llegada por agua. A raíz de esto, se agregó el punto en río Chanchán para remplazar al del río Neltume, pues en ninguno se tiene registro de *D. geminata*. Los siete puntos muestreados se muestran en la Figura 16 (letra color negro) y se detallan en la Tabla 6. Además se especifica el número de muestras biológicas por punto.



**Figura 16.** Ubicación de los puntos de muestreo en ríos Fuy, Neltume, Chanchán y Llanquihue. Subcuenca del río Valdivia Alto (Imagen original de Google Earth®, (-39.833, -71.977)). Puntos rojos, verde y azules significan respecto de *D. geminata*: "presencia", "ausencia" y "sin datos", respectivamente, basado en Amakaik-EcoHyd (2013).

**NOTA:** para entender la relación entre simbología de los ríos en esta Figura y el desarrollo de este trabajo, se aclara lo siguiente:

Neltume	= Neltume 5
Chanchán	= Chanchán 6
Llanquihue 1	= Llanquihue 7
Llanquihue 2	= Llanquihue 8



**Tabla 6.** Puntos de muestreo: coordenadas, cantidad y tipo de muestras biológicas recolectadas en el bentos y en el plancton, y presencia de *D. geminata* a 01/2013.

Río (código)	UTM-ESTE	UTM-NORTE	Huso	Frascos planctónicos	Frascos bentónicos	Tubos bentónicos	D. <i>geminata</i> a Enero 2013
Fuy 1	252.494	5.582.171	19 H	4	4	0	-
Fuy 2	249.995	5.584.492	19 H	4	4	3	Sí
Fuy 3	248.389	5.584.579	19 H	4	4	2	Sí
Neltume 5	242.962	5.588.484	19 H	4	4	0	No
Chanchán 6	244.801	5.589.229	19 H	4	4	2	-
Llanquihue 7	753.179	5.587.261	18 H	4	4	0	Sí
Llanquihue 8	749.302	5.587.863	18 H	4	4	2	Sí

Nota: la diferencia entre los tubos y frascos bentónicos radica en la manera de muestrear. Para mayor detalle ver manual de Díaz y col. (2012).

Paralelo a este muestreo de plancton y bentos se obtuvieron muestras para calidad de agua, en particular para los parámetros enlistados a continuación<sup>6</sup>. (Los métodos analíticos utilizados por los laboratorios se detallan más adelante, páginas 40-41).

- Nitrógeno (N): Nitrito, Nitrato, N total
- Fósforo (P): Fosfato, P orgánico, P total
- Clorofila a
- Conductividad eléctrica
- Sílice
- Sulfato
- Hierro
- Calcio

### 2.2.2 Metodología de muestreo

En general se siguió el manual de Díaz y col. (2012), lo que incluye en cuanto a las fichas de terreno otras observaciones importantes como disponibilidad de luz solar, transparencia del agua, tipo de sustrato predominante y nivel de desarrollo algal, tanto en área de cobertura como grosor. En cuanto a bioseguridad para evitar la dispersión de *D. geminata*, después de cada muestreo se utilizó una solución desinfectante con

<sup>6</sup> Otros parámetros importantes como temperatura, pH, oxígeno disuelto y velocidad de la corriente (perfil vertical) no fue posible medirlos debido al desperfecto de los equipos, según uno de los analistas en terreno.

detergente biodegradable para todos los implementos utilizados y elementos impermeables (vadeadores y guantes plásticos).

Asimismo, en cuanto a la manera de muestrear, para plancton se usó una red especial para didymo facilitada por el mismo laboratorio principal (Amakaik) al cual se enviaron las muestras biológicas, con mallas nylon de 40  $\mu\text{m}$  de apertura, mientras que para bentos, cepillos de dientes (Díaz y col. 2012).

### 2.2.3 Procesamiento de muestras

Las muestras en ambas modalidades fueron guardadas con un poco de agua del mismo río y fijadas con lugol al alcohol. Como se pudo ver en la Tabla 6, adicionalmente se obtuvieron 9 tubos con muestras de colonias algales sospechosas, fijadas también con lugol al alcohol. Todos los tubos (9) y la mitad de las otras muestras (28) fueron enviadas a Amakaik para identificar y cuantificar: a) diatomeas bentónicas, b) diatomeas planctónicas, c) perifiton, y d) fitoplancton; en cada uno de los 7 puntos (4 análisis diferentes, 4 frascos diferentes), pudiendo conocer a las diatomeas a nivel de especie y al resto de las especies sólo a nivel de género; esto debido al método utilizado por el laboratorio (incluye digestión ácida para “diatomeas a nivel especie”, destruyendo al resto de las especies).

De las 28 muestras restantes, 14 fueron enviadas al laboratorio de fitoplancton del Departamento de Ciencias Ecológicas de la Universidad de Chile: 1 frasco por punto de muestreo en ambos tipo de muestra (bentos y plancton,  $2*7=14$ ), con el objetivo de contrastar la presencia/ausencia de *D. geminata*. Las últimas 14 muestras se descartaron por mal estado de conservación (pérdida de agua o inicio de descomposición por falta de yodo)

#### 2.2.4 Métodos analíticos: caracterización de las muestras de agua

- **Cuantificación de Sílice, Calcio y Hierro:** SM<sup>7</sup>-3120 B: Plasma Acoplado Inductivamente (ICP en inglés). Los átomos de la muestra nebulizada son excitados por un plasma de argón, y su emisión es leída por un espectrómetro. LD (Límites de detección): 0,02 – 0,2 – 0,002 (mg/L) respectivamente.
- **Cuantificación de Sulfato:** SM-4110 B: Cromatografía iónica con supresión química de la conductividad del eluyente. La muestra se inyecta a una columna con un flujo con eluyente (carbonato-bicarbonato), separando sus analitos (iones) en base su afinidad con intercambiadores iónicos. La identificación es por tiempo de retención, y cuantificación por la altura de la señal de conductividad. LD: 1,0 mg/L.
- **Conductividad:** SM-2510 B: Luego de calcular la constante de la celda a 25 °C, se mide la conductividad o resistencia de la muestra a la misma temperatura y se aplica una fórmula correspondiente para obtener el resultado final. LD: 1 µS/cm.
- **Cuantificación de Nitrito:** SM-4500-NO<sub>2</sub> B. Colorimetría. Con la ayuda de sulfanilamida diazotizada y diclorhidrato de N-(1-naftil)-etilendiamina, a pH 2 – 2.5, los Nitritos forman un azoderivado (R-N=N-R') púrpura-rojizo que presenta un máximo de absorción a 543 nm. LD: 2 µg(N)/L.
- **Cuantificación de Nitrato:** SM-4500-NO<sub>3</sub> E. Reducción con Cadmio. El Nitrato es reducido casi cuantitativamente a Nitrito en presencia de cadmio (agregado como gránulos de Cu-Cd), luego se aplica el método SM-4500-NO<sub>2</sub> B recién comentado, corrigiendo el resultado en caso de presentar Nitrito inicialmente. LD: 2 µg(N)/L.

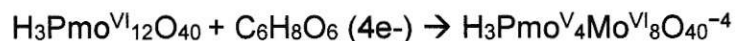
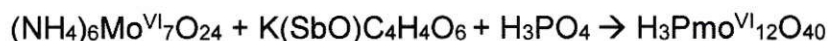
---

<sup>7</sup>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th Edition 2005





- **Determinación de N total:** SM-4500-N-C. Oxidación por Persulfato, luego SM-4500-NO<sub>3</sub> E. Todas las formas de nitrógeno de la muestra son oxidadas a Nitrato y luego se aplica el método para éste recién descrito. LD: 15 µg N/L.
- **Cuantificación de Ortofosfato (Fosfato):** SM-4500-P E. Ácido Ascórbico. Molibdato de amonio y tartrato de antimonio-potasio reaccionan en medio ácido (pH 2 – 2.5) con Ortofosfato para formar un heteropoliácido (ácido fosfomolibdico) que se reduce a azul de molibdeno muy coloreado (azul) al agregar ácido ascórbico. Esta especie absorbe en el infrarrojo a 880 nm, cuantificando P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>. LD: 2 µg(P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)/L, correspondiendo a 6 µg(PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)/L. Las especies químicas de interés en la reacción son las siguientes. Se muestra el estado de oxidación del molibdeno.



- **Determinación de P total:** SM-4500-P B-5. Digestión con Persulfato. Todas las formas de P de la muestra se oxidan con Persulfato a pH ácido en un autoclave, obteniendo Ortofosfato el cual es analizado como recién fue descrito. LD: 2 µg(P)/L.
- **P orgánico total:** P total – P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>. El resultado del fósforo de Ortofosfato es sustraído al del fósforo total. LD: 3 µg(P)/L.
- **Clorofila a:** 1 L de muestra pasa por un filtro con apertura de poro de 0,7 µm, el cual se deja por 24 hrs a 4°C dentro de un frasco de 50 mL con 7 mL de acetona al 90%. Luego se mide absorbancia a 630, 647 y 664 nm, para aplicar la fórmula para calcular clorofila “a” según SCOR Unesco 1968. LD: 0,1 µg/L.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Revisión Bibliográfica

##### 3.1.1 Antecedentes del lago Neltume

- **Ubicación y características.** El lago Neltume es un cuerpo de agua de origen glaciar, de casi 10 km<sup>2</sup> de superficie y una profundidad máxima de unos 85 m. Se ubica en la comuna de Panguipulli, XIV Región de Los Ríos, en la cuenca del Río Valdivia, entre los lagos Pihueico (al SE) y Panguipulli (al O), perteneciendo al destino turístico “Siete Lagos” (pág. web Municipalidad de Panguipulli).
- **Afluentes.** Sus afluentes principales son el río Cuacué por el norte y el río Chanchán por el sureste, mientras que su único efluente es el río Neltume por el sur, que pronto se une con el río Fuy y dan origen al río Llanquihue, que desemboca en el lago Panguipulli.
- **Clima.** El clima de la zona corresponde a templado lluvioso frío con influencia mediterránea, cuya temperatura media anual es de 11°C, con extremas anuales de -2 y 33 °C, pero la media en meses cálidos no supera los 16 °C. La precipitación anual puede superar los 5000 mm dependiendo del sector (Endesa 2010).
- **Características físicas y químicas.** La Tabla 7 muestra las características principalmente químicas, determinadas en un muestreo puntual en el tiempo (noviembre de 2012) en el lago Neltume realizado por la Universidad Austral, quienes en su informe además comparan sus resultados con estudios anteriores y destacan que las condiciones de trofia no han cambiado en gran medida, manteniendo un

estado oligotrófico. Cabe destacar que no se muestran metales como calcio y hierro puesto que el objetivo del estudio fue analizar la trofia del lago, por lo que adjuntan en ese informe solamente datos históricos de N-total, P-total, clorofila-a y transparencia.

**Tabla 7.** Características promedio de dos puntos de muestreo del agua superficial del lago Neltume a noviembre de 2012 (U. Austral de Chile 2012)

Variable	Valor	Variable	Valor	Variable	Valor
Profundidad (m)	0	Saturación O <sub>2</sub> (%)	102	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µg/L)	<2
Temperatura (°C)	17-18	DQO (mg/L)	13	N Total (µg/L)	51
Cond. Eléc. (µS/cm)	50	SiO <sub>2</sub> (mg/L)	3-15*	P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (µg/L)	<2
pH	7,4	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µg/L)	<2	P Total (µg/L)	9
O <sub>2</sub> disuelto (mg/L)	9,6	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)	<2	Clorofila a (µg/L)	0,6

**Transparencia (disco Secchi):** 9 metros.

\*15 al centro del lago, 3 cerca del río Cuacúa.

**DQO:** Demanda Química de O<sub>2</sub>

**CE:** Conductividad Eléctrica.

Estos resultados indican que la mayor fuente tanto de Nitrógeno como de Fósforo es del tipo orgánico, puesto que: 1) el N de Amonio, Nitrito y Nitrato son muy bajos respecto del N-total (51 µg/L), y, 2) P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> es < 2 µg/L y el P-Total es 9 µg/L (Tabla 7). Esto también es supuesto por los autores (según gráficos del informe). Históricamente además, se vio que la variabilidad de P Total en el agua superficial de este lago es relativamente alta (Anexos de U. Austral de Chile 2012), variando desde 3 hasta 15 e incluso 26 y 28 µg (P)/L dependiendo del año. Aun así, y probablemente por los bajos valores de N total y de clorofila "a" (Tabla 7), los autores confirman la oligotrofia del lago, según Tabla 16 del Anexo confeccionada por ellos.

En este mismo estudio se analizaron las aguas de los ríos Cuacúa, Chanchán y Fuy, los cuales presentaron valores similares a los de la Tabla 7. Sin embargo se destacan



los resultados de la concentración de Fosfato, ya que se vio que este nutriente podría ser relevante para el desarrollo de *D. geminata*: <6 – 41 – <6 µg/L respectivamente.

Las tablas 8-10 muestran los resultados de campañas realizadas por Endesa en el lago Neltume para un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Hay que destacar que el EIA realizado por Endesa tiene una gran cantidad de datos, por lo que en la Tabla 8 se muestran sólo los más relevantes para *D. geminata* y/o comparables con la Tabla 7.

**Tabla 8.** Características promedio del agua superficial del lago Neltume entre primavera 2006 e invierno 2008, más el invierno de 2010. 8 campañas (Endesa 2010).

Variable	Rango	Variable	Rango
Temperatura (°C)	7-21	Clorofila a (µg/L)	<0,1 - 2
O <sub>2</sub> disuelto (%)	80 - 106 %	DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	<2 - 6
pH	6,9 - 7,6	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µg/L)	<10
Cond. Eléc. (µS/cm)	40 - 50	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)	<2
Ca <sup>+2</sup> (mg/L)	4 - 5	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µg/L)	<40
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	4 - 9	N-Total (µg/L)	-
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	1 - 4	P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (µg/L)	<10
Fe (µg/L)	<2 – 306	P Total (µg/L)	<15*

NOTA: No hay mediciones del Nitrógeno total.

DQO: Demanda Química de O<sub>2</sub>

En general, los autores destacan el carácter bicarbonato-cálcico del agua, de pH neutro, con buena oxigenación y una conductividad favorable, catalogando al lago como con aguas aptas para la vida acuática, para aguas de regadío y para uso recreativo con contacto directo, acorde a la Norma Chilena 1333 de 1978 sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Al igual que la Universidad Austral catalogan al lago como oligotrófico.

Para complementar esta información, se cuenta con datos de otras campañas de Endesa al lago Neltume: diciembre 2012, junio 2013 y diciembre 2013, en las cuales

se muestrearon 6 puntos del lago. La Tabla 9 muestra las características de su agua superficial. Los valores mostrados corresponden al promedio de las 3 campañas, y de cada campaña se promediaron los 6 puntos.

**Tabla 9.** Características fisicoquímicas y de bacterias promedio del agua superficial del lago Neltume entre diciembre 2012 y diciembre 2013, según campañas de Endesa.

<b>Variable (unidad)</b>	<b>Valor</b>	<b>SD</b>	<b>RSD</b>	<b>Variable (unidad)</b>	<b>Valor</b>
Aluminio (mg/L)	0,04	0,02	48%	Aceites y Grasas (mg/L)	<5,0
Bario (mg/L)	0,006	0,004	68%	Arsénico (mg/L)	<0,001
Boro (mg/L)	0,05	0,03	70%	Berilio (mg/L)	<0,0002
Calcio (mg/L)	3,5	2,3	66%	Cadmio (mg/L)	<0,001
Cond. Eléc. (µS/cm)	43	5	13%	Cianuro (mg/L)	<0,02
Cloruros (mg/L)	2,7	1,5	55%	Cobalto (mg/L)	<0,005
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	< 2 - 5	-	-	Cobre (mg/L)	<0,005
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	< 2 - 6	-	-	Cromo (mg/L)	<0,005
Hierro (mg/L)	0,031	0,026	83%	Fluoruro (mg/L)	<0,10
Magnesio (mg/L)	1	0,4	40%	HC totales (mg/L)	<5,0
Manganeso (mg/L)	0,003	0,001	33%	HC volátiles (mg/L)	<0,10
Sodio (mg/L)	5,2	1,8	35%	Litio (mg/L)	<0,003
SDT (mg/L)	32	4	13%	Mercurio (mg/L)	<0,001
Vanadio (mg/L)	0,012	0,04	33%	Molibdeno (mg/L)	<0,005
Zinc (mg/L)	0,021	0,017	81%	Níquel (mg/L)	<0,005
Coliformes Fecales (NMP/100 mL)	2,9	1,8	62%	Plata (mg/L)	<0,002
				Plomo (mg/L)	<0,010

**NOTA :** La concentración de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> no se muestra porque el límite de detección del método utilizado es demasiado alto (1 mg/L). Los autores acudieron un laboratorio distinto respecto de la Tabla 8 y el método usado (SM 4110-B) es menos sensible.

**SD** : Desviación estándar                      **SDT** : Sólidos Disueltos Totales  
**RSD** : SD relativa (al promedio)              **NMP** : Número Más Probable  
**DBO<sub>5</sub>** : Demanda Bioquímica de O<sub>2</sub>, día 5    **HC** : Hidrocarburos  
**DQO** : Demanda Química de O<sub>2</sub>

Excepcionalmente, en la tercera campaña se muestrearon parámetros tróficos del lago, es decir Nitrógeno, Fósforo y clorofila "a", para los mismos 6 puntos de muestreo.

**Tabla 10.** Parámetros tróficos promedio del lago Neltume en diciembre de 2013.

Parámetro (unidad)	Valor	Parámetro (unidad)	Valor
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µg/L)	<2	P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> (µg/L)	2
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/L)	<2	P-Total (µg/L)	8
N-Total (µg/L)	54	Clorofila a (µg/L)	0,8

Las Tablas 7, 8, 9 y 10 muestran que el lago Neltume presenta:

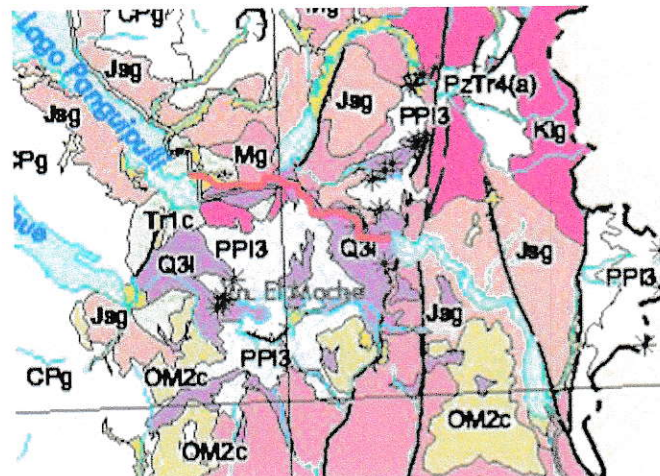
- pH levemente alcalino (hasta 7,6).
- Baja conductividad (entre 40 - 50 µS/cm).
- Escasa presencia de metales pesados.
- Estado oligotrófico (ver Tabla 16 en Anexo), puesto que el P-Total bordea los 8 - 9 µg/L, el N-Total los 52 µg/L, la clorofila entre < 0,1 - 2 µg/L y el disco de Secchi se ve hasta los 9 metros.
- Valores de < 2, < 10 y 2 µg/L para P-PO<sub>4</sub>, indicando probablemente que este último valor sea el más certero (correspondiendo a unos 6 µg/L de Fosfato).
- Alta variabilidad de Hierro entre estudios y tiempo de muestreo (< 2 - 300 µg/L).
- Los niveles de Calcio y Sulfato son bajos (entre 1 - 6 mg/L) pero no suficientes como para imposibilitar la vida de *D. geminata*.
- La Demanda Química de Oxígeno presentó un máximo de 13 mg/L, manteniéndose bajo los 20 mg/L que es el límite aproximado en un agua no contaminada (OMS 1996).



### 3.2.1 Antecedentes de los ríos

#### 3.2.1.1 Geología y régimen fluvial de la cuenca

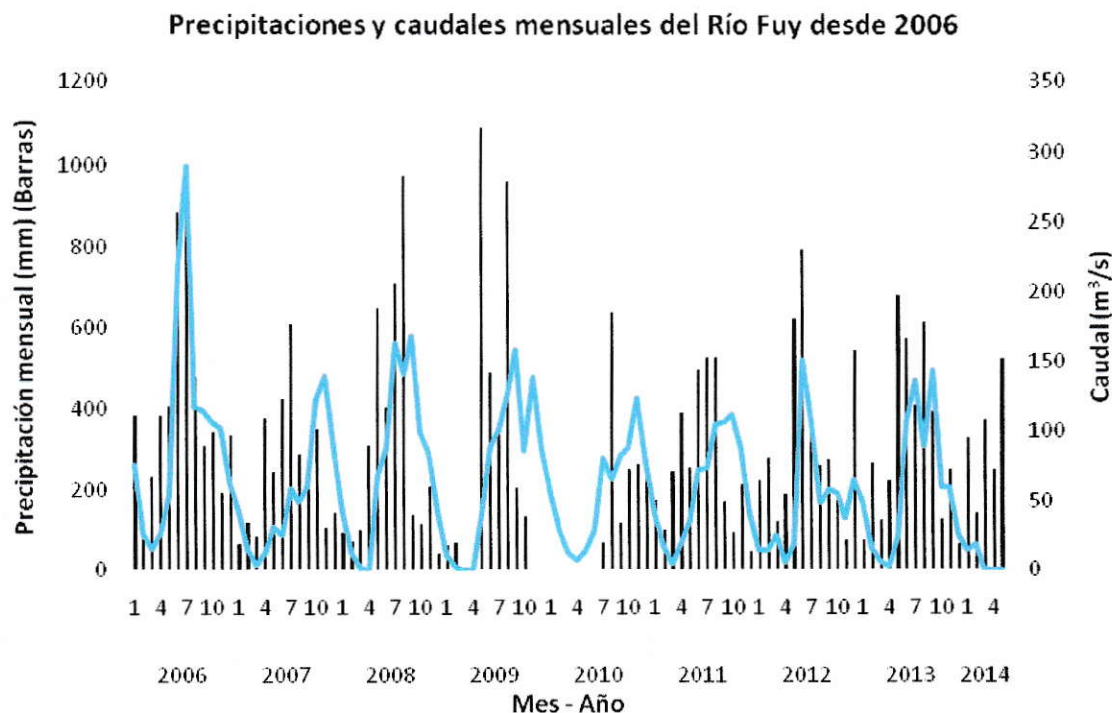
Según el mapa geológico de Chile (Figura 17), el río Fuy se encuentra en su totalidad sobre secuencias volcánicas (sustratos, lechos). Hay que destacar también que el lago Pihueico y su mayor tributario (río Hua-hum), que es de donde nace el río Fuy, se ubican sobre secuencias intrusivas<sup>8</sup>. Este lago también tiene una leve influencia de secuencias volcano-sedimentarias al sur, y sedimentarias por otro de sus tributarios al sureste.



**Figura 17.** Mapa geológico del área de estudio (Sernageomin 2003). En rojo y al centro: río Fuy. Sobre las secuencias geológicas: Q3l, PPI3: volcánicas; Jsg, Mg: intrusivas; OM2c: volcanosedimentaria.

A continuación se presenta la Figura 18 en la cual se aprecia el régimen fluvial del río Fuy, el cual es fundamentalmente pluvial, es decir su caudal depende fuertemente de las precipitaciones.

<sup>8</sup> Tanto rocas volcánicas (extrusivas) como rocas intrusivas son rocas ígneas. Las primeras se enfrían en superficie, mientras que las segundas bajo tierra y luego emergen.



**Figura 18.** Precipitaciones y caudales mensuales promedio de río Fuy desde 2006 (DGA).

**NOTA 1:** La inexistencia de barras (p. ej. a fines de 2009 hasta mediados de 2010) se debe a la falta de datos por parte de la DGA.

**NOTA 2:** Algunos pocos meses poseen entre 1-10 u 11-19 días con datos, por lo que la cantidad mensual real podría estar subestimada en esta Figura.

Sin embargo, en el EIA, Anexo K de la Central Hidroeléctrica Neltume (Endesa 2010), se menciona un régimen de descarga la cuenca tipo mixto, es decir pluvio-nival, con crecidas o aumentos de caudal también en verano por los deshielos. Así, este río presenta como caudal promedio unos  $63 \text{ m}^3/\text{s}$ , el cual varía desde prácticamente cero (Endesa 2010) hasta casi 300 mil litros por segundo, como el año 2006, pero más frecuentemente hasta  $100\text{-}150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 3.2.1.2 Parámetros físicos y químicos

Mediciones realizadas por ENDESA y datos del Sernageomin (Tabla 11) en seis ríos de la subcuenca en estudio, muestran que en general los parámetros son parecidos respecto del lago Neltume.

- Valores de pH levemente alcalinos (6 - 8,2).
- Baja conductividad (30 – 75  $\mu\text{S/cm}$ ).
- Baja DQO (excepto un dato en Chanchán).
- Características oligotróficas sobre todo en N-Total y Clorofila "a", salvo casos puntuales de P-Total en ciertos ríos y años (ver Tabla 17 en Anexo).

Sin embargo, los ríos presentaron rangos más amplios en ciertos valores Sulfato (1 – 8 mg/L) y Calcio (hasta 17 mg/L), pero sobre todo Hierro (<2 – 1300 mg/L) y Fosfato (6 – 69  $\mu\text{g/L}$ ); además de valores más altos de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (algunos bordeando los 100  $\mu\text{g/L}$ , versus los <2  $\mu\text{g/L}$  del lago) y Fosfato (apenas 6  $\mu\text{g/L}$  en lago).

En cuanto a la geología, la subcuenca se encuentra prácticamente sobre roca ígnea (ya sea volcánica o intrusiva), con un poco de roca sedimentaria y nada de metamórfica.



**Tabla 11.** Rango de características de los ríos del área de estudio según Endesa (2010) y Sernageomin (2003).

Río →	Fuy	Neltume	Chanchán	Llanquihue	Triful	Cuacúa
Variable	Rango	Rango	Rango	Rango	Rango	Rango
<b>Fechas DM*</b>	P6, O7, I7	P6, O7, I7	P6 - I8	P6, O7, I7	P7 V7 O8	P6 - I8
<b>N° Puntos DM</b>	7	2	2	3	1	4
<b>Temp. (°C)</b>	5 - 22	7 - 20	6 - 15	7 - 17	6 - 11	6 - 20
<b>O<sub>2</sub> Dis.(%)</b>	95 - 110	84 - 98	95 - 104	72 - 110	72 - 100	84 - 103
<b>pH</b>	7,1 - 8,0	6,7 - 7,7	7,3 - 8,2	6,8 - 8,4	7,2 - 7,4	6,0 - 7,8
<b>Cond. Eléc.</b> ( $\mu$ S/cm)	30 - 60	40 - 60	35 - 70	40 - 60	16 - 30	30 - 75
<b>Ca (mg/L)</b>	6 - 8	4 - 6	4 - 9	5 - 9	2	4 - 12
<b>SiO<sub>2</sub> (mg/L)</b>	5 - 8	6 - 8	5 - 12	8 - 10	5 - 7	3 - 9
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (mg/L)</b>	2 - 4	2 - 5	1 - 3	2 - 4	1	1 - 8
<b>Fe (<math>\mu</math>g/L)</b>	<2 - 1000	<2 - 160	<2 - 1300	<2 - 140	<2 - 770	20 - 400
<b>Clorofila a</b> ( $\mu$ g/L)	<1 - 1	<1 - 3	<1 - 2	<1 - 6	<1 - 1	<1 - 2
<b>DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<2	<2	<2	<2	<2	<2
<b>DQO (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<2 - 13	<2 - 8	<2 - 38	<2 - 11	<2 - 2	<2 - 8
<b>N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (<math>\mu</math>g/L)</b>	<10 - 20	<10	<10 - 40	<10	<10	<10 - 50
<b>N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (<math>\mu</math>g/L)</b>	<2	<2	<2	<2	<2	<2
<b>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (<math>\mu</math>g/L)</b>	<40 - 380	<40	<40 - 140	<40	<40	<40 - 150
<b>P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (<math>\mu</math>g/L)</b>	<10 - 23	<10	<10	<10 - 14	<10 y 23	<10
<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (<math>\mu</math>g/L)</b>	<b>&lt;30 - 69</b>	<b>&lt;30</b>	<b>&lt;30</b>	<b>&lt;30 - 42</b>	<b>&lt;30 - 69</b>	<b>&lt;30</b>
<b>P-Total (<math>\mu</math>g/L)</b>	<15	<15	<15 - 50	<15	<15 y 45	<15 - 100
<b>Secuencias geológicas del cauce</b>	Volcánica	Intrusiva; Volcánica	Intrusiva; Volcánica	Intrusiva/ Volcánica; Sedimentaria	Volcánica	Sedimentaria > Intrusiva

\*DM: "de muestreo". P: primavera, V: verano, O: otoño, I: invierno. Los números indican el año.

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de O<sub>2</sub> al día 5

DQO: Demanda Química de O<sub>2</sub>

Las relativas grandes cantidades de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (380, 150, 140  $\mu$ g/L), P-PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (23  $\mu$ g/L), P-Total (45, 100, 50  $\mu$ g/L) y Fe (1000, 1300  $\mu$ g/L) ocurrieron puntualmente, todas en otoño o invierno. La gran DQO (38 mg/L) de Chanchán en verano 2007.

**Nota:** este estudio de impacto ambiental no entrega información sobre el tamaño de sustrato (fondo del río) ni su distribución en los cauces.

Por su parte, la Dirección General de Aguas (DGA) sólo posee una estación de monitoreo en la subcuenca del Río Valdivia Alto, que corresponde al río Fuy en el desagüe del lago Pihueico (Tabla 12). Esto dificulta el análisis pues no representa todo el río, pero se presenta los antecedentes con fines comparativos

**Tabla 12.** Características fisicoquímicas promedio del río Fuy entre 2006 y 2014 (DGA)

Parámetro (unidades)	Valor	Parámetro (unidades)	Valor
Temperatura (°C)	11	Al tot (mg/L)	<0,3
pH	7,6	As tot (mg/L)	<0,001
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	2,1	B (mg/L)	<1
Ca tot (mg/L)	5,6	Cd (mg/L)	<0,01
Ca dis (mg/L)	4,0	Co tot (mg/L)	<0,01
Cond. Eléc. (µS/cm)	47	Cu tot (mg/L)	<0,01
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	12,5	Cr 6 (mg/L)	<0,01
DQO (mgO <sub>2</sub> /L) (rango)	< 1 - 44	Cr tot (mg/L)	<0,01
Fe tot (mg/L)	0,04	Mn tot (mg/L)	<0,02
Mg tot (mg/L)	1,0	Hg tot (mg/L)	<0,001
Mg dis (mg/L)	0,8	Mo tot (mg/L)	<0,03
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/L)	<4,2	Ni tot (mg/L)	<0,02
K tot (mg/L)	0,6	Ag tot (mg/L)	<0,01
K dis (mg/L)	0,4	Pb tot (mg/L)	<0,05
Na tot (mg/L)	2,5	Se dis (mg/L)	<0,001
Na dis (mg/L)	2,1	Zn tot (mg/L)	<0,01

DQO: Demanda Química de O<sub>2</sub>

**NOTA 1:** La nomenclatura corresponde a la entregada por la DGA.

**NOTA 2:** Entre 2007 y 2009, los valores de DQO y Fosfato anormalmente oscilaron entre aprox. 20 - 44 mgO<sub>2</sub>/L y 9 - 132 µg/L respectivamente. La DQO tiene una desviación estándar relativa al promedio (RSD) de 110%. El PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> se mantuvo bajo el LD (9 µg/L) el resto del tiempo pero no fue incluido en la Tabla porque además de esta gran variabilidad, la DGA no cumplía el tiempo de preservación de 48 hrs, dejando de medirlo el año 2012 para cumplir certificación ISO 17025 (es aplicada por los laboratorios de ensayo y calibración para demostrar que son técnicamente competentes y capaces de producir resultados válidos). Si la muestra para determinar Fosfato no se analiza pronto, los niveles pueden verse alterados, resultando valores erróneos.

En el río Fuy se observa características muy similares a las del lago Neltume (baja cantidad de electrolitos, baja conductividad, pH levemente alcalino, ausencia de metales pesados, etc.) exceptuando los altos niveles de DQO y Fosfato entre los años 2007-2009, atribuibles a posibles actividades antrópicas puesto que a pocos metros se encuentra la localidad de Puerto Fuy.

## 3.2 Resultados de la campaña en terreno

### 3.2.1. Observaciones y características de los puntos de muestreo

Es importante mencionar que la visita a terreno no se pudo realizar en primavera-verano y fue realizada al inicio del otoño, es decir, cuando *D. geminata* ya no debería crecer más. Esto significa que 3-5 meses antes, en plena época de crecimiento, con condiciones de luz y nutrientes más favorables, los resultados podrían variar; aunque habría que considerar la factibilidad del muestreo según condiciones hídricas (Figura 18).

Primero se describen físicamente los 7 puntos muestreados, lo cual es importante para relacionar estas características con las fisicoquímicas y la presencia y/o abundancia de didymo.

**Fuy 1:** Justo en esta pequeña zona hay velocidad y leve turbulencia. Ribera norte de gran altura y con árboles, posible sombra pero leve. Gran cantidad de musgos gruesos (un par de centímetros) en la ribera, y algas verdes como "hilachas" en el centro. El sustrato es más bien grande y heterogéneo, desordenado. *D. geminata* ausente en bentos y **presente** escasamente en plancton.

**Fuy 2:** El agua fluye muy tranquila y lentamente, sorprendiendo también por su claridad. El sustrato es de tamaño medio, menor que el punto anterior y más homogéneo. No se evidencian floraciones algales, salvo unas "como algodón" beige sobre los sustratos más pequeños al fondo, entre las rocas. Hay un gran árbol que puede dar sombra. Macrobentos compuesto por caracoles pequeños y pancoras. *D. geminata* ausente tanto en bentos como en plancton.



**Fuy 3:** Aguas claras. Sustrato fuertemente invadido por una floración algal viscosa, beige, muy fibrosa y resistente; presuntamente didymo, de principio a fin (aprox. 70% de todo el cauce visible); sobre el agua habría didymo seco, blanco, y bajo ella, didymo beige pero de menos de 2 cm de espesor (algunos mezclados con musgos). El sustrato es bastante grande, más que en Fuy 1. Rocas negras porosas tienden a tener didymo a mayor frecuencia. Hay árboles que podrían dar poca sombra. ***D. geminata* presente** tanto en bentos como en plancton.

**Neltume 5:** Agua clara casi sin sombra. Caudal veloz en la ribera oeste (no muestreada). Las velocidades además son variables dependiendo del punto exacto. El sustrato es de tamaño medio y sin floraciones algales, salvo algunas algas verdes "como hilachas" en el centro del río y un poco de alga café polvorienta<sup>9</sup> en la ribera Este. Se avistaron numerosos macroinvertebrados (aprox. 15), sobre todo pancoras. ***D. geminata* ausente** tanto en bentos como en plancton.

**Chanchán 6:** 70-90% de cobertura algal, principalmente de dos tipos: una café polvorienta y otra beige resistente (se sale al aplicar fuerza considerable) pero menos fibrosa que la de Fuy 3. La primera ubicada en las orillas con menor velocidad del agua mientras que la más resistente en el centro del río a mayores velocidades. El agua es clara. La ribera norte es un barranco, no tiene orilla como tal, provocando leve sombra en sectores. ***D. geminata* presente** tanto en bentos como en plancton.

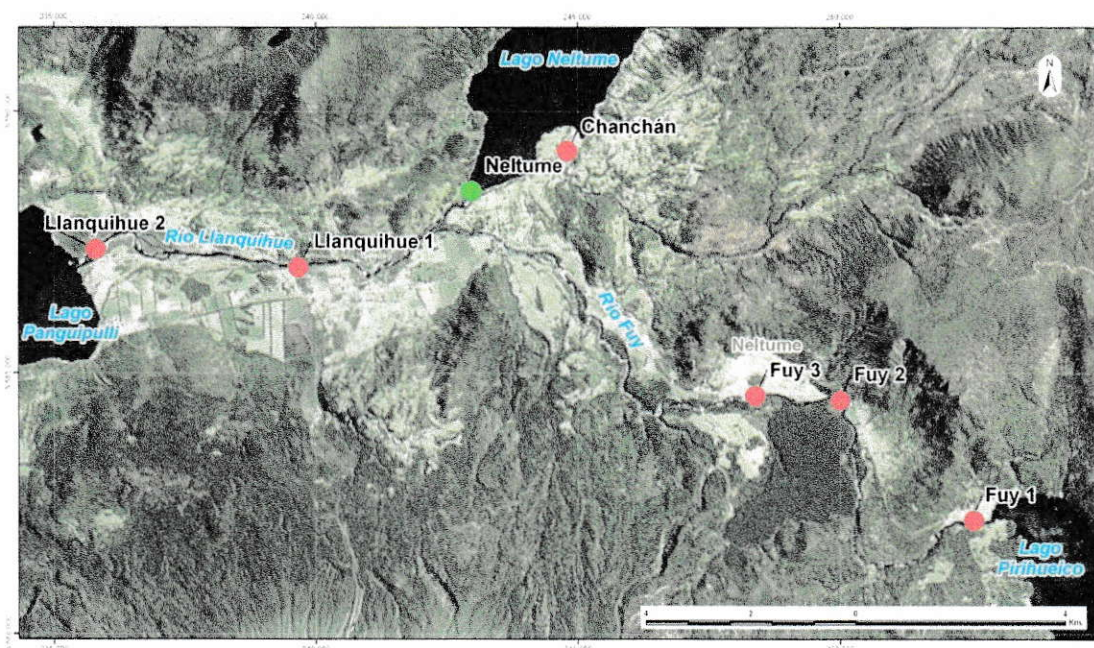
**Llanquihue 7:** Muchos insectos voladores pequeños. Agua con poca claridad (quizá por la poca luz de día), y caudal muy fuerte al centro de la corriente. Sustrato con

---

<sup>9</sup> No porque tenga polvo sino por su apariencia y comportamiento al ser tocada (se deshace, flota y fluye como si fuera polvo)

rocas grises muy grandes, formando pozones en la ribera sur donde hay floraciones café polvorientas. *D. geminata* presente tanto en bentos como en plancton.

**Llanquihue 8:** La orilla es bastante amplia, con bolones grises redondeados, homogéneos. Caudal de baja profundidad, corriente leve. Sorprendente cobertura de floraciones algales café polvorientas, cubriendo un 70-90% del sustrato. *D. geminata* presente tanto en bentos como en plancton.



**Figura 19.** Resultados en cuanto a presencia y ausencia de *D. geminata* en los ríos del área de estudio; puntos rojos y verdes respectivamente.

Mediante la comparación esta Figura 19 con la Figura 16 (pág. 37) se puede apreciar que los puntos donde originalmente se tenía información sobre la presencia o ausencia de *D. geminata* se mantuvieron en la misma condición, sin embargo los que no se tenía información (Fuy 1 y Chanchán) resultaron positivos en cuanto a presencia de didymo.



Esto podría sugerir que *D. geminata* se expandió a nuevos puntos, destacando que Fuy 1 es aguas arriba de los puntos originales, indicando que aún más aguas arriba es probable que hayan poblaciones de *D. geminata*, ya sea en el lago Pirihueico y/o en el río Huahum. Finalmente se destaca el hecho de que el río Neltume se mantenga con ausencia de la microalga, siendo que éste es el único efluente del lago Neltume, el cual aparentemente recibe células de *D. geminata* mediante el río Chanchán.

### 3.1.2. Resultados del análisis de muestras

En Tablas 13 y 14 se presentan los resultados obtenidos del análisis químico y biológico de las muestras obtenidas en terreno

**Tabla 13.** Características fisicoquímicas del agua de los ríos muestreados. Las estaciones de muestreo sin color indican ausencia de floraciones algales masivas, mientras que el color de la celda corresponde al color de la floración.

	Fuy			Neltume	Chan- chán	Llanquihue	
	Fuy 1	Fuy 2	Fuy 3	Nel 5	Chan 6	Llanq 7	Llanq 8
Cond. Eléc. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	54	59	59	47	57	63	59
Sílice total (mg/L)	6,2	6,2	6,0	7,4	17,3	14,1	9,6
Sulfato (mg/L)	2,7	2,9	2,7	4,4	3,7	3,9	4,1
Calcio (mg/L)	9,8	10,7	9,4	6,8	17,7	15,5	7,6
Hierro (mg/L)	0,037	0,011	0,018	0,105	0,246	0,305	0,016
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	122	25	14	63	48	31	41
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	<2	<2	<2	<2	<2	2	<2
N-Total ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	446	218	218	293	291	428	259
P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	13	4	2	6	18	28	17
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )*	<b>39</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>18</b>	<b>54</b>	<b>84</b>	<b>51</b>
P-Total ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	14	10	8	18	37	49	27
P-Org. Tot ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	10	8,7	7,4	16	31	40	21
Clorofila a ( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	0,5	0,3	0,6	1,8	0,7	4,2	1,0

\*Calculado (pues PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> es el triple de P en masa o peso, 95 y 31 g/mol respectivamente)



**Tabla 14.** Presencia/ausencia (U. de Chile) y abundancias (Amakaik) absolutas y relativas (en paréntesis) de *D. geminata*.

	Hábitat	Fuy 1	Fuy 2	Fuy 3	Nel 5	Chan 6	Llanq 7	Llanq 8
UCH	Plancton	Escasa*	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Bentos	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Amakaik	Plancton sp (cél./L)	0 (0%)	4 (4%)	2554 (6%)	0 (0%)	1950 (3%)	209 (1%)	46 (1%)
	Plancton gn (cél./L)	0 (0%)	3 (2%)	52 (3%)	0 (0%)	431 (53%)	0 (0%)	179 (8%)
	Bentos sp	0 %	2, 1, 4, 1 %	1, 1, 0 %	0 %	1, 4, 0 %	0 %	0, 1, 2 %
	Bentos gn	0 %	1, 2, 1, 1 %	1, 5, 3 %	0 %	2, 6, 1 %	1 %	1, 1, 1 %

\*La analista revisó la muestra repetidas veces y sólo encontró un par de células de *D. geminata*.

% sp: a nivel de especie.

% gn: a nivel de género.

NOTA: Cada valor corresponde a 1 envase, ya sea frasco o tubo tipo Falcon.

Respecto del muestreo biológico, se encontraron dos zonas con grandes floraciones algales con las características de didymo (color beige, textura como algodón y resistente a la fricción), en Fuy 3 y en Chanchán. Por otro lado, floraciones color café oscuro y de aspecto polvoriento, si bien dieron positivo para *D. geminata*, ésta no pareciera ser la causante principal de la biomasa debido al color y textura diferentes. En cuanto a resultados numéricos, las grandes diferencias entre abundancias absolutas para un mismo punto (Fuy 3 y Chan 6), además de las abundancias relativas de 0% y cualquier otro número para un mismo punto (Fuy 3, Chan 6 y Llanq 8) indican que el muestreo es fundamental para concluir correctamente. Un muestreo insuficiente puede resultar falsos negativos.

A pesar de contar con pocos datos (siete puntos muestreados, una sola vez), el análisis general de la situación encontrada a fines de marzo de 2014, en base a las descripciones de los ríos y a las Tablas 13 y 14, es el siguiente:

- En Fuy 3 y Chan 6, los tapetes tienen las características didymo (color, textura y firmeza), mientras que en Llanq 7 y 8 no; y en Fuy 2, Fuy 1 y Nel 5 prácticamente no hubo floraciones visibles, incluso, en las últimas dos no se encontró *D. geminata* en el fitobentos.
- Respecto de las variables ambientales analizadas, conductividad eléctrica, Sulfato, Nitrito y I Cloforila "a" se encontraron similares en todos los puntos, lo que implica que no hay diferencias significativas entre si hay didymo o no, ni si florece o no.
- Aunque el resto de los factores variaron entre puntos, **no** hay diferencias entre los puntos con tapetes con características didymo y los otros puntos. Es decir, se dio que con bajos y con altos valores<sup>10</sup> de Sílice, Calcio, Hierro, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-Total, Fosfato, P-Total y P-orgánico, hubo presencia (Fuy 3 y Chan 6) y ausencia de tapete como didymo (Llanq 7, Lanq 8 y Fuy 2).  
 Por ejemplo: Fuy 3 presenta 6 µg/L de Fosfato mientras que Chan 6, 54 µg/L, y en ambos hubo desarrollo de tapetes, por otro lado en Fuy 2 (solo 12 µg/L) y Llanq 7 (84 µg/L), *D. geminata* está presente pero no florece.  
 Esta relación se puede realizar con cualquiera de los otros 7 factores ambientales nombrados.
- Se encontró tapetes con características didymo en sustratos medianos (Chan 6) y grandes (Fuy 3), así como también no se encontró en otros medianos (Llanq 8) ni otros grandes Lanq 7), estando presente a nivel celular.

---

<sup>10</sup> "Bajo valor" relativo o respecto de los otros, y "alto valor" también respecto del resto. No significa que algún parámetro sea bajo o alto para calidad del agua u otro aspecto.

Otra limitación de este análisis de resultados, es suponer que las floraciones de Fuy 3 y Chan 6 son principalmente didymo, pues si bien ambas eran beige y resistentes al tacto (fricción), las segundas eran más fibrosas, pudiendo sugerir una comunidad distinta de especies. Posiblemente debido a que no sólo había *D. geminata* en las muestras biológicas, sino que también de los géneros *Gomphoneis.*, *Gomphonema* y *Cymbella.* (formadoras de tallos) en el mismo rango de abundancias (todas bajo 8% excepto un frasco con *Gomphoneis* a 38% en Llanquihue 7) y quizás otras que pueden provocar o aumentar floraciones (datos no mostrados), dependiendo del río.

Bajo estas condiciones y sin el respaldo fotográfico del sitio exacto donde se obtuvo cada frasco o tubo (muestra), no se puede cuantificar ni el grosor ni la cobertura real de didymo pues puede ser una mezcla de diatomeas o netamente otra especie la predominante, como en río Llanquihue donde la floración no reúne las características didymo (eran café oscuras y sensibles al tacto, tanto que parecían polvo grueso en suspensión una vez removidas). Además se sabe que *Gomphoneis minuta* (nativa) no se puede diferenciar a simple vista de *D. geminata*, requiere microscopio (Reid & Torres 2014).

**Límite de detección de Fosfato logrado en el método usado en este seminario:** (Tabla 5). Éste se encuentra en el límite que implícitamente se recomienda para estudiar la relación entre el nivel de Fosfato y el crecimiento de *D. geminata* (Bothwell & Kilroy 2011; Kilroy & Bothwell 2012), es decir si bien no es óptimo por estar en el límite, es aceptable y útil. El hecho de no saber el método de la DGA para determinar Fosfato no es de gran relevancia porque el LD no es óptimo, además que ya no miden este parámetro. Por otro lado, habría sido interesante y quizás útil conocer el de



Bothwell y col. (2009), junto con su LD, debido a que cuenta con una cifra decimal. Por ejemplo, probablemente la celda usada en Endesa (2010) Primavera 2006 era más angosta, logrando sólo un LD de 30 µg/L de Fosfato.

### 3.3 Posibles medidas de control de abundancia

#### 3.3.1 Manejo de nutrientes

Al respecto, Whitton y col. (2009) comentan dos trabajos donde en uno estudian la adición de fertilizante (no se encontró la publicación de resultados) mientras que en otro recomiendan añadir Fosfato inorgánico aguas arriba en el río afectado, pero está en duda si se debe aumentar la razón Nitrógeno/Fósforo o fósforo inorgánico/orgánico (solubles). Si se opta por añadir  $\text{PO}_4^{-3}$ , debe ser en primavera temprana, cuando empieza la formación de tallos. Por otro lado, se puede evaluar la posibilidad de aumentar la cantidad de Ortofosfato descargado por plantas de tratamiento de aguas residuales, en caso que la falta de este nutriente sea el problema, como al parecer lo era en Lumbreras, España (Ladrera y col. 2015)

Años después, James & Chipps (2012) llevaron a cabo un experimento de enriquecimiento con fósforo inorgánico en una zona de un río afectado por *D. geminata*, con el fin de determinar si tal enriquecimiento disminuía la cobertura de didymo. Usaron un diseño de estudio del tipo “impacto de control antes-después” y observaron que al agregar fósforo inorgánico, las cantidades de clorofila “a” (que da una idea de la abundancia de productores primarios y por ende de la salud del sistema natural) y de individuos del perifiton del río aumentaron levemente, incluyendo células de *D. geminata*, y si bien su cobertura efectivamente disminuyó, sólo fue en unos 600



metros desde el sitio de enriquecimiento, por lo que concluyen que los beneficios no valen más que los costos.

Relacionado con lo anterior, Ladrera y col. (2015) encontraron que no se presentaron floraciones masivas de didymo justo aguas abajo de una descarga de aguas residuales no tratadas, las cuales hicieron aumentar el fósforo reactivo disuelto desde 42 hasta 297  $\mu\text{g/L}$ ; el resto de los parámetros ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , pH) tuvieron cambios menores o nulos .

Anteriormente, Sutherland y col. (2007) llevaron a cabo un experimento en terreno, donde colocaron sustratos colonizados con didymo en varios manantiales (nacientes de ríos) que no presentaban plaga. Resultó que, sin excepción, la viabilidad celular declinó en todos los sitios experimentados respecto al río de origen. Sin embargo, dentro de los parámetros analizados (que no incluye fósforo) no hubo diferencias comunes entre los ríos y sus manantiales respectivos que pudiera explicar tal declive, concluyendo que no se pudo identificar una variable como responsable de la mala supervivencia de *D. geminata* en manantiales.

### **3.3.2 Regulación del caudal y perturbación del sustrato**

Varios autores plantean la idea de manejar el flujo de las represas (Kirkwood y col. 2007; Kumar y col. 2009; Miller y col. 2009; Cullis 2011, Corbett 2013). Claramente esta opción solo sería viable en ríos ya represados y que cuenten con la infraestructura necesaria, o bien para proyectos en etapa de estudio para poder implementarla, puesto que “el diseño de las represas puede obstaculizar una gestión adaptativa de caudales ambientales” (Lessard y col. 2013).

Por ejemplo, los resultados de Miller y col. (2009) indican un rol prometedor de la perturbación del lecho como un potencial mecanismo de control en el crecimiento de didymo en ríos regulados, pues encontraron una fuerte relación negativa entre la cobertura de didymo y la descarga de agua, lo cual se podría relacionar con que Hammond (2013) encontró que en ríos neozelandeses una velocidad de 0,6 m/s evita que las floraciones tengan altos niveles de biomasa.

A los 5 estudios o publicaciones científicas del primer párrafo de este punto se suman Larned y col. (2007), quienes además de plantear la misma idea, destacan varias precauciones sobre la eficacia de inundaciones provocadas:

1. Serían poco efectivas en ríos con lechos resistentes (asociados con rocas o bolones) o con poco sedimento fino.
2. Serían poco efectivas a grandes distancias de las represas debido a la atenuación de la inundación.
3. Se necesita un flujo artificial mínimo para generar suficiente estrés cortante (varias veces mayor que el flujo base, por ejemplo: 30 veces, en cierto río de NZ según Hammond 2013), sobre todo si se cuenta con poca abrasión.
4. Se puede dar que, sin querer, se disperse didymo viable aguas abajo, provocando una posible expansión dentro de los ríos.

En Nueva Zelanda se han puesto a prueba los *flushing flows* (flujos de lavado, enjuague o rubor) (Arscott 2008) recomendados al inicio de esta sección, sin embargo, años después se hizo un estudio tipo BACI con datos entre 1989-2010 respecto de una represa (Lessard y col. 2013) encontrando que estos intentos de lavado no fueron efectivos para la remoción de didymo y otro perifiton molesto, debido principalmente a que los flujos no fueron lo suficientemente fuertes, a la escasez de sedimentos



finos/arena y a que el río aguas abajo se ensanchaba, disminuyendo la fuerza del *flushing flow*. La represa era capaz de entregar los niveles naturales de flujo, que sí mantenían controlada la frecuencia y magnitud de las floraciones algales (no de didymo puesto que llegó en 2007 y la represa es de 1999). En sus conclusiones, estos autores citan un estudio sueco de 2004 donde los *flushing flows* fueron efectivos para remover el perifiton molesto, pero el río era confinado, estrecho, y sí lograban alcanzar caudales previos a la construcción de la represa.

Siguiendo con Nueva Zelanda, Kilroy (2013) muestra dos noticias respecto de *flushing flows* en dos ríos distintos. En la primera, de 2009, el flujo aplicado triplicaba el flujo original, durante 48 hrs, y fue capaz de limpiar notablemente el río, lo cual predijeron que duraría 3 meses o más. Sin embargo en la segunda noticia, de 2013, un flujo aprox. igual de grande respecto del original sólo limpió un 30% de cobertura didymo, la cual se recuperó en apenas 2 semanas.

Relacionado con las represas y la posibilidad de aprovechar el efecto de sus descargas, Ladrera y col. (2015) recomiendan una evacuación desde la superficie del agua (epilimnion) del lago artificial, en vez del hipolimnion. Esto puede ser útil para controlar crecimientos de didymo debido a que el agua vendría a mayores temperaturas. Sin embargo, Hammond (2013) halló una correlación positiva entre la biomasa de didymo y la temperatura, pero no indica un valor límite (sí para la colonización: 15°C).

Adicionalmente, en caso de cualquier recomendación, hay que recordar que las densas matas de didymo están particularmente bien adaptadas a vivir en ríos de alta energía. Se ha reportado que sus floraciones reducen el riesgo de despegarse

aminorando el estrés cortante y la turbulencia cercana (Larned y col. 2011). Además, si bien Miller y col. (2009) encontraron que la abundancia de didymo disminuyó en un río tras un alto flujo durante 3 días debido a intensas lluvias, una semana después la cobertura de los tapetes algales alcanzaron los niveles previos al episodio de altos caudales. Finalmente, siempre hay que tener presente que la resistencia al estrés cortante varía mucho dependiendo del alga (tipo, especie) y de la etapa de crecimiento en que se encuentra (Cullis 2011), lo que fue respaldado por Hammond (2013) puesto que éste aclara que si la biomasa es muy poca, será muy resistente a desprenderse, mientras que si es mucha, se recuperará muy luego. Este último autor también confirma que didymo no es el único afectado con los flujos de limpieza; el perifiton nativo también se desprende.

### 3.3.3 Biocidas (alguicidas)

Desde que didymo apareció en Nueva Zelanda en 2004, se han hecho muchos estudios para su control, como la selección y testeo de biocidas. Un estudio programado en 4 etapas consistió en: una primera selección basada en la mortalidad de *D. geminata* a corto y largo plazo. Entre 10 biocidas, resultaron 4 efectivos. Luego con esos 4 se evaluó la mortalidad de otras especies no-objetivo (peces, macroinvertebrados y otros microorganismos) para evitar impactarlas si se aplica el biocida en su hábitat, eligiendo el menos invasivo para ellas. La tercera etapa consistió en perfeccionar la dosis para obtener una máxima mortalidad de *D. geminata* y una mínima de otras especies. Finalmente la etapa 4 fue de testeo en terreno: en una sección de un río y aguas abajo (Clearwater y col. 2011). Luego de evaluar también otros 7 criterios (remoción de tallos, degradación, riesgos a salud y seguridad, facilidad de aplicación, potencial de neutralización, costo y normas locales), el biocida elegido

fue una fórmula comercial de cobre quelado, Gemex™, descartándose las soluciones de EDTA, Hydrothol®191, Organic Interceptor™ (fórmula de aceite de pino), entre otros. El biocida de cobre, sin embargo, tiene la gran desventaja de acumularse en los sedimentos de los ríos y en algunas especies de plantas para las que es tóxico, por lo que no se puede aplicar por mucho tiempo (Jellyman y col. 2011).

Hay que considerar también que si bien los 4 biocidas testeados en la etapa 2 impactaron negativamente a algas verdes y zooplancton, los peces no se vieron afectados en una hora de tratamiento (tiempo necesario para alcanzar una mortalidad útil de *D. geminata*), lo cual es relevante porque la población de microorganismos se puede recuperar más fácilmente al ser eslabones más bajos en la cadena trófica (Jellyman y col. 2011).

Respecto de la última etapa (la 4, en terreno), Clearwater y col. (2011) concluyen su minucioso y largo estudio con varios enunciados: a) la concentración necesaria de cobre se alcanzó hasta 1,5 km aguas debajo de la aplicación de biocida, por lo que se necesitarían varias aplicaciones si se necesita más extensión; b) la eliminación de etapas tempranas de invasión es posible; c) la supresión de etapas más avanzadas también, pero con dosis repetidas; d) una simple aplicación de +1 hora de Gemex™ mató truchas, contradiciendo lo predicho a nivel laboratorio, pero esto pudo ser aminorado si las aguas hubiesen sido más duras y/o agregando supresores químicos (p. ej.  $\text{CaCl}_2$ ); e) asimismo, otras poblaciones no fueron afectadas a largo plazo (algas, invertebrados y otros peces).

En definitiva, hay que considerar que la publicación del trabajo de Clearwater y col. (2011) a principios de ese año fue la última vez que se habló de Gemex™ como



biocida en internet, por lo que es posible presuponer que no ha sido usado ni investigado recientemente.

### 3.3.4 Sombreado

Respecto a la disponibilidad de luz se encontró que tanto a escala cuenca, como río y local, ésta fue un factor importante en la presencia y cobertura de *D. geminata* (James y col. 2014) por lo que “una opción pragmática para reducir la severidad de las floraciones puede incluir el sombreado” según los autores, destacando que es asequible en canales artificiales donde normalmente el didymo se limpia raspándolo. Se destaca que se encontró que la sombra provocada por puentes virtualmente eliminaban los crecimientos de colonias. En ríos naturales, la vegetación ripariana (o riparia, de la ribera) puede aumentar el sombreado del cauce, disminuyendo la disponibilidad de luz para didymo y proveyendo cobertura y aguas más frías para los peces.

### 3.4 Prevención de dispersión

Debido a que el factor más importante en la dispersión de *D. geminata* fuera de su hábitat nativo pareciera ser el ser humano (Blanco & Ector 2009), desde hace más de 9 años se estableció un procedimiento para disminuir la expansión de la distribución de la microalga (Kilroy 2005), que se ha adoptado en diversos países con la plaga, determinado “*Check, Clean & Dry*”, o “remover, lavar y secar”. Esta autora testeó métodos descontaminantes tradicionales y nuevos (“*Clean*”) para aplicar a lo que haya estado en contacto con didymo, llegando a las siguientes soluciones, informadas por *Biosecurity New Zealand* (2006): usar sal, detergente o antisépticos clorados al 5%

durante 1 minuto, blanqueador al 2% por 1 minuto, o agua a +60°C durante 2 minutos. Si el lavado no fuera práctico, se debe secar por 48 hrs ("Dry"), porque con 15 hrs aún quedan células vivas. Los nadadores deben lavarse el pelo minuciosamente con champú, enjuagarse con agua tibia a caliente y secar. La parte "Check" consiste simplemente en remover las algas visibles antes de irse del sitio afectado, dejándolas ahí. Si luego se halla algo sospechoso se debe descontaminar.

Recientemente, tres chilenas fueron premiadas por inventar "DD-MOff", un producto natural probado en laboratorio el cual aseguran desinfecta objetos en solo 15 minutos sin afectar otros ecosistemas. Tiene la gran ventaja de ser formato spray, facilitando su aplicación y disminuyendo los implementos necesarios (Schlotterbeck 2014). El 31 de octubre recién pasado ganaron el primer lugar en "Model2Market", acelerando los modelos de negocio para el producto (RedEmprendia 2014).

### 3.5 Observaciones finales

En general, luego de revisar exhaustivamente las referencias de estudios nacionales e internacionales, se observa que suelen estudiar de manera distinta el tema, pero sobre todo, medir distintos parámetros, frecuentemente con **distintos límites** de detección (por ejemplo para Fosfato: 1, 3, 6, 9, hasta 1800 µg/L). Además, muchos estudios no hacen mención a la abundancia de didymo; o bien, la nombran pero sin mayor detalle de cobertura o grosor, dificultando la comparación entre un estudio y otro.

En este sentido, sería conveniente establecer un **procedimiento estándar** a nivel internacional para didymo, por ejemplo, que los criterios de muestreo sean lo más similares posibles, que los parámetros a analizar sean los mismos, con métodos con límites de detección adecuados y suficientemente bajos. Que se informe claramente la

cantidad de didymo, tanto cobertura como grosor, la concentración de células en la columna de agua y la biomasa (p. ej. como *ash free dry mass* o peso seco sin cenizas), siempre cerciorándose que la floración haya sido fundamentalmente causada por didymo.

Entre los **parámetros** que podrían influenciar en la **distribución y/o abundancia** de *D. geminata*, los menos consistentes entre estudios fueron los químicos (excepto Fosfato) y la conductividad eléctrica. Frecuentemente ocurrió que un estudio sí encontraba una relación positiva o negativa entre abundancia y/o distribución con un factor ambiental, mientras que otro(s) estudio(s) no encontraba(n) relación significativa (casos: N, pH, T°, Cond. Eléc.).

Asimismo los nutrientes calcio, silicio y sulfato en general se mencionan como que se requiere que estén presentes y ojalá en cierta cantidad, pero nada muy concreto, o falta información. Destacar que el caso del hierro (que se creía que favorecía a didymo) fue desmentido por otros autores.

El tema de la contaminación es muy relativo, pues la sobrevivencia de *D. geminata* depende el tipo y severidad de la misma. Finalmente para el caudal, la turbiedad, la profundidad, disponibilidad de luz y tamaño de sustrato sí se encontró algún tipo de relación (negativa para las 3 primeras, positiva para las 2 últimas), todas congruentes entre estudios; excepto el tipo de sustrato (tipo de roca), con discrepancias entre autores internacionales y la distribución de didymo en Chile.

Volviendo al **Fosfato**, se vio que este nutriente esencial en la tasa de reproducción celular y en el alargamiento de tallos, existiendo la siguiente relación general: mientras



más Fosfato disuelto, más división y menos tallos (menor floración), y mientras menos Fosfato, menos división y más tallos (floración nociva o molesta). Se plantea que el límite aproximado en esta relación para las floraciones es  $6 \mu\text{g}(\text{PO}_4^{-3})/\text{L}$  como promedio, el cual es muy consistente en estudios neozelandeses (ver Anexo).

Acá cabe destacar la investigación de Reid & Torres (2014) quienes, estudiando 3 ríos chilenos, encontraron que las floraciones de didymo (julio de 2010) **absorbían Fosfato (abióticamente)** de la columna de agua, puesto que el agua intersticial de la mata contenía entre 90 y  $351 \mu\text{g}(\text{PO}_4^{-3})/\text{L}$  mientras que los ríos apenas un rango de 4,2 a  $21 \mu\text{g}(\text{PO}_4^{-3})/\text{L}$ . Esto significa que las floraciones, que en teoría son resultado de bajas concentraciones de Fosfato (Taylor & Bothwell 2014), hacen que éste sea aún más bajo, planteando un problema interesante de profundizar.

En cuanto a didymo en **lagos y embalses**, grandes floraciones en éstos no se habían documentado sino hasta el año pasado en el lago **Nahuel Huapi** (Argentina), luego de que durante años numerosas referencias describieran a *D. geminata* como menos preferente de lagos, menos invasiva y menos abundante, sin embargo en la Figura 11 se pudo constatar una floración considerable sobre roca volcánica, probablemente a los bajos niveles de Fosfato ( $<6$ ,  $<6$  y  $19,5 \mu\text{g}/\text{L}$  dependiendo del punto, Beamud y col. 2013). Esta situación ha aumentado, al menos en su distribución, puesto que de 3 puntos positivos, ahora hay por lo menos 5 (Diario Río Negro 2014). Por otro lado, se encontraron múltiples referencias donde documentaban grandes floraciones en el “**caudal ecológico**” de los embalses, confirmando que éstos son un factor importante en la proliferación de didymo si no se toman medidas como descargar agua a mayores temperaturas (superficial) o hacer flujos de lavado si es posible.

Año a año *D. geminata* expande su hábitat, por lo que si se estudia el **patrón de distribución** un año, al siguiente nuevos ríos pueden estar colonizados y resulta que en el año anterior se catalogaron como no-aptos para *D. geminata* (p. ej. el río Huahum se incluyó como río no-apto para *D. geminata*, y resultó que sí lo era). Es más, el mismo informe Amakaik-EcoHyd (2013) en su Anexo 4 discute este hecho: la invasión de la microalga en Chile está en etapa de propagación; podrían haber nuevos ríos invadidos en los próximos años tal como lo modelaron Montecino y col. (2014). Finalmente y muy importante, es que *D. geminata* sólo presenta **impactos** en su forma macroscópica, como **floración** extensa y gruesa, lo cual no se da siempre que hay *D. geminata*, lo que se pudo comprobar en terreno. Es por estas razones que **se debería estudiar las relaciones entre factores ambientales y la abundancia de didymo**, como se ha hecho en algunas referencias, por ejemplo con el caudal en EE.UU. (Cullis y col. 2013) y con los nutrientes esenciales en Nueva Zelanda (ver Anexo).

En Chile, para estudiar distribución y abundancia de *D. geminata* en pos de un mejor entendimiento de su expansión, prevención, medidas de bioseguridad y posible control, sumado al párrafo anterior, se **recomienda** establecer un monitoreo continuo, con las siguientes características:

1. Mayor frecuencia que la actual (en la medida de lo posible por los altos caudales), manteniendo los mismos puntos de muestreo para poder contrastar año a año, y punto a punto (seguimiento). Agregar puntos de muestreo nuevos de manera sistemática (prospección).
2. Metodología de muestreo en terreno y de análisis en laboratorio lo más parecida posible entre campañas y proyectos, independiente de quien ejecute. Para esto, aplicar el manual de Díaz y col. (2012). Este punto incluye la estimación visual de la cantidad de didymo: cobertura y grosor.

3. Medir mismo set de parámetros físicos, químicos, biológicos e hidráulicos, que contemplen al menos nutrientes, características del sustrato<sup>11</sup>, velocidad y caudal.
4. Acudir a laboratorios que cuenten con métodos con límites de detección lo suficientemente bajos, sobre todo para Fosfato (alrededor de 6 µg/L o menos).

Si como resultado se obtiene que *D. geminata* y sus floraciones en Chile se comportan igual o muy similar que otro país, la investigación se debería alinear a la de ellos, que es buscar las **causas de la deficiencia de Fosfato** a nivel global y local, para así redirigir los esfuerzos (planes de control de didymo). En el peor de los casos, si el didymo chileno no responde de igual manera a los niveles de Fosfato, habría que comparar ríos en los que florece y en los que no (tal como hizo este estudio pero con más puntos de muestreo y más variables ambientales, como el caudal), disminuyendo la importancia de la explicación a su distribución, pues por sí sola no genera impactos, es decir, esta diatomea podría alcanzar una mayor expansión (Figura 2) pero **si no florece, no se evidencian efectos negativos**. Por último recalcar lo señalado por Reid & Torres (2014): la invasión de *D. geminata* en la **Patagonia** es un reto pues la caracterización ambiental es muy pobre.

---

<sup>11</sup> Acorde a lo visto en sección 1.1.2.2.2 (pág. 17-18)



#### IV. CONCLUSIONES

- Entre los parámetros ambientales que pueden influir en la distribución y abundancia de *D. geminata*, el Fosfato resultó ser el más importante y congruente. Los siguientes más relevantes y también congruentes fueron el tamaño del sustrato y el caudal. La mayoría de los demás presentan mucha variabilidad de resultados entre estudios y países, imposibilitando una conclusión general al respecto.
- Didymo tiene una gran afinidad con las represas y su caudal “ecológico”, en cuanto a presencia y abundancia, pero por otro lado, las mismas represas se postulan como posibles medidas de control para ríos regulados.
- Los estudios a nivel laboratorio y de represas no fueron concluyentes en cuanto a remoción de biomasa didymo, dejando explícitamente la puerta abierta a más estudios y a diseñar embalses de manera que puedan simular caudales naturalmente altos de los ríos.
- El uso de biocidas no fue prometedor, dado que el mejor resultó ser un metal (Gemex™), que eventualmente se iría acumulando en el ecosistema y provocando más problemas que soluciones a largo plazo.
- El manejo de nutrientes como control didymo, está poco estudiado y puede ser caro y perjudicial si no se realiza correctamente, por una posible eutroficación; además de ser a corto plazo y necesitar reiteraciones.

- Respecto del área de estudio, son sistemas prácticamente prístinos, sin contaminación y oligotróficos, pero faltaron datos fundamentales como el de Fosfato (en el tiempo) y el de sustrato en algunos ríos, por lo que se debería completar la información al menos con estos dos parámetros para eventuales futuros estudios, considerando métodos con un límite de detección cercano a  $6 \mu\text{g}(\text{PO}_4^{3-})/\text{L}$
- Dado que el muestreo se realizó iniciado el otoño (no en época de crecimiento algal), no se pudieron verificar los postulados de Bothwell & Kilroy (2011, 2012) en cuanto la relación entre la concentración de Fosfato y el crecimiento de *D. geminata*.
- El lago Neltume, podría contener *D. geminata* puesto que uno de sus afluentes (río Chanchán) posee floraciones didymo. Sin embargo, no se pudo determinar si *D. geminata* es capaz de florecer en las orillas del lago Neltume dado que los factores determinantes de las floraciones no son claros en Chile.
- El río Neltume, el único que nace de este lago, no presentó floraciones ni células de *D. geminata*, por lo que sería interesante estudiar qué sucede con la dispersión de células desde río Chanchán hacia el lago.
- En cuanto a la hipótesis de este estudio, las floraciones de *D. geminata* en la subcuenca del Río Valdivia Alto no se relacionaron con ningún parámetro ambiental determinado, como ha ocurrido en otros estudios (Tapia 2012).
- Las siguientes investigaciones deben enfocarse en la relación Fosfato-didymo en Chile a cabalidad.

## V. BIBLIOGRAFÍA

- Amakaik-Ecohyd. 2013. Informe Final Proyecto: Prospección de *Didymosphenia geminata* en cuerpos de agua de la Zona Centro-Sur. Elaborado para Subpesca. 70 pp + 14 Anexos.
- Arscott, D.B. 2008. Interim update: Flushing flows for the management of nuisance periphyton in the Opuha River, New Zealand. Prepared for Opuha Water Partnership. NIWA Client Report / Project: CHC2008-017 / OPH07501. 17 pp.
- Beville, S.T., Kerr, G.N. & Hughey K.F.D. 2012. Valuing impacts of the invasive alga *Didymosphenia geminata* on recreational angling. *Ecological Economics* 82: 1-10.
- Biosecurity New Zealand. 2006. Don't spread Didymo. [ficha informativa]. New Zealand Islands. 1 ficha informativa, 21x30 cm<sup>2</sup>.
- Blanco, S. & Ector, L. 2009. Distribution, ecology and nuisance effects of the freshwater invasive diatom *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt: a literature review. *Nova Hedwigia* 88: 3-4, 347-422.
- Bothwell, M.L., Lynch D.R., Wright, H. & Deniseger, J. 2009. On the boots of fishermen: the history of didymo blooms on Vancouver Island, British Columbia. *Fisheries* 34: 382–388.
- Bothwell, M.L., & Spaulding, S.A. (Co-Editors). 2008. Proceedings of the 2007 International Workshop on *Didymosphenia geminata*. Canadian Technical Reports of Fisheries and Aquatic Sciences 2795: xxxv. 58 pp.
- Bothwell, M. & Kilroy, C. 2011. Phosphorus limitation of the freshwater benthic diatom *Didymosphenia geminata* determined by the frequency of dividing cells. *Freshwater Biology* 56, 565-578.
- Bothwell, M.L. 2012. *Didymosphenia geminata* blooms in the Northern Hemisphere: a symptom of environmental change. En: THE DIDYMO Story, Edificio Biología-Milenio, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. 3 de diciembre.
- Bothwell, M.L., Kilroy, C., Taylor, B.W., Ellison, E.T., James, D.A., Gillis, C-A., Bladon, K.D. & Silins, U. 2012. Iron is not responsible for *Didymosphenia geminata* bloom formation in phosphorus-poor rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 69: 1723–1727.



- Branson, J. 2006. *Didymosphenia geminata* economic impact assessment. Final report to Biosecurity New Zealand. New Zealand Institute of Economic Research (NZIER). Wellington, NZ. 22 pp.
- Byle, J. 2014. Ecological drivers and species interactions of whirling disease. Undergraduate Honors Theses of University of Colorado, Boulder, USA. Department of Ecology and Evolutionary Biology. April 7, 2014. 29 pp.
- Campbell, M.L. 2005. Organism Impact Assessment (OIA) for Potential Impacts of *Didymosphenia geminata*. All Oceans Ecology, Australia. 92 pp.
- Clearwater, S.J., Jellyman, P.G., Biggs, B.J.F., Hickey, C.W., et al. 2011. Pulse-dose application of chelated copper to a river for *Didymosphenia geminata* control: Effects on macroinvertebrates and fish. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30(1): 181–195.
- Corbett, L.M. 2013. Relationships between *Didymosphenia geminata* occurrence, blooms and environmental conditions. Tesis de Magister en Ciencias, Universidad de Calgary, Alberta, Canadá. 122 pp.
- CORFO Innova, Proyecto. 2013. Plataforma On-Line Didymo. [En línea] <<http://www.didymo.uchile.cl>> [consulta: 09 diciembre 2013]
- Cullis, J.D. 2010. Hydrologic control of the nuisance diatom, *Didymosphenia geminata*. Colorado Water, Newsletter of the Water Center of Colorado State University 27(3): 4-6.
- Cullis, J.D. 2011. Removal of benthic algae in swift-flowing streams: the significance of spatial and temporal variation in shear stress and bed disturbance. Tesis de "Doctor of Philosophy", Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, USA. 231 pp.
- Cullis, J.D., Gillis, C-A., Bothwell, M.L., Kilroy, C., Packman, A. & Hassan, M. 2012. A conceptual model for the blooming behavior and persistence of the benthic mat-forming diatom *Didymosphenia geminata* in oligotrophic streams. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117. 11 pp.
- Cullis, J.D., Crimaldi, J.P. and McKnight, D.M. 2013. Hydrodynamic shear removal of the nuisance stalk-forming diatom *Didymosphenia geminata*. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments* (3): 256–268

- Dahlberg, M. 2010. Rock Snot (*Didymo/Cymbella*) Risk Analysis for Arizona. Arizona Game and Fish Department, EE.UU. 6 pp.
- Diario Río Negro. 2014. Alga didymo crece por "colador" de controles. [En línea] <<http://www.rionegro.com.ar/diario/alga-didymo-crece-por-colador-de-controles-4825036-9574-nota.aspx>> [Consulta: 07 de noviembre 2014]
- Díaz, C., Molina, X. & Montecino, V. 2012. Manual para el Monitoreo e Identificación de la Microalga Bentónica *Didymosphenia geminata*. Preparado para Subsecretaría de Pesca, Chile. 74 pp.
- Ellwood, N.T.W. & Whitton, B.A. 2007. Importance of organic phosphate hydrolyzed in stalks of lotic diatom *Didymosphenia geminata* and the possible impact of atmospheric and climatic changes. *Hydrobiologia* 592: 121-133.
- Endesa. 2010. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Central Hidroeléctrica Neltume. Disponible en la web del SEIA.
- Flöder, S. & Kilroy, C. 2009. *Didymosphenia geminata* (Protista, Bacillariophyceae) invasion, resistance of native periphyton communities, and implications for dispersal and management. *Biodiversity and Conservation* 18 (14): 3809-3824.
- Gretz, M. 2008. The stalks of didymo. En: M.L. Bothwell and S.A. Spaulding (Eds). Proceedings of the 2007 International Workshop on *Didymosphenia geminata*, Montréal, Québec. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2795: 59.
- James, D.A. & Chipps, S.R. 2012. An evaluation of the efficacy of whole-stream phosphorous enrichment to reduce coverage of *Didymosphenia geminata* in an oligotrophic stream. [En línea]. 142<sup>nd</sup> Annual Meeting of the American Fisheries Society – St Paul, MN, August 19–23, 2012. <<https://afs.confex.com/afs/2012/webprogram/Paper9471.html>> [consulta: 05 de noviembre 2014]
- James, D.A., Mosel, K. & Chipps, S.R. 2014. The influence of light, stream gradient, and iron on *Didymosphenia geminata* bloom development in the Black Hills, South Dakota. *Hydrobiologia* 721:117–127.
- Jellyman, P.G., Clearwater, S.J., Clayton, J.S., Kilroy, C., Blair, N., et al. 2011. Controlling the invasive diatom *Didymosphenia geminata*: An ecotoxicity assessment of four potential biocides. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 61:115–127.



- Kawecka, B. & Sanecki, J. 2003. *Didymosphenia geminata* in running waters of southern Poland – symptoms of change in water quality? *Hydrobiologia* 495: 193–201.
- Kilroy, C. 2004. A new alien diatom, *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt: its biology, distribution, effects and potential risks for New Zealand fresh waters. NIWA Project: ENS05501, New Zealand. 40 pp.
- Kilroy, C. 2005. Tests to determine the effectiveness of methods for decontaminating materials that have been in contact with *Didymosphenia geminata*. Prepared for Biosecurity New Zealand. NIWA Client Report: CHC2005-004. NIWA Project: MAF05501. 36 pp.
- Kilroy, C., Biggs, B., Blair, N., Lambert, P., Jarvie, B., Dey, K., et al. 2005a. Ecological studies on *Didymosphenia geminata*. New Zealand, NIWA Project: MAF05505.
- Kilroy, C., Snelder, T. & Sykes, J. 2005b. Likely environments in which the non-indigenous freshwater diatom, *Didymosphenia geminata*, can survive, in New Zealand. National Institute of Water & Atmospheric Research NIWA Client Report: CHC2005-043.
- Kilroy, C., Jarvie, C. & Sutherland, S. 2006. Nuisance growths of periphyton in the lower Waiau River in relation to flow: a summer monitoring programme with a focus on *Didymosphenia geminata*. NIWA, NZ. Prepared for Meridian Energy. NIWA Client Report: CHC2005-059. July 2005. NIWA Project: MEL05509.
- Kilroy, C., Lagerstedt, A., Davey, A. & Robinson, K. 2007a. Studies on the survivability of the invasive diatom *Didymosphenia geminata* under a range of environmental and chemical conditions. NIWA Project: MAF06506, prepared for Biosecurity New Zealand. 121 pp.
- Kilroy, C., Leathwick, J., Dey, K., Blair, N., Roulston, H., Sykes, J. & Sutherland, D. 2007b. Predicting the suitability of New Zealand river and lake habitats for colonization and growth of the invasive, non-indigenous diatom, *Didymosphenia geminata*. NIWA Client Report CHC2007-062. 93 pp.
- Kilroy, C. 2008. *Didymosphenia geminata* in New Zealand: distribution, dispersal and ecology of a non-indigenous invasive species. En: M.L. Bothwell and S.A. Spaulding (Eds). Proceedings of the 2007 International Workshop on *Didymosphenia geminata*, Montréal, Québec. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2795. 53-58.
- Kilroy, C., Larned, S. T. & Biggs, B. J. F. 2009. *Didymosphenia geminata* alters benthic communities in New Zealand rivers. *Freshwater Biology* 54: 1990-2002.



- Kilroy, C. & Bothwell, M.L. 2011. Environmental control of stalk length in the bloom-forming, freshwater benthic diatom *Didymosphenia geminata* (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology*, 47, 981–989.
- Kilroy, C. & Unwin, M. 2011. The arrival and spread of the bloom-forming, freshwater diatom, *Didymosphenia geminata*, in New Zealand. *Aquatic Invasions*, Volume 6, Issue 3: 249–262
- Kilroy, C. & Bothwell, M.L. 2012. *Didymosphenia geminata* growth rates and bloom formation in relation to ambient dissolved phosphorus concentration. *Freshwater Biology*, 57, 641–653.
- Kilroy, C. 2013. *Didymosphenia geminata*, an extraordinary organism. En: INTERNATIONAL DIDYMO Conference, 12–13 March. Providence, Rhode Island, USA. Invasive Species Action Network.
- Kirkwood, A.E., Shea, T., Jackson, L.J. & McCauley, E. 2007. *Didymosphenia geminata* in two Alberta headwaters rivers: an emerging invasive species that challenges conventional views on algal bloom development. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64: 1703–1709.
- Kirkwood, A.E., Jackson, L.J. & McCauley, E. 2009. Are dams hotspots for *Didymosphenia geminata* blooms?. *Freshwater Biology* 54: 1856–1863.
- Kumar, S., Spaulding, S.A., Stohlgren, T.J., Hermann, K.A., Schmidt, T.S. & Bahls, L.L. 2009. Potential habit distribution for the freshwater *Didymosphenia geminata* in the continental US. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7, 9 pp.
- Ladrera, R., Rieradevall, M. & Prat, N. 2015. Massive growth of the invasive algae *Didymosphenia geminata* associated with discharges from a mountain reservoir alters the taxonomic and functional structure of macroinvertebrate community. *River Research and Applications* 31:216–227.
- Larned, S., Biggs, B., Blair, N., Burns, C., Jarvie, B., Jellyman, D., Kilroy, C., et al. 2006. Ecology of *Didymosphenia geminata* in New Zealand. Habitat and ecosystem effects-Phase 2. National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA). Client Report CHC2006-086, NIWA Project MAF06507.
- Larned, S., Arscott, D., Blair, N., Jarvie, B., Jellyman, D., et al. 2007. Ecological studies of *Didymosphenia geminata* in New Zealand, 2006–2007. NIWA Consultancy Report CHC2007-070. 127 pp.

- Larned, S., Packman, A., Plew, D. & Vopel, K. 2011. Interactions between the mat-forming alga *Didymosphenia geminata* and its hydrodynamic environment. *Limnology and Oceanography: Fluids & Environments* 1: 4-22.
- Larson, A.M. & Carreiro, J. 2008. Relationship between nuisance blooms of *Didymosphenia geminata* and measures of aquatic community composition in Rapid Creek, South Dakota. En: M.L. Bothwell and S.A. Spaulding (Eds). Proceedings of the 2007 International Workshop on *Didymosphenia geminata*, Montréal, Québec. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2795. 45-49.
- Lessard, J., Hicks, D.M., Snelder, T.H., Arscott, D.B., Larned, S.T., BOOKER, D. & Suren, A.M. 2013. Dam design can impede adaptive management of environmental flows: a case study from the Opuha dam, New Zealand. *Environmental Management* 51: 459-473.
- Lindstrøm, E.A. & Skulberg, O.M. 2008. *Didymosphenia geminata* – a native diatom species of Norwegian rivers coexisting with the Atlantic salmon. En: M.L. Bothwell and S.A. Spaulding (Eds). Proceedings of the 2007 International Workshop on *Didymosphenia geminata*, Montréal, Québec. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2795: 35-40.
- McLaughlin, A. 2009. Investigating the growth of *Didymosphenia geminata* and the impact on benthic macroinvertebrate communities in boulder creek, a regulated mountain stream, in the summer. Tesis de Magister en Ciencias, Universidad de Colorado, Colorado, EE.UU. 98 pp.
- McMahon, R., Kumar, S., Sytsma, M., Hall, R., Britton, D., Spaulding, S., et al. 2009. Automatic Identification System (AIS) inventory and monitoring framework for the Greater Yellowstone Area (GYA). Greater Yellowstone Coordinating Committee (GYCC), Aquatic Invasive Species Cooperative, USA. 32 pp.
- Miller, M.P., McKnight, D.M., Cullis, J.D., Greene, A., Vietti, K. & Liptzin, D. 2009. Factors controlling streambed coverage of *Didymosphenia geminata* in two regulated streams in the Colorado Front Range. *Hydrobiologia* 630: 207-218.
- Montecino, V., Molina, X. Kumar, S., Castillo, M.L.C. & Bustamante, R. 2014. Niche dynamics and potential geographic distribution of *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt, an invasive freshwater diatom in Southern Chile. *Aquatic Invasions* 9(4): 507-519.
- Municipalidad Panguipulli, Depto de Turismo. [s.a.] Destino siete lagos, Panguipulli, Chile. [En línea] <<http://www.sietelagos.cl/>> [consulta: 03 de marzo 2014]



- Noga, T., Stanek-Tarkowska, J., Irlík, E., Soliwoda, K. & Peszek, Ł. 2012. New positions of *Didymosphenia geminata* in Ropa and Biała Tarnowska Rivers (Southern Poland). *Inżynieria Ekologiczna* 30: 257-265.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. 1996. *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring - Second Edition*. Chapter 3 - Selection of water quality variables. 60 pp.
- Patrick, R. & Reimer, C.W. 1975. *The Diatoms of the United States exclusive of Alaska and Hawaii*. V2-1. Academy of Natural Sciences of Philadelphia. 213 pp.
- Redemprendia. 2014. Emprendedores de México, Chile, Portugal y Perú triunfan en los premios de Spin2014. [En línea] <<http://www.redemprendia.org/es/actualidad/noticias/emprendedores-de-mexico-chile-portugal-y-peru-triunfan-en-los-premios-de-spin2014>> [consulta: 05 de noviembre 2014]
- Reid, B. & Torres, R. 2014. *Didymosphenia geminata* invasion in South America: Ecosystem impacts and potential biochemical stage change in Patagonian Rivers. *Acta Oecologica* 54: 101-109.
- Resolución Exenta N° 3064/2010. Subsecretaría de Pesca, Chile. Declara área de plaga sectores de cuerpos de agua terrestres que indica. Valparaíso, 06 de octubre de 2010. 2 pp.
- Resolución Exenta N° 1866/2010. Servicio Nacional de Pesca, Chile. Aprueba programa de vigilancia, detección y control de plaga que indica. Valparaíso, 02 de noviembre de 2010. 5 pp.
- Şahin, B. 2000. Algal Flora of Lakes Aygır and Balıklı (Trabzon, Turkey). *Turkish Journal of Botany* 24: 35–45.
- Şahin, B. 2001. Epipellic and Epilithic Algae of Dağbaşı Lake (Rize-TURKEY). *Turkish Journal of Botany* 25: 187–194.
- Sanson, J. & Gerbeaux, P. 2013. *Didymosphenia geminata* in New Zealand: A national collaborative programme for didymo pest management and research. En: INTERNATIONAL DIDYMO Conference, 12-13 March. Providence, Rhode Island, USA. Invasive Species Action Network.
- Sastre, V., Santinelli, N., Bauer, G. & Ayestarán, M.G. 2011. Monitoreo de la diatomea invasora *Didymosphenia geminata* en cuencas andinas de la provincia de Chubut. En: TALLER BINACIONAL Argentino-Chileno sobre estrategias de manejo de *Didymosphenia geminata* en cuencas hídricas compartidas.



- Ministerio de Medio Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable. Trevelin, Argentina. 3 de junio, 2011. 30 pp.
- Sastre, A.V., Santinelli, N.H., Bauer, G.A., Ayestarán, M.G. & Uyua, N.M. 2013. First record of the invasive diatom *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) Schmidt in a Patagonian Andean river of Argentina. *BiolInvasions Records* Vol.2, Issue 1: 11-17. 7 pp.
- Servicio Nacional de Pesca (Sernapesca). 2014. Listado de Ríos con Didymo en Chile [\* .xlsx, Excel]. Respuesta a solicitud de información pública efectuada por el autor de este seminario de título. 17 de enero de 2014.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Publicación Geológica Digital, No. 4. CD-ROM, versión 1.0.
- Schlotterbeck, T. 2014. DD-MOff. [video]. YouTube. Publicado el 7/7/2014 en <<http://youtu.be/xfKNHmtcXpk>> [consulta: 05 de noviembre 2014]
- Sherbot, D.M.J. & Bothwell, M.L. 1993. *Didymosphenia geminata* (Gomphonemaceae). A review of the ecology of *D. geminata* and the physiochemical characteristics of endemic catchments on Vancouver Island. NHRI Contribution 93005. National Hydrology Research Institute, Environment Canada, Saskatoon, Saskatchewan.
- Spaulding, S.A. & Elwell, L. 2007. Increase in Nuisance Blooms and Geographic Expansion of the Freshwater Diatom *Didymosphenia geminata*. USGS, Reston, Virginia. Open File Report 2007-1425.
- Spaulding, S.A. 2010. Diatoms of the United States. [En línea] <<http://westerndiatoms.colorado.edu>> [consulta: 13 de noviembre 2013]
- Subakov-Simic, G. & Cvijan, M. 2004. *Didymosphenia geminata* (Lyngb.) M. Schmidt (Bacillariophyta) from the Tisa river (Serbia) – its distribution and specific morphological and ecological characteristics. *Algological Studies* 114: 53-66.
- Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Subpesca). 2013. *Didymosphenia geminata*: Estado Actual, Acciones y Medidas de Control (2010-2013). En: Curso “Gestión de la Plaga Didymo y Bioseguridad en Chile”: 24 y 25 de octubre, 2013. Facultad de Ciencias, Universidad Santo Tomás, RM, Chile.
- Sundareshwar, P.V., Upadhayay, S., Abessa, M., Honomichl, S., et al. 2011. *Didymosphenia geminata*: Algal blooms in oligotrophic streams and rivers. *Geophysical Research Letters* 38. 5p.

- Sutherland, D. 2005. Evaluation of the state of *Didymosphenia geminata* in the Waiau Arm following a four-month 'park and flush' regime. NIWA Project: MEL065013 prepared for Meridian Energy, New Zealand. December. 16 pp.
- Sutherland, D., Biggs, B., Blair, N., Boustead, N., Kelly, G. & Sykes, J. 2005. Benthic survey of the Waiau Arm to determine the distributional extent of *Didymosphenia geminata*. NIWA Project: MEL06505 prepared for Meridian Energy and Biosecurity New Zealand. NIWA Client Report: CHC2005-118. September 2005. 26 pp.
- Sutherland, S., Rodway, M., Kilroy, C., Jarvie, B. & Hughes, G. 2007. The survival of *Didymosphenia geminata* in three rivers and associated spring-fed tributaries in the South Island of New Zealand. Preparado para MAF Biosecurity New Zealand. 41 pp.
- Schweiger, E.W., Ashton, I.W., Muhlfeld, C.C., Jones, L.A. & Bahls, L.L. 2011. The distribution and abundance of a nuisance native alga, *Didymosphenia geminata*, in streams of Glacier National Park: Climate drivers and management implications. *Park Science* 28 (2): 88-91.
- Tapia, N. 2012. Caracterización física y química de la cuenca hidrográfica del Yelcho y su relación con la presencia de la especie plaga *Didymosphenia geminata*. Memoria de Químico Ambiental. U. de Chile, Facultad de Ciencias. 127pp.
- Taylor, B.W. & Bothwell, M.L. 2014. The Origin of Invasive Microorganisms Matters for Science, Policy, and Management: The Case of *Didymosphenia geminata*. *BioScience* 64 (6): 531-538.
- Universidad Austral de Chile. 2012. Diagnóstico y caracterización del estado trófico del lago Neltume y Pirehueico. Preparado para Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Diciembre de 2012. 90 pp.
- Whitton, B.A., Ellwood, N.T.W. & Kawecka, B. 2009. Biology of the freshwater diatom *Didymosphenia*: a review. *Hydrobiologia* 630:1-37.

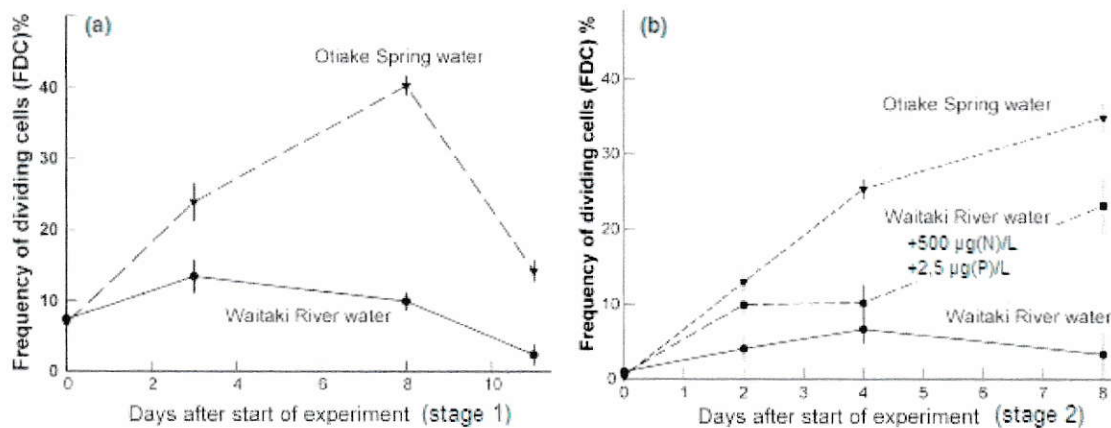
## VI. ANEXO

### Estudios neozelandeses con interesantes resultados acerca de la relación entre el Fosfato disuelto y *D. geminata*

En éstos se han usado dos índices: la frecuencia de células en división (FDC en inglés) y el crecimiento algal o de biomasa (SCI, de *standing crop index*, que incorpora el % de cobertura de didymo y el grosor de las matas). A continuación se presentan resumidamente las metodologías usadas y los resultados más relevantes.

#### Kilroy y Bothwell (2011), Bothwell y Kilroy (2011)

A fines de 2008 y durante 2009 estos autores llevaron a cabo 2 estudios en terreno con canales artificiales al costado de dos ríos de interés: Otiake, oligotrófico sin didymo, y Waitaki, ultraoligotrófico con didymo, siendo el primero afluente del segundo. En el primer estudio usaron agua de ambos ríos y soluciones madre o *stock* de Fosfato y de Nitrato para analizar la respuesta de *D. geminata* ante aguas primero relativamente pobres en nutrientes (Waitaki, etapa 1) y luego nutritivas (Otiake y soluciones químicas, etapa 2). Con esto confirmaron que *D. geminata* responde rápidamente ante un ambiente nutritivo elevando su FDC considerablemente hasta por 8 días (Figura 20).

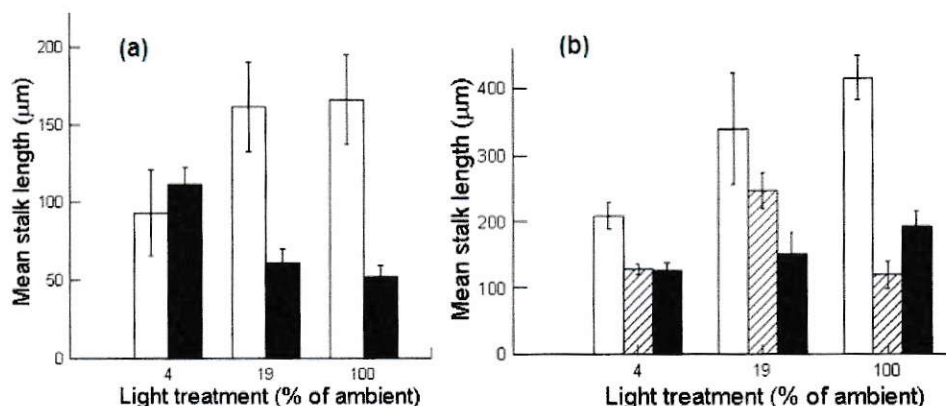


**Figura 20.** Frecuencia de células en división en el primer estudio de Bothwell & Kilroy (2011) ante distintos niveles de nutrientes en función del tiempo en días.

El segundo estudio consistió también en ver respuestas ante nutrientes adicionados pero con más detalle y añadiendo el factor luminosidad, con 3 experimentos o tratamientos: 4 niveles de N-Nitrato (0, 12, 50 y 500 µg/L), agua del Waitaki sin y con



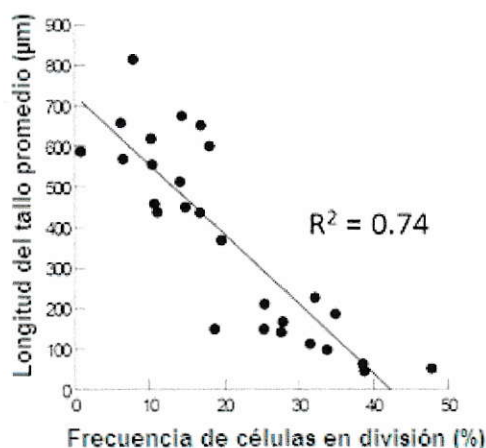
nutrientes adicionados (100 y 10  $\mu\text{g/L}$  de N y P respectivamente), y 3 niveles de P-Fosfato (0, 5 y 50  $\mu\text{g/L}$ ); cada uno de estos 3 experimentos con 3 distintos niveles de luminosidad: 4, 19 y 100%. Los resultados indicaron fundamentalmente que: sólo basta contar con más Fosfato (y no Nitrógeno) para aumentar la FDC (Figura 21), y que a mayor FDC, menor longitud del tallo (Figura 22), que son los responsables de la gran biomasa didymo. La influencia de la luminosidad se trató en su sección respectiva (página 17).



**Figura 21.** Longitud promedio de tallos ante distintos tratamientos de luminosidad y nutrientes.

Barra sin color: agua del río Waitaki. (a) Barra negra: +100 y +10  $\mu\text{g/L}$  de N y P respectivamente. (b) Barras rayadas y negras: +5 y +50  $\mu\text{g/L}$  de P respectivamente.

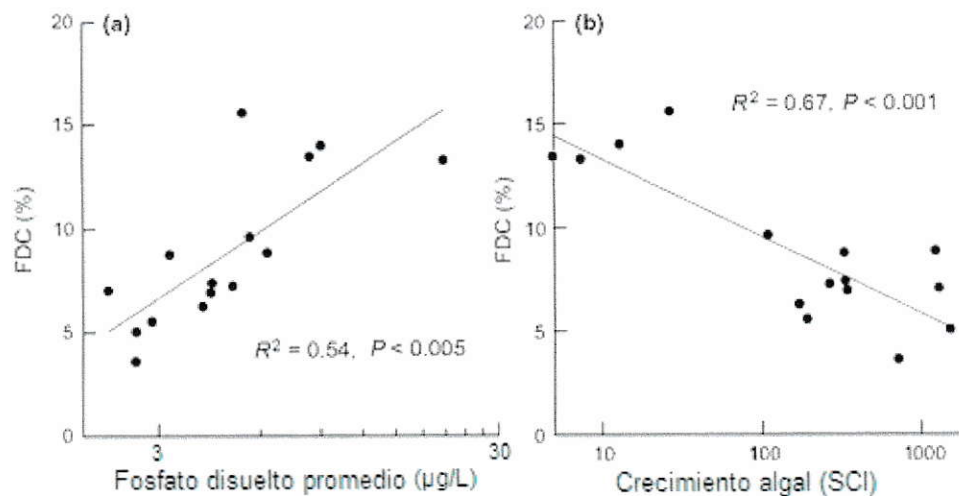
Alrededor de un 100% de luminosidad representa una condición de hábitat normal para *D. geminata* (ríos sin sombra). Así, en esta Figura 21, se ve que ya sea con adicionar N+P (Fig. 12.a) o sólo P (Fig. 12.b) se obtiene una longitud menor de tallos, concluyendo que el P de Fosfato es el nutriente limitante.



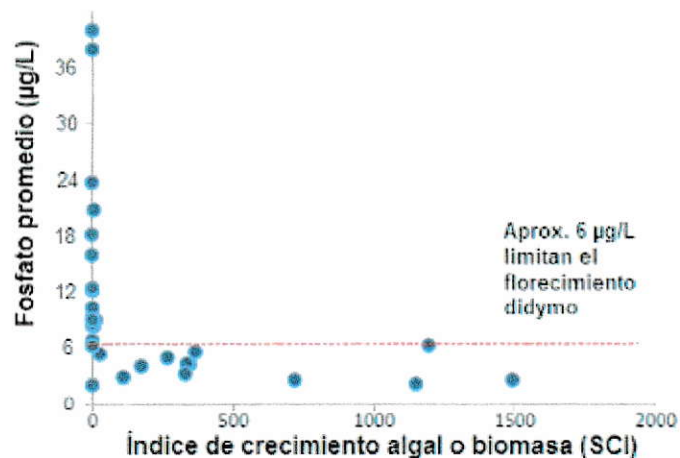
**Figura 22.** Longitud de tallo promedio de *D. geminata* en función de la frecuencia de células en división (Kilroy 2013).

### Kilroy y Bothwell (2012)

Nueva Zelanda cuenta con características de sus ríos de carácter mensual gracias a muestreos sistemáticos realizados desde 1989, por lo que los autores utilizaron parte de estos datos (desde enero de 2008 hasta enero de 2010), más un muestreo biológico en febrero de 2010, para encontrar que la tasa de división celular de *D. geminata* se correlaciona positivamente con la concentración de Fósforo en el agua (Figura 23.a) y las floraciones se correlacionan inversamente con esta variable (Figura 23.b). Esto es, a mayor concentración de Fósforo, mayor división celular y menor floración o biomasa. Si se visualizan en un mismo gráfico las variables de la Figura 23 que estaban en el eje de las abscisas (Fósforo y SCI), se obtiene la Figura 24 que muestra la notable relación inversa entre ellas. Se destaca que el gráfico cuenta con más puntos que en la Figura 23 pues incluye sitios donde didymo no estuvo presente ( $SCI \approx 0$ ).



**Figura 23.** Relación significativa entre (a) frecuencia de células en división (FDC) y promedio del fósforo disuelto promedio, y (b) FDC y crecimiento algal (SCI) en 15 ríos de la Isla Sur de Nueva Zelanda donde *D. geminata* estaba presente (Fuente: Kilroy & Bothwell 2012)



**Figura 24.** Relación entre el Fosfato disuelto promedio y el índice de crecimiento algal en los 31 sitios muestreados por Kilroy & Bothwell (2012) (Fuente: Kilroy 2013)

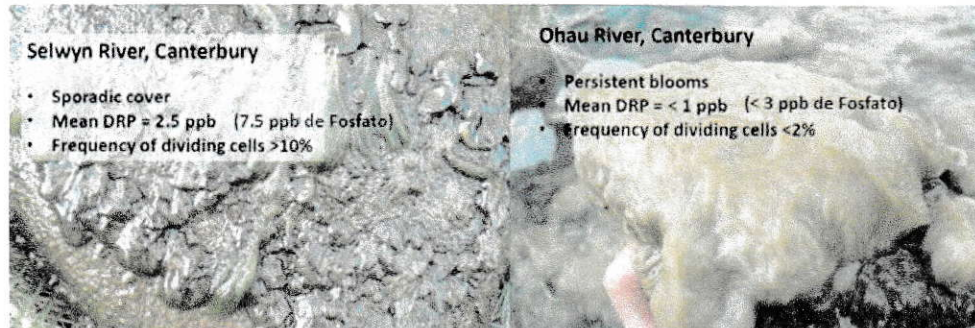
En este mismo artículo científico y con la misma base de datos, los autores confeccionaron Figura 26 (pág. 87), en la cual se destaca que aproximadamente a partir de  $6 \mu\text{g}(\text{PO}_4^{3-})/\text{L}$  (línea roja), la presencia, la cobertura y la cantidad de *D. geminata* decrece notablemente; esto es, la microalga está presente solo en 3 puntos de muestreo con Fosfato sobre esa concentración (desde “Grey 2” a la derecha), con muy bajo biovolumen y muy bajo % de cobertura, siendo que en los ríos con menos Fosfato (desde “Waiau” a la izquierda), el % de cobertura suele ser mayor al 40%, llegando a 95% y con altos biovolúmenes.

Un tercer resultado interesante de este artículo es la Figura 27 y la Tabla 15 (páginas 88 y 89). En noviembre de 2008, primavera, los autores estimaron la concentración de nutrientes en un transecto del río Waitaki (ultra-oligotrófico con didymo) a partir de mediciones de conductividad eléctrica justo aguas abajo de la confluencia con el arroyo Otiake (oligotrófico sin didymo). Encontraron que existía un gradiente de cantidad y cobertura de didymo que se correlacionaba con un gradiente de Fosfato, Fósforo total, y Nitrato, debido al aporte nutritivo del afluente sin didymo (Figura 27). A mayor cantidad de Fósforo total aportado por el arroyo levemente nutritivo, menor cantidad de didymo (el nivel de Fosfato está bajo el límite de detección).

Un cuarto y último resultado interesante de la publicación, surge de que, usando los canales artificiales de Kilroy & Bothwell (2011), los autores expusieron colonias didymo a un ambiente nutritivo por 4 semanas, y luego fueron privadas de nutrientes por 2 semanas, encontrando que la FDC disminuyó un 60% y el largo de los tallos aumentó en un 250%, es decir, las células al tener menos nutrientes se dividen menos pero siguen recibiendo radiación solar por lo que producen más tallos, cambiando el color de las colonias de café oscuro a beige pálido. Esto se relacionan directamente con las observaciones de Kilroy (2013) (Figura 25), puesto que a mayor concentración de Fosfato se aprecian colonias menos gruesas, más oscuras (con más células) y

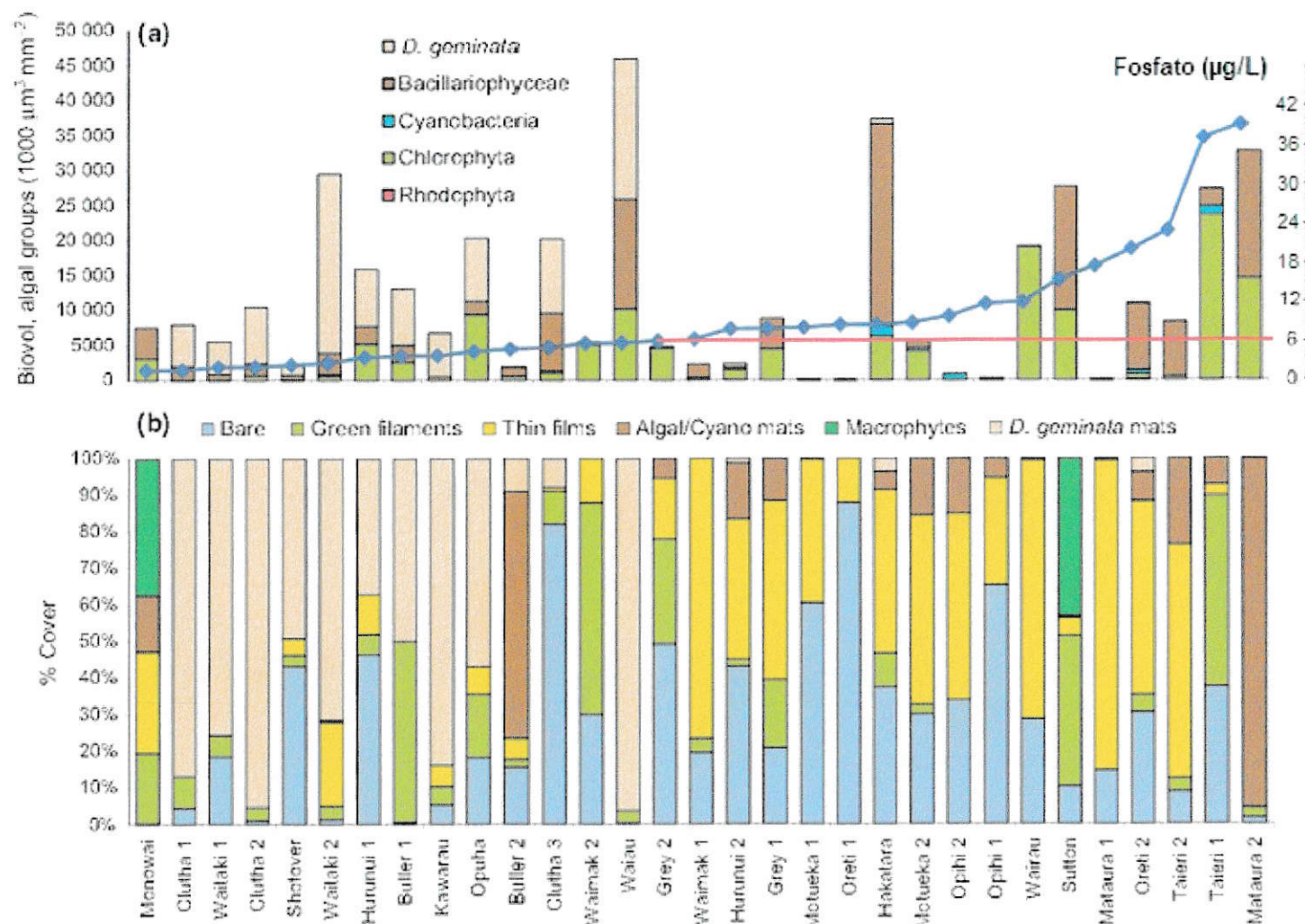


esporádicas (izquierda), mientras que con menos de 3  $\mu\text{g/L}$  de Fوسفato promedio las floraciones son persistentes, gruesas, pálidas y con muy baja FDC (< 2%) (derecha).



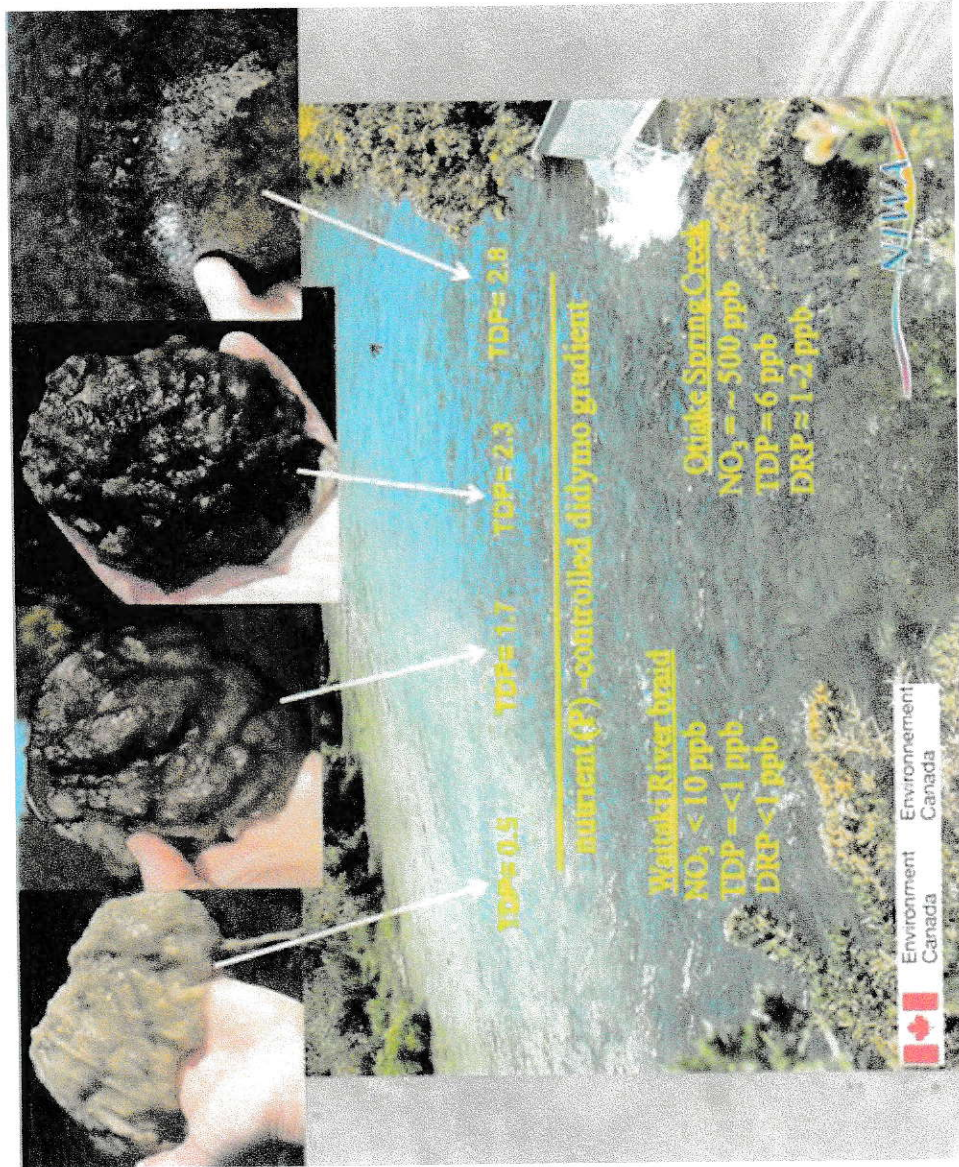
**Figura 25.** Comparación floraciones didymo en dos ríos neozelandeses, con nivel de Fوسفato promedio de 7,5 y <3  $\mu\text{g/L}$  respectivamente (Kilroy 2013)

Todo lo anterior se relaciona directamente con esta frase estipulada en Bothwell y col. (2012): “las floraciones didymo terminan de crecer cuando la tasa de división celular no es limitada por fósforo (es decir cuando hay fósforo suficiente para la reproducción o división celular), y las floraciones molestas no empiezan hasta que dichas tasas son limitadas por Fوسفato”.



**Figura 26.** (a) Biovolumen algal en 31 sitios estudiados entre enero y marzo de 2010. (b) Porcentaje de cobertura en cada sitio según 6 categorías. Los sitios fueron ordenados en orden creciente de Fosfato disuelto, mostrado en (a). (Kilroy & Bothwell 2012)





**Figura 27.** Gradiente de didymo controlado por nutrientes. Confluencia del arroyo Otiake y un brazo del río Waitaki, NZ (Bothwell 2012). Los nutrientes son: Nitrato, Fósforo reactivo disuelto (TDP) y Fósforo reactivo disuelto o Fósforo de Fosfato (DRP).



**Tabla 15.** Porcentaje de cobertura y apariencia de *D. geminata* en tapetes en intervalos de un metro a lo largo del fondo del río Waitaki en un transecto a lo ancho del canal, aguas abajo de la confluencia con el arroyo Otiake más rico en nutrientes (noviembre de 2008). También se muestra para cada punto la conductividad en el fondo, el porcentaje (v/v) de agua del Otiake, el N-Nitrato y el fósforo total disuelto (TDP) los calculados a partir del porcentaje de mezcla entre arroyo Otiake y río Waitaki y las mediciones de TDP y N-Nitrato en arroyo Otiake (6 y 530 µg/L, respectivamente) y en el río Waitaki (0,5 y 4,0 µg/L, respectivamente) aguas arriba de la confluencia. (Kilroy & Bothwell 2012).

Distance from spring bank (m)	Conductivity (µS cm <sup>-1</sup> )	% Otiake spring water <sup>a</sup>	NO <sub>3</sub> -N (mg m <sup>-3</sup> )	TDP (mg m <sup>-3</sup> )	<i>E. geminata</i> colonies/mats	
					Cover (%)	Appearance
1	93	42	225	28	0	No colonies
2	90	38	204	26	<1	Very few, small colonies, <10 mm diameter
3	85	33	178	23	1	Isolated small colonies, 10 mm diameter
4	79	26	141	19	6	Some colonies coalescing
5	75	21	112	17	15	Many coalesced colonies, 1 cm thick
6	71	17	93	14	53	Mass coalesced colonies, 2 cm thick
7	65	10	57	11	100	Continuous mat, pale in colour
8	56	0	4	0.5	100	Mat sloughing

<sup>a</sup>Calculated from conductivity measured along the transect and measured values in the Otiake Spring Creek (145 µS cm<sup>-1</sup>) and in the Waitaki River (56 µS cm<sup>-1</sup>) upstream from the confluence using an end-member mixing model.

**Tabla 16.** Promedios, rangos y valores máximos (en paréntesis) para la clasificación del estado trófico en lagos templados según (Universidad Austral de Chile 2012).

		Dillon 1975	Carlson 1977	OECD 1982	Smith 1999, Nürnberg 1996	Guía NS Tabla 2
Disco Secchi (m)	Ultraoligo-	-	-	-	-	> 20
	Oligo-	> 5	> 4	12-6	> 4	≥ 10
	Meso-	5-2	4-2	6-3	4-2	10-5
Clorofila a (µg/L)	Ultraoligo-	-	-	-	-	< 1
	Oligo-	≤ 2,1 ( < 5,7)	< 2,6	1-2,5 (< 8)	< 3,5	< 3
	Meso-	≤ 5,6 (< 15)	2,6-7,3	2,5-8 ( < 25)	3,5-9	3-10
P Total (µg/L)	Ultraoligo-	-	-	-	-	< 5
	Oligo-	≤ 10	≤ 12	4-10	< 10	< 10
	Meso-	≤ 20	12-24	10-35	10-30	≤ 20
N Total (µg/L)	Ultraoligo-	-	-	-	-	-
	Oligo-	-	-	< 350	< 350	≤ 250
	Meso-	-	-	350-650	350-650	≤ 400

-Carlson, R.E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 22(3): 361-369.

-Dillon, P.J., F.H. Rigler. (1975). A simple method for predicting the capacity of a lake for development base on lake trophic status. *J.Fish.Res.Board Can.* 32:1519-1531.

-Conama. (2005). Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marina. 1-18

-Nürnberg, G.K. (1996) Trophic state of clear and colored, soft- and hard-water lakes with special consideration of nutrients, anoxia, phytoplankton and fish. *Lakes and Reservoir Management* 12: 432-447

-Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (1982). *Eutrophication Of Waters. Monitoring, Assessment And Control.* 156 pp.

-Smith VH, GD Tilman & JC Nekola (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution* (100):179-196.

**Tabla 17.** Límites para la clasificación trófica de ríos templados según Dodds y col. (1998)

	Límite oligo/meso-trófico	Límite meso/eu-trófico
Clorofila a (µg/L)	10	30
N-Total (µg/L)	700	1500
P-Total (µg/L)	25	75