



## II CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN SISTEMAS ACUÁTICOS, CChIASA

### CARACTERIZACIÓN DEL FENÓMENO DE LA TURBIEDAD EN EL RÍO MAIPO Y SU POSIBLE EVOLUCIÓN FUTURA CONSIDERANDO LOS CAMBIOS EN LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS PROYECTADAS

**Carlos Poblete<sup>1</sup> Francisco Suárez<sup>2</sup> Jorge Gironás<sup>3</sup> Sebastián Vicuña<sup>4</sup>  
Jorge Reyes<sup>5</sup> Gonzalo Yáñez<sup>6</sup> Andrés Sarabia<sup>7</sup>**

#### RESUMEN EXTENDIDO

Las aguas del río Maipo se caracterizan por presentar una calidad que las hace adecuadas para la producción de agua potable mediante tecnologías de tratamiento convencionales. No obstante, en ocasiones la disponibilidad natural se ve afectada por eventos de crecidas con altas concentraciones de sedimentos en suspensión, alcanzando niveles de turbiedad que no permiten su tratamiento, representando un factor de vulnerabilidad para el sistema de producción de Aguas Andinas (Fundación Aquae, 2014).

El objetivo principal del trabajo es mostrar los avances logrados en la comprensión del fenómeno de turbiedades extremas en los últimos 10 años. Dentro de lo anterior, destacan las mejoras conseguidas en su caracterización y cuantificación, el aumento observado en su ocurrencia, los desafíos para lograr un pronóstico de corto plazo y los avances para conocer su posible evolución futura.

A diferencia de la mayoría de los estudios sobre producción y transporte de sedimentos en ríos, los cuales ponen énfasis en procesos de erosión general de la cuenca y producción de sedimentos a largo plazo, este caso de estudio está centrado en situaciones esporádicas, en las cuales se tiene un aumento brusco de la concentración de sedimentos transportados por el río. Por lo anterior, la información utilizada debe ser al menos horaria y la atención estará puesta en situaciones extremas de concentraciones en vez de condiciones medias.

Dentro de la caracterización de los eventos de turbiedad, destacan 3 aspectos: duración, intensidad y magnitud (ver Figura 1). La cuantificación de los eventos dependerá del criterio adoptado para tratar estos aspectos, motivo por el cual se han observado diversos resultados.

---

<sup>1</sup>Subgerente de Planificación Técnica y Recursos Hídricos, Aguas Andinas/ cpoblete@aguasandinas.cl

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental UC/ fsuarez@ing.puc.cl

<sup>3</sup>Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental UC/ jgironas@ing.puc.cl

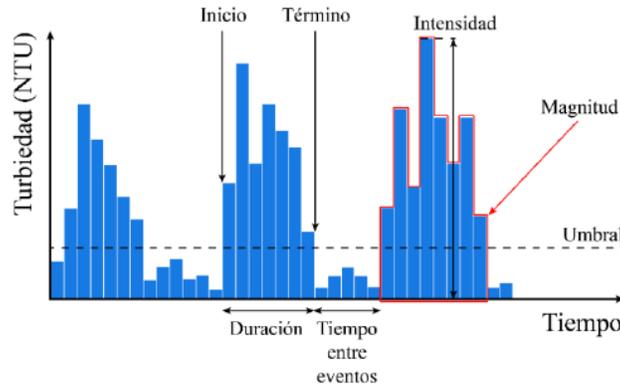
<sup>4</sup>Director del Centro de Cambio Global UC/ svicuna@ing.puc.cl

<sup>5</sup>Ingeniero de Proyectos, Aguas Andinas/ jreyesa@aguasandinas.cl

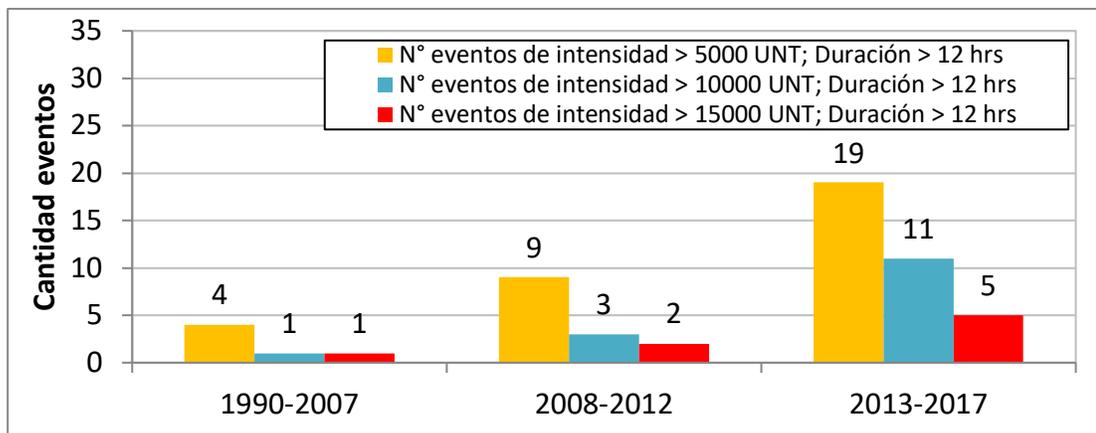
<sup>6</sup>Ingeniero de Proyectos, DICTUC/ gjyanez@uc.cl

<sup>7</sup>Ingeniero de Proyectos, DICTUC/ amsarabia@uc.cl

Sin embargo, independiente del criterio utilizado, se observa insistentemente una tendencia hacia un aumento en la ocurrencia de este fenómeno (ver Figura 2).

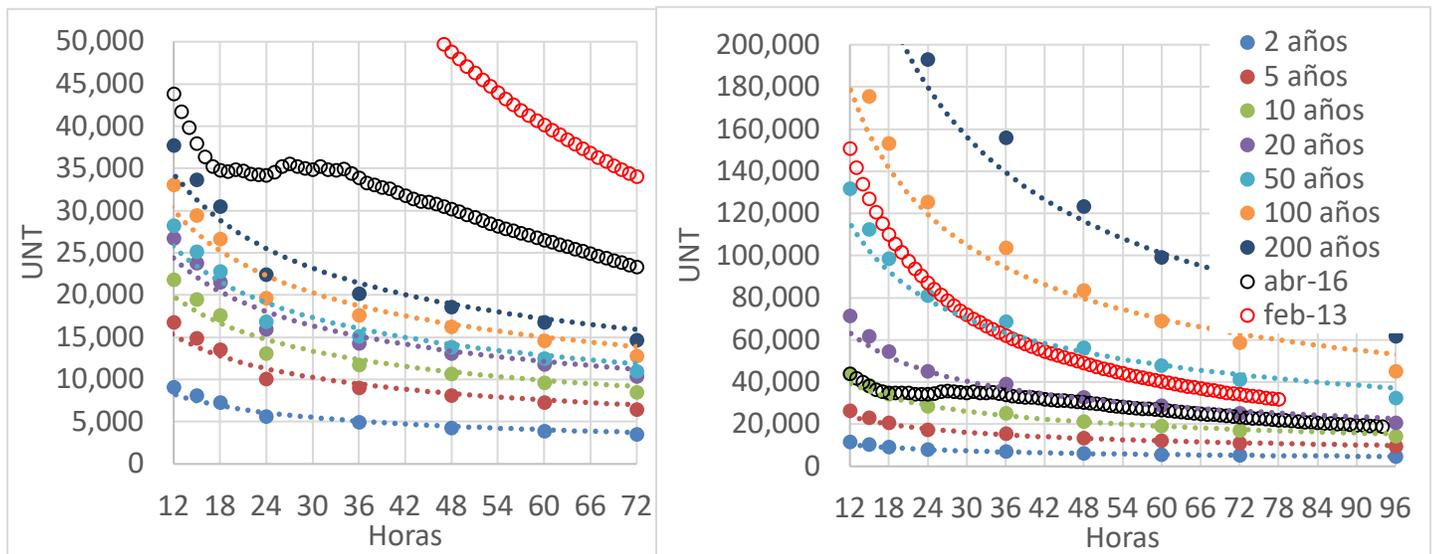


**Figura 1:** Definición gráfica de las propiedades de los eventos de turbiedad extrema



**Figura 2:** Evolución en la cantidad de eventos extremos de turbiedad en el río Maipo desde que se posee registro horario en captación Toma Independiente de Aguas Andinas

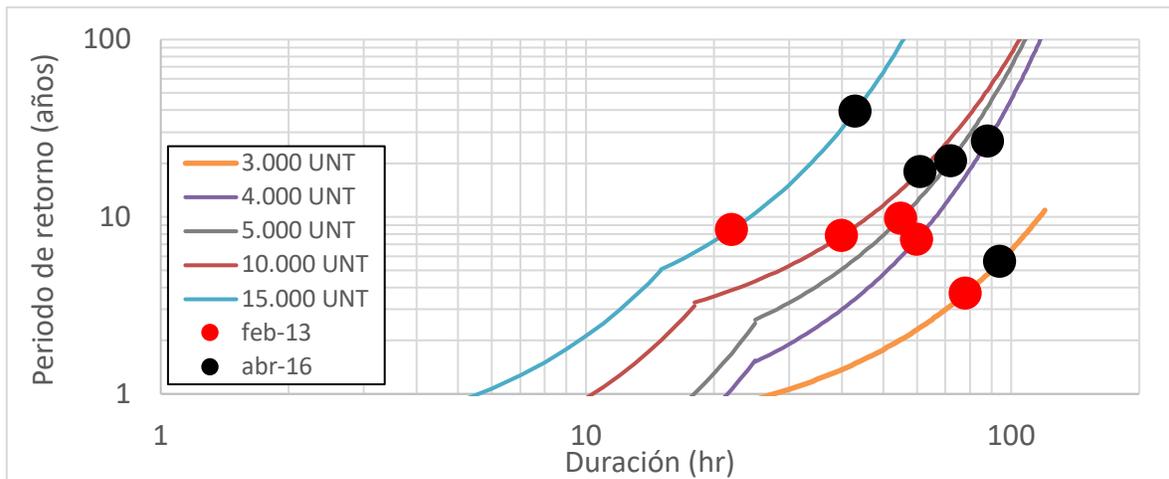
Una de las primeras actividades para caracterizar el fenómeno de turbiedad extrema, fue la construcción de curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), similares a las usadas en estudios de precipitaciones. La Figura 3 contrasta las curvas IDF obtenidas en el presente estudio, que consideran información de turbiedad del período 2000-2017 (AGUAS ANDINAS-DICTUC, 2018), con las equivalentes del primer estudio realizado (AGUAS ANDINAS-DICTUC, 2009). El cambio de escala vertical deja en evidencia el aumento que ha mostrado la ocurrencia de turbiedades extremas desde que se iniciaron los estudios. En ambas gráficas se incluyen además 2 de los eventos más importantes ocurridos en los últimos años, febrero de 2013 y abril de 2016. Mientras en el primer estudio, ambos eventos muestran periodos de retorno mayores a 200 años quedando casi fuera de escala, en el último estudio los mismos muestran retornos de 50 y 20 años respectivamente.



**Figura 3:** Curvas IDF de turbiedad horaria anual en captación Toma Independiente de Aguas Andinas. Estudio 2009 (izquierda) y estudio 2018 (derecha).

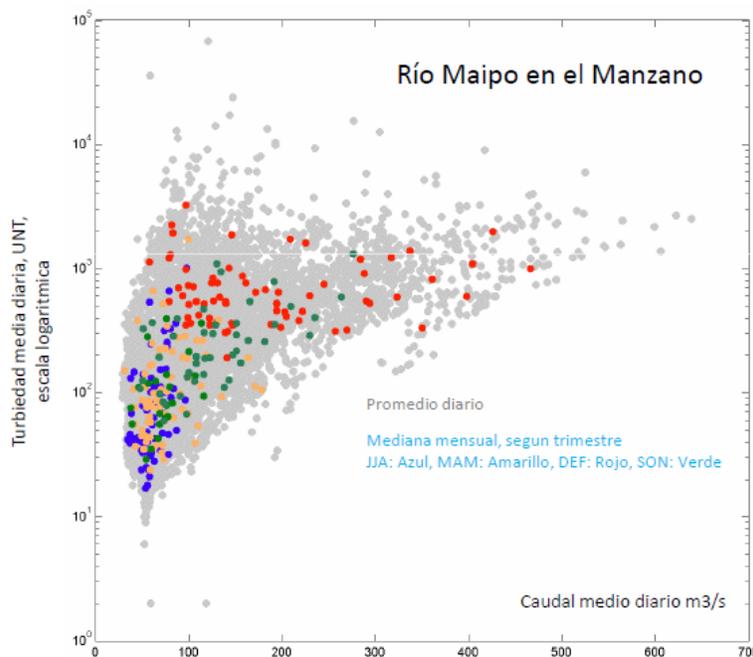
Cuando se sobrepasa un cierto umbral de turbiedad durante un evento extremo, las plantas de tratamiento de agua potable deben cerrar el ingreso de agua cruda para evitar que el sedimento que arrastran en estas condiciones acabe depositándose en las unidades de proceso, haciendo más extensa las tareas de una posterior limpieza y puesta en servicio de las mismas una vez que la turbiedad haya vuelto a valores normales. Por lo anterior, desde el punto de vista operacional interesa estudiar, más que el valor máximo alcanzado, el tiempo en que se sobrepasa un umbral de turbiedad límite.

Asumiendo que los eventos de turbiedad extrema son independientes y aplicando la teoría de sucesiones, la condición anterior se caracterizó mediante curvas similares a las IDF, reemplazando la intensidad por un umbral de turbiedad que define el inicio y el final de un evento de turbiedad extrema (ver Figura 4). Es interesante destacar que, según este nuevo enfoque y a diferencia del análisis anterior, el evento de 2016 es más extremo que el evento de 2013, lo que es consecuente con los efectos que causaron a la producción de agua potable. Independiente de que ambos eventos generaron sendos cortes de suministro, el evento de 2013 ocasionó 34 horas de reducción de producción, mientras que el evento del 2016 generó 94 horas de reducción de producción.



**Figura 4:** Curvas Umbral de turbiedad – Duración – Frecuencia, ajustadas utilizando un modelo exponencial definido por tramos a nivel anual.

El siguiente paso fue estudiar alguna relación de causalidad con la hidrometeorología de la cuenca. Parece evidente una relación de la turbiedad con el caudal del río, sin embargo y como muestra la Figura 5, turbiedades entre 3.000 y 4.000 UNT<sup>8</sup> ocurren en todo el espectro de caudales, demostrando la no linealidad del fenómeno con las variables usuales.



**Figura 5:** Diagrama de dispersión entre valores diarios de turbiedad y caudal en el río Maipo en el Manzano (círculos grises) para los años 1990-2013, Garreaud, 2013

<sup>8</sup> Valores límite sobre los cuales la producción de las plantas de tratamiento no puede ser 100%

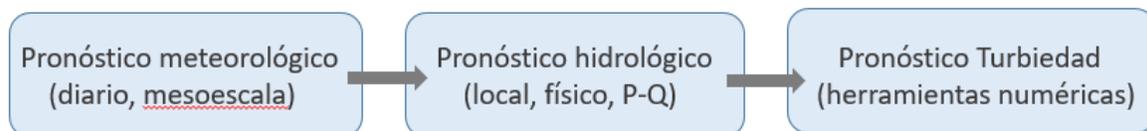


Un análisis de componentes principales, comprobó que las componentes relacionadas con la temperatura (isoterma), precipitación y caudal explican más del 65% de la varianza total del fenómeno. Otros análisis estadísticos para intentar cuantificar alguna relación entre los eventos de turbiedad observados y las variables predictoras anteriores han tenido moderados resultados.

En términos descriptivos, se han detectado 3 condiciones climatológicas que favorecen la ocurrencia de fenómenos de alza de turbiedades. Si bien las relaciones no son lineales ni tampoco estrictas, permiten avanzar en la comprensión del fenómeno:

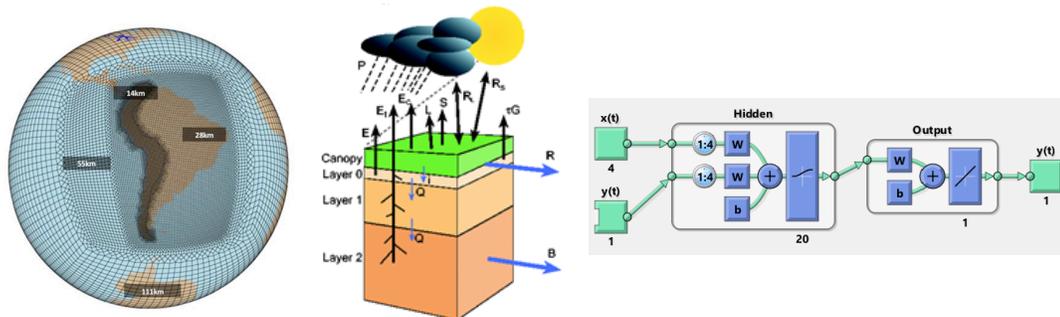
- 1) Deshielos de verano: desde noviembre a febrero de cada año, alzas de temperatura en la cuenca son seguidas por aumentos de turbiedad en el río. Estos aumentos sobrepasan valores de diseño de las plantas de tratamiento, pero al ser cíclicos, usualmente son controlados y no afectan el suministro a la población. Si el fenómeno se repite por varios días seguidos, puede constituir un escenario de riesgo.
- 2) Precipitaciones convectivas de verano: la precipitación estival sobre los Andes ocurre asociada preferentemente a actividad convectiva, donde parcelas de aire ascienden hasta su nivel de convección libre, generando precipitaciones intensas, cortas y localizadas, que favorecen episodios aluvionales constituyendo un gran factor de riesgo a la producción de agua potable.
- 3) Precipitaciones frontales con isoterma alta: entre los meses de marzo a mayo, se han observado sistemas frontales con isotermas  $0^{\circ}\text{C}$  inusualmente altas. El ascenso de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  implica un significativo aumento del área pluvial, es decir, el área dentro de la cuenca que recibe lluvia y aporta a la escorrentía superficial, dando origen a importantes crecidas de los ríos, con el consecuente arrastre de material y eventual alza de turbiedad.

No obstante lo anterior, la obtención de una herramienta de pronóstico operacional confiable es un tema sobre el que aún se está trabajando. Los esfuerzos han seguido una configuración como la mostrada en la Figura 6, donde un pronóstico meteorológico diario, alimenta un modelo hidrológico local, cuyos resultados se correlacionan con la turbiedad mediante herramientas numéricas. El objetivo es, además de pronosticar la ocurrencia de un evento de turbiedad, estimar la duración del mismo sobre un cierto umbral, variable esencial para optimizar la operación. Un aspecto clave en este tipo de pronóstico es la necesidad de actualización constante para corregir en línea los pronósticos.



**Figura 6:** Esquema tipo utilizado para un pronóstico operacional de turbiedad. Además de pronosticar la ocurrencia de un evento, interesa estimar la duración sobre un cierto umbral

La última parte de este estudio busca resolver cuál es la posible evolución de este fenómeno considerando los cambios en condiciones climáticas que se proyectan hacia el futuro. Para esto, se plantea la utilización conjunta de modelos climáticos regionales de alta resolución (e.g., ver Wu et al., 2017) con modelos hidrológicos locales que alimenten un modelo de pronóstico numérico de turbiedad (ver Figura 7). Una vez validados los modelos, se proyectarán series hidroclimatológicas para los periodos futuros 2031-2060 y 2071-2100, y en base a ellas, se buscará estimar los cambios en las tendencias del fenómeno de turbiedad en el río Maipo, actividad actualmente en desarrollo.



**Figura 7:** Combinación de modelos climáticos de alta resolución, hidrológicos a escala local y numéricos de turbiedad, para estimación de cambios en las tendencias futuras del fenómeno de turbiedad

## Referencias

- AGUAS ANDINAS - DICTUC (2009). Caracterización de aguas captables en río maipo y análisis del fenómeno de turbiedad, informe complementario del estudio hidrológico de fuentes superficiales y subterráneas del Grupo Aguas.
- AGUAS ANDINAS - DICTUC (2018). Estudio del fenómeno de turbiedad en el río Maipo.
- Fundación Aquae (2014). Determinación de posibles impactos en la gestión de los abastecimientos humanos de agua situados en la zona metropolitana de Chile, Aquae Papers, N° 5.
- Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F.J., Cruzat, M.L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., Bambach, N. (2013). Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrological Sciences Journal* 58:8, pages 1598-1619
- Wu, C., Liu, X., Lin, Z., Rhoades, A.M., Ullrich, P.A., Zarzycki, C.M., Lu, Z., Rahimi-Esfarjani, S.R. (2017). Exploring a Variable-Resolution Approach for Simulating Regional Climate in the Rocky Mountain Region Using the VR-CESM. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 10,939-10,965