

AQUAe



PAPERS

Nº 5

SEPTIEMBRE 2014

5

**DETERMINACIÓN DE POSIBLES IMPACTOS EN LA GESTIÓN DE
LOS ABASTECIMIENTOS HUMANOS DE AGUA SITUADOS EN
LA ZONA METROPOLITANA DE CHILE, PROVOCADOS POR
FENÓMENOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO**

Coordinador: Manuel Cermerón Romero.

Autores: Marcelo Bravo Fortune, Raúl Flores Audibert, Raúl Galindo Urra,
René Garreaud Salazar, Eleonora Muñoz Morales, Alejandra Serey Amador,
Maximiliano Viale



DETERMINACIÓN DE POSIBLES IMPACTOS EN LA GESTIÓN DE LOS ABASTECIMIENTOS HUMANOS DE AGUA SITUADOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE CHILE, PROVOCADOS POR FENÓMENOS ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

Coordinador:

Manuel Cermerón Romero.

Autores ¹:

Marcelo Bravo Fortune.

Profesor a tiempo parcial, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Raúl Flores Audibert.

Instructor académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Raúl Galindo Urrea.

Profesor titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

René Garreaud Salazar.

Profesor titular, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Chile
Director del Centro de Investigación del Clima y Resiliencia, Universidad de Chile, Chile

Eleonora Muñoz Morales.

Profesora a tiempo parcial, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Alejandra Serey Amador.

Profesora a tiempo parcial, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

Maximiliano Viale.

Investigador posdoctoral, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Chile

1 Autores en Orden Alfabético.



RESUMEN EJECUTIVO	6
PALABRAS CLAVE	9
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	10
2. CONTEXTO	11
2.1 CONTEXTO REGIONAL, CUENCA DE RÍO MAIPO Y RECURSOS HÍDRICOS	11
2.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE PROBLEMAS ASOCIADOS A EVENTOS CLIMÁTICOS	14
3. ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS QUE AFECTAN A LA CUENCA DEL RIO MAIPO	17
3.1 RELACIÓN ENTRE TURBIDEZ Y CAUDAL	17
3.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS LOCALES	19
3.3 ANÁLISIS SINÓPTICO	23
3.4 DESCARGAS ELÉCTRICAS COMO APROXIMACIÓN A LA ACTIVIDAD CONVECTIVA	24
3.5 PERSPECTIVAS DE EVENTOS DE ALTA TURBIEDAD EN UN CLIMA CAMBIANTE	26
3.6 ANÁLISIS Y PROYECCIÓN DE SEQUÍAS	27
4. SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LADERAS DE LA CUENCA DEL MAIPO	30
4.1 MARCO TEÓRICO	30
4.2 EVENTOS DE VERANO 2013 EN CUENCA DEL RÍO MAIPO	32
4.3 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA DETERMINAR LA SUSCEPTIBILIDAD	34
4.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	35
4.3.2 INSPECCIÓN DE TERRENO	39
4.3.3 EVALUACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD	41
4.4 RESULTADOS DE ZONIFICACIÓN PARA LAS ZONAS EN ESTUDIO	43
4.5 ANÁLISIS PRELIMINAR DE VINCULACIÓN DE LA REMOCIÓN EN MASAS CON LA TURBIDEZ	44
4.5.1 ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSPORTE Y EL TIEMPO DE ARRIBO DE UN EVENTO DE REMOCIÓN DE MASAS	45
4.5.2 ANÁLISIS ESPECTRAL DE TURBIDEZ	48
4.5.3 PROSPECTIVA: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE LOS FACTORES CONDICIONANTES Y DESENCADENANTES	49

5. IMPACTO EN LA GESTIÓN DE LOS ABASTECIMIENTOS HUMANOS DE AGUA POR ALTOS NIVELES DE TURBIDEZ Y SEQUÍA EN CUENCA	50
5.1 ANÁLISIS DE OCURRENCIA DE ESTOS IMPACTOS Y SU EVOLUCIÓN A MEDIANO-LARGO PLAZO	50
5.2 TIPOS DE IMPACTOS Y SUS CARACTERÍSTICAS	52
5.2.1 IMPACTOS ASOCIADOS A FENÓMENOS DE SEQUÍA	52
5.2.2 IMPACTOS ASOCIADOS A FENÓMENOS DE TURBIDEZ	53
5.3 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN DE IMPACTOS ASOCIADOS A FENÓMENOS DE SEQUÍA Y ALTA TURBIDEZ	54
5.3.1 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN A FENÓMENOS DE SEQUÍA	56
5.3.2 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN A FENÓMENOS DE ALTA TURBIDEZ	58
6. CONCLUSIONES	60
6.1 ENFOQUE ESTRATÉGICO	62
REFERENCIAS	64
AUTORES	66
ENGLISH VERSION	69

RESUMEN EJECUTIVO

El cambio climático es reconocido como uno de los desafíos ambientales globales más complejos para la sociedad. Diversos estudios realizados coinciden en que Chile es un país vulnerable a este fenómeno y prevén para la Zona Central de Chile en un futuro a medio y largo plazo que el incremento global de las concentraciones de gases de efecto invernadero implicará aumentos de temperatura y disminución de las precipitaciones invernales y generará impactos negativos sobre la disponibilidad de los recursos hídricos del país.

El presente estudio, desarrollado por la Universidad de Chile, la Universidad Federico Santa María y la Fundación AQUAE, tiene por objetivo la determinación de impactos en la gestión de los abastecimientos humanos de agua situados en la Región Metropolitana de Chile asociados a posibles efectos del cambio climático. Específicamente, el estudio se ha centrado en lo relativo a la disponibilidad de agua y en la ocurrencia de eventos extremos de alta turbidez. Es importante destacar que durante los últimos años la cuenca del río Maipo, principal fuente de abastecimiento de agua potable de la Región Metropolitana de Chile, ha sufrido una serie de eventos meteorológicos y climáticos fuera de los patrones normales seguidos en las décadas pasadas que se pueden resumir en dos aspectos centrales:

- Desde el año 2009 y hasta la fecha existe una condición de sequía generalizada en la Zona Central de Chile, incluyendo la Región Metropolitana, que ha afectado de manera notoria a la agricultura y en menor medida al abastecimiento de la población.
- Se han producido incrementos inusuales de turbidez durante la estación de verano con un impacto directo en la operación de plantas de producción de agua potable, donde el último evento registrado provocó dificultades de suministro de agua a más de 1 millón de clientes (4 millones de habitantes) durante unas 24 horas.

Los fenómenos de alta turbidez de acuerdo con el análisis realizado se pueden clasificar en dos tipos:

- Eventos térmicos: generados por un aumento de la temperatura del aire que acelera el deshielo dentro de la cuenca y el transporte de sedimentos por este mecanismo, con una buena relación lineal entre anomalías de caudal y turbidez.
- Eventos pluviales: que se caracterizan por la ocurrencia de tormentas

convectivas sobre la parte alta de la cordillera, con precipitaciones intensas, de corta duración y de pequeña escala espacial, que generan remociones en masa de diversa intensidad e incrementan por esta vía la turbidez en el río. En estos casos existe un descenso o conservación de la temperatura del aire y una eventual disminución del proceso de deshielo, que no alcanza a ser compensado por el aporte pluvial, con lo que se genera una caída en los caudales.

Diversos trabajos indican que la precipitación sobre la cordillera de los Andes de la Zona Central de Chile durante el periodo de verano ocurre preferentemente asociada a una actividad convectiva. La condición localizada de esta actividad meteorológica impide a la actual red de pluviómetros detectar buena parte de estas precipitaciones. Sin embargo, como la actividad convectiva está muchas veces asociada a descargas eléctricas, surge como alternativa aprovechar los registros de la red WWLLN (World Wide Lightning Location Network) para detectar dicha actividad en la zona de estudio. Otra variable complementaria de interés para mejorar el pronóstico de precipitación convectiva (y potencialmente aluviones en el río Maipo) es la componente zonal del viento (este-oeste), por cuanto es el viento desde Argentina el responsable de transportar aire húmedo, que es capaz de remontar sobre los Andes y alimentar estas tormentas.

Aprovechando la asociación estudiada entre tormentas de verano y días con viento zonal desde el este y dado que el viento es una variable de gran escala de mucha mejor representación en modelos globales y regionales de la atmósfera, es posible indirectamente conocer proyecciones sobre la actividad convectiva bajo escenarios de cambio climático. Considerando un escenario de emisiones RCP8.5 (fuerte emisión de gases de efecto invernadero), se observa que la Región Metropolitana está en una zona intermedia, por lo que no existe una señal clara que permita inferir un aumento o disminución de la actividad convectiva (y por consiguiente los eventos extremos de turbidez) sobre el río Maipo.

Otro fenómeno relevante en la gestión y el abastecimiento de agua en la región es la sequía. En los últimos cuatro años, la Zona Central de Chile se ha visto afectada por una disminución de las precipitaciones, cuyos valores individuales no constituyen eventos extraordinarios por sí mismos, pero sí lo es la duración de la condición deficitaria.

Para analizar las perspectivas futuras de estos eventos, se ha considerado la serie de precipitaciones simuladas para la Zona Central de Chile (33°S 71°W) por los modelos globales del IPCC 2013, normalizándolas por sus respectivos promedios de largo plazo y asumiendo un escenario de emisio-

nes RCP8.5. Los resultados expresados como el número de sequías de tres o más años se duplican en el futuro cercano y aumentan en más de diez veces en el futuro lejano.

El estudio detallado de los mecanismos de remoción en masa que provocarían los eventos extremos de turbidez indican que deben conjugarse factores condicionantes que favorecen su generación (características geomorfológicas propias del terreno) con factores desencadenantes que modifican la estabilidad preexistente del terreno y ayudan a desencadenar los eventos (causas meteorológicas, entre otras). Las remociones tipo flujo se caracterizan por movimientos continuos donde las superficies de ruptura no son preservadas y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente y se comportan de manera similar a un líquido viscoso de material saturado en agua.

Para el análisis de estos fenómenos suele efectuarse un estudio de riesgos que involucra, por un lado, el análisis de la amenaza potencial (peligro) y, por el otro, el impacto que tendrá aguas abajo en la infraestructura y la población en general (vulnerabilidad). Como una etapa previa a un estudio de tales características suele ser útil identificar en una primera fase las zonas sensibles a la ocurrencia de amenazas, que fue lo que se realizó en el presente estudio. La metodología aplicada para ello correspondió a la propuesta por Lara (2007), que permite determinar un índice de susceptibilidad (IS) basado en la suma de puntajes ponderados para distintos factores condicionantes.

El área de estudio y, también, las dos unidades de análisis fueron definidas en aquellos sectores donde se verificaron eventos tipo flujo en las fechas en que se produjeron los altos niveles de turbidez en el río Maipo (21 de enero y 8 de febrero de 2013).

La aplicación de la metodología arroja mapas de zonificación (para ambos sectores analizados) donde se reconocen unidades con IS variable entre 0-24 y 25-49, es decir, baja y media susceptibilidad, respectivamente, e IS entre 50-74 y 75-100, que implican de alta a muy alta susceptibilidad, respectivamente. Dichos valores estarían indicando que los eventos de alta turbidez que históricamente se han producido en la cuenca del Maipo seguramente continuarán ocurriendo. La probabilidad de mayor o menor ocurrencia de ellos dependerá del análisis de los factores desencadenantes como son la intensidad de la precipitación y la precipitación acumulada, con origen en tormentas de invierno y verano.

Los principales impactos que cada uno de los fenómenos analizados, turbidez y sequía, pueden llegar a provocar en el abastecimiento de

agua potable en la Región Metropolitana del país, basándose en los resultados de los estudios meteorológicos y geológicos realizados, podrían resumirse en:

- Impactos por disminución de caudales: adquisición de derechos de aprovechamiento, utilización de fuentes de agua alternativas, económico (inversión y mayores costes operativos), conflictos por el uso, eventual racionamiento e impacto en la imagen corporativa.
- Impactos por alta turbidez: impactos económicos (inversión, reparación y costes de operación) e impactos en la imagen corporativa.

El enfoque estratégico que permita hacer frente a los fenómenos climáticos descritos en este documento, sequía y turbidez, se orienta hacia la implementación de una serie de actuaciones para mitigar, adaptar y gestionar riesgos que permitan minimizar los posibles impactos asociados al cambio climático sobre el abastecimiento de agua para consumo humano en el Gran Santiago. Dentro de este enfoque destacan las actuaciones destinadas a incrementar el uso de recursos hídricos alternativos, implementar actuaciones tendentes a mejorar la eficiencia en el uso de recursos hídricos, garantizar la disponibilidad de agua cruda de calidad aceptable para su tratamiento, incrementar la capacidad de regulación de agua potable y mejorar la información asociada a parámetros clave en la cuenca que permitan mejorar el conocimiento general y anticipar eventos de turbidez.

El análisis y los resultados del presente estudio, además de contribuir al conocimiento de los impactos asociados al cambio climático en lo que respecta a disponibilidad de agua y altos niveles de turbidez, permitirán asegurar una correcta y anticipada planificación de las obras de mitigación por parte de la empresa sanitaria y demostrarán el compromiso y la preocupación de esta por la sostenibilidad futura del servicio brindado a sus clientes.

PALABRAS CLAVE

Cambio climático, abastecimiento de agua potable, sequía, turbidez, gestión de recursos hídricos, mitigación y adaptación, remoción en masa, índice de susceptibilidad.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El abastecimiento de agua para consumo humano en la Región Metropolitana de Chile, donde se ubica Santiago, su capital, con más de 6 millones de habitantes, se realiza al objeto de asegurar el suministro a todos sus habitantes según las condiciones y los estándares de cantidad, calidad y oportunidad establecidos en la normativa vigente.

Las fuentes principales de captación de agua cruda de la empresa sanitaria Aguas Andinas, que abastece a cerca del 89 % de la población de la región (SISS, 2013), son los ríos Maipo y Mapocho, y las fuentes secundarias son los acuíferos naturales que se encuentran dentro del área de concesión. En el año 2013, la demanda total anual de agua potable para la empresa Aguas Andinas fue de 708 hm³ (Aguas Andinas, 2014) y fue abastecida alrededor de un 80% utilizando recursos superficiales de la cuenca de los ríos Maipo y Mapocho.

La situación de normalidad en el abastecimiento de la población puede verse afectada por eventos o circunstancias que pueden llegar a dificultar y en su extremo impedir la producción de agua potable. Es lo que ha debido afrontar la empresa Aguas Andinas en los últimos tiempos, ya sea por la sequía que por cuarto año ha afectado a la Región Metropolitana (2010-2013) o por fenómenos aluvionales ocurridos durante los últimos años y que durante el verano del año 2013 provocaron la interrupción del suministro de agua potable a la población en dos ocasiones, y en uno de estos eventos se produjo un corte durante casi 24 horas.

Es muy difícil atribuir los eventos citados anteriormente de sequía y aluvionales al fenómeno del cambio climático. Sin embargo, no se puede hacer abstracción a lo que están señalando estudios que se han realizado utilizando modelos de circulación global del clima futuro, los cuales están indicando para la Zona Central de Chile una importante disminución de las lluvias (del 15 al 30%) y aumentos de temperatura (de 2 a 4 °C), particularmente en zonas cordilleranas.

Ante tales situaciones, la correcta gestión del abastecimiento humano de agua obliga a una planificación sistemática de acciones preventivas y a la definición de cursos de acción cuando dichas situaciones ocurren, y necesariamente deben plantearse interrogantes respecto a la probabilidad de ocurrencia de este tipo de fenómenos.

En virtud de lo anterior, considerando los impactos provocados por estos fenómenos y el contexto de cambio climático en que están insertos, la

Universidad de Chile, la Universidad Federico Santa María y la Fundación AQUAE han decidido aunar esfuerzos y aportar su experiencia para elaborar el presente estudio, cuyo objetivo es la determinación de posibles impactos en la gestión de los abastecimientos humanos de agua situados en la Región Metropolitana de Chile.

El estudio contribuirá al conocimiento de los efectos asociados al cambio climático en lo que respecta a disponibilidad de agua y ocurrencia de eventos extremos de altos niveles de turbidez, permitirá asegurar una correcta y anticipada planificación de las obras de mitigación por parte de la empresa sanitaria y demostrará el compromiso y la preocupación de esta por la sostenibilidad futura del servicio brindado a sus clientes.

2. CONTEXTO

2.1 Contexto Regional, cuenca de río Maipo y recursos hídricos

La geografía de Chile provee una variedad única de condiciones climáticas y distribución de recursos hídricos repartidos en alrededor de 200 cuencas de extensión relativamente pequeña en el contexto global, dada la estrecha distancia entre la cordillera de los Andes y el océano Pacífico. Dentro de esta diversidad climática se distinguen dos patrones de precipitaciones (Banco Mundial, 2011), uno con precipitaciones concentradas en el verano presente en el sector norte, y otro con precipitaciones distribuidas predominantemente en el periodo otoño-invierno en el resto del país (centro y sur).

En términos de disponibilidad de agua, de acuerdo con el *Informe de diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos en Chile* (Banco Mundial, 2011), el volumen medio de escorrentía media total alcanza los 53.000 m³/persona/año, valor bastante alto comparado con la media mundial de 6.600 m³/persona/año y muy superior al valor de 2.000 m³/persona/año, considerado el umbral para el desarrollo sostenible. Esta media, sin embargo, no refleja la realidad dispar a lo largo del país, dada la diversidad climática descrita, en la que se obtienen valores por debajo de los 800 m³/persona/año desde la Región Metropolitana hasta el norte, mientras que en la Zona Sur se superan los 10.000 m³/persona/año.

Esta situación es crítica si consideramos la Zona Central de Chile y en particular la Región Metropolitana de Santiago, que concentra casi la mitad de la población de Chile y la actividad económica del país y cuyo balance

entre disponibilidad de agua y demanda es marginal, tal como se observa en la figura 1.

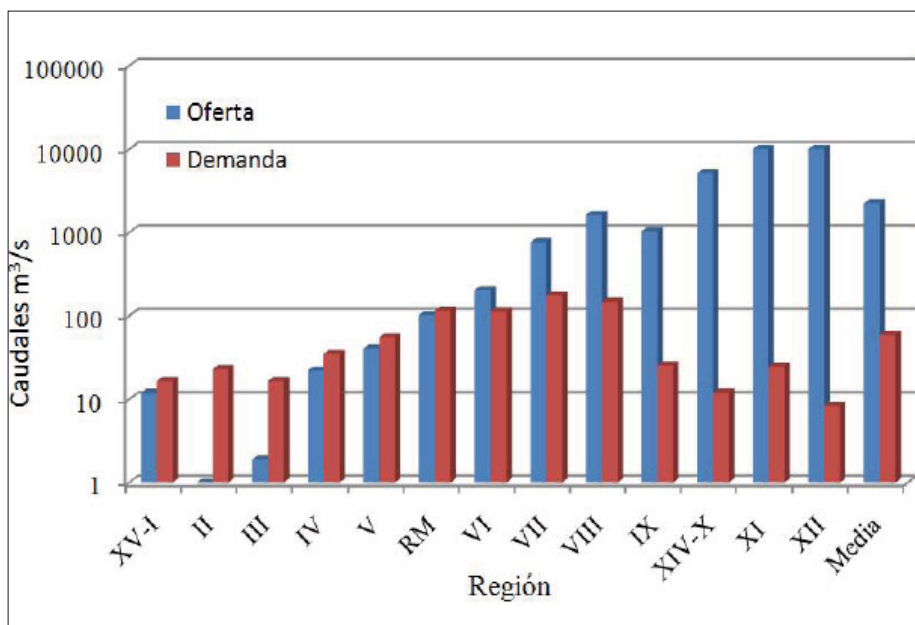


Figura 1. Balance entre disponibilidad de recursos hídricos y demanda (Banco Mundial, 2011).

En el contexto climático, la cuenca del río Maipo se encuentra dentro de una zona de clima templado, con precipitaciones medias de 320 mm (Aguas Andinas, 2011), concentradas en su mayor parte en una estación muy corta de invierno, y con una prolongada y seca estación de verano. El caudal medio del río Maipo, medido en la estación fluviométrica de Río Maipo en el Manzano, tiene máximos y mínimos históricos de 234,8 m³/s y 37,1 m³/s, respectivamente (Aguas Andinas, 2010). El régimen hidrológico del río es de carácter pluvionival y se caracteriza por una gran variabilidad estacional de caudales, con un máximo anual en el mes de diciembre. Adicionalmente, la cuenca tiene tres grandes sistemas de acumulación y regulación de recursos superficiales, que son la laguna Negra, la laguna Lo Encañado y el embalse El Yeso, todos ellos con un volumen operativo de almacenamiento de 220 hm³ (Aguas Andinas, 2011). De forma complementaria, la cuenca del río Maipo, de acuerdo con el catastro de la Dirección General de Aguas, contiene alrededor de 1.000 glaciares con una superficie de 380 km², cuyo aporte a la hidrología de la cuenca es hoy en día materia de estudio. La cuenca de la estación Río Maipo en el Manzano tiene una superficie aproximada de 5.000 km², de modo que el área con glaciares corresponde a menos del 10%.

La figura 2 muestra la ubicación de la cuenca del río Maipo y los principales ríos que la componen (Aguas Andinas, 2010).

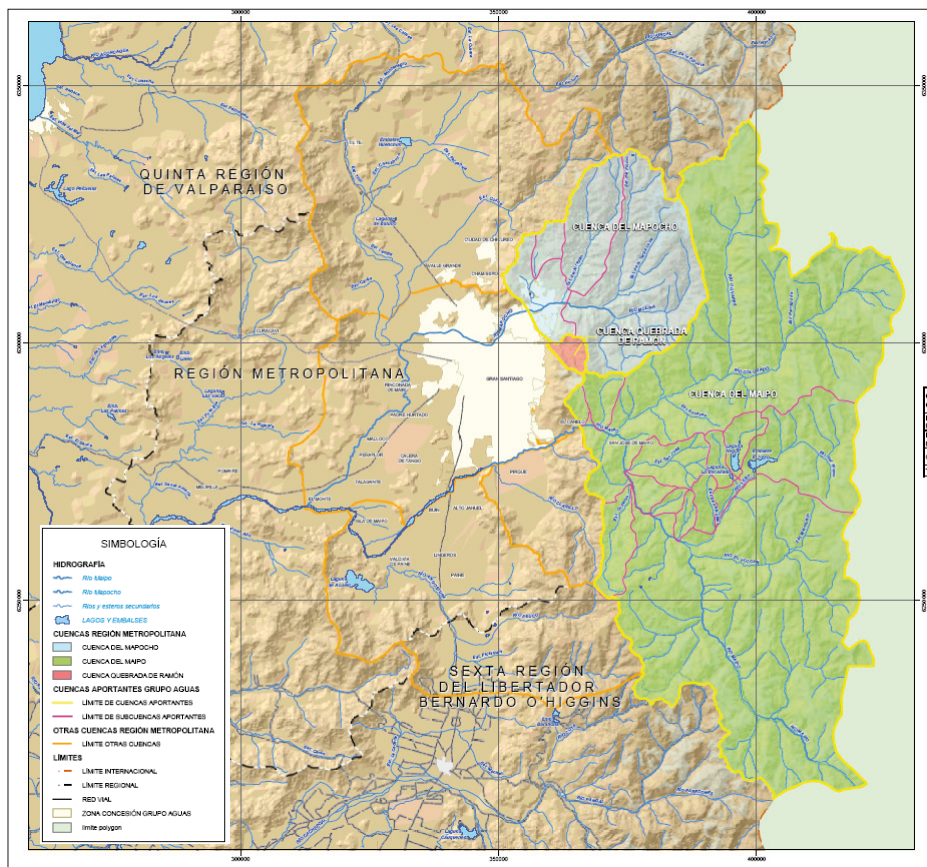


Figura 2. Cuencas hidrográficas del río Maipo y ríos tributarios (Aguas Andinas, 2010).

Durante los últimos años, la cuenca del río Maipo ha sufrido una serie de eventos climáticos fuera de los patrones normales seguidos en las décadas pasadas, que se pueden resumir en dos aspectos centrales:

- Desde el año 2009 y hasta la fecha existe una condición de sequía generalizada en la Zona Central de Chile, incluyendo la Región Metropolitana, que ha afectado de manera notoria a la agricultura y en menor medida al abastecimiento de la población, gracias a acciones de mitigación y redistribución de recursos superficiales y subterráneos.
- Se han producido incrementos inusuales de turbidez durante la estación de verano, con un impacto directo en la operación de plantas de producción de agua potable. Estos eventos tuvieron sus niveles máximos en enero y febre-

ro del año 2013, obligaron a operar las plantas de producción con caudales mínimos o nulos durante más de 30 horas y dejaron sin abastecimiento a más de 1 millón de clientes (4 millones de habitantes) alrededor de 24 horas.

Si bien eventos similares de este tipo han sido registrados anteriormente, su duración y frecuencia en los últimos años ha llamado la atención tanto de los responsables de la gestión de la empresa encargada del abastecimiento de agua potable como de investigadores de universidades y centros de investigación de Chile.

2.2 Antecedentes históricos de problemas asociados a eventos climáticos

De acuerdo con lo mencionado en el punto anterior, la Región Metropolitana de Santiago de Chile se ubica en una zona de clima templado, con un régimen de precipitaciones concentrado en un periodo acotado de meses, lo que la convierte en una zona altamente vulnerable a eventos de sequía. Por otra parte, se encuentra en una zona fuertemente influenciada por los fenómenos climáticos de variabilidad interanual como El Niño–Oscilación del Sur, asociados a las corrientes del océano Pacífico y que tradicionalmente han generado ciclos de eventos extremos de inundaciones y sequía, respectivamente (Montecinos y Aceituno, 2003).

Respecto a las precipitaciones anuales y su distribución anual, el periodo 2009-2013 muestra registros de precipitación por debajo de la precipitación media histórica en la Zona Central de Chile, con un gran impacto sobre los recursos hídricos superficiales. La figura 3 y la figura 4 muestran el registro de caudales medios anuales aforados en la estación Río Maipo en el Manzano y los registros de precipitación total anual registrados en la estación Terrazas de la DGA,² en las que se observan registros anuales inferiores a la media del periodo 1961-2013 durante los últimos cuatro años (periodo 2009-2013).

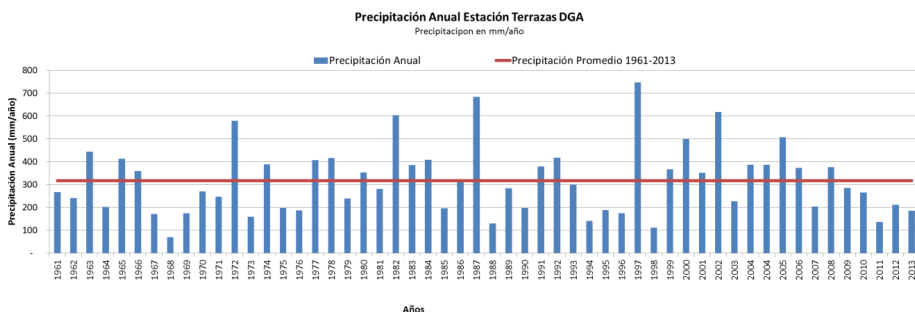


Figura 3. Precipitación anual en la estación Terrazas de la DGA (Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGA).

2 DGA: Dirección General de Aguas de Chile (www.dga.gob.cl).

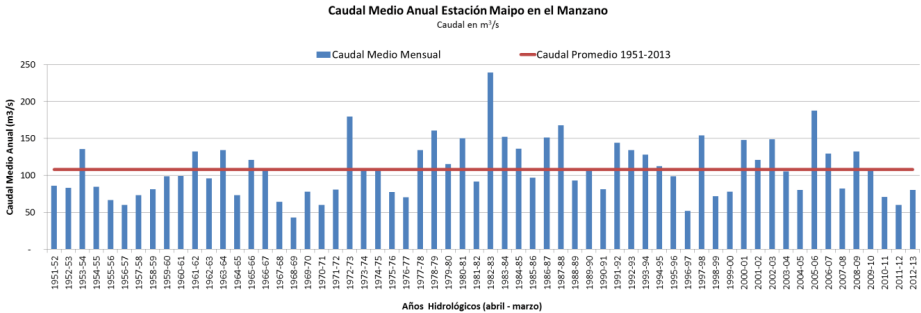


Figura 4. Caudal medio anual en la estación Río Maipo en el Manzano (Fuente: elaboración propia a partir de datos de la DGA).

La turbidez en el río Maipo corresponde a uno de los parámetros críticos en la operación de las plantas de abastecimiento de agua potable para el Gran Santiago, que, tal como se ha mencionado anteriormente, depende en un porcentaje significativo de recursos superficiales provenientes del río Maipo. Las plantas tienen un rango de operación hasta una turbidez de 5.000 UNT³ a partir de la cual se debe detener el proceso. Si bien valores superiores a este umbral han ocurrido históricamente, su frecuencia y duración se han visto incrementadas durante los últimos años, tal como se puede observar en la figura 5, que muestra la turbidez media en el río Maipo (medida en toma independiente) para el periodo de enero de 1990 a marzo de 2014. En esta figura se observan valores medios diarios por encima del umbral de las 5.000 UNT durante 1997-1998 y un incremento de estos episodios a partir del año 2008 y notoriamente a partir del 2012.

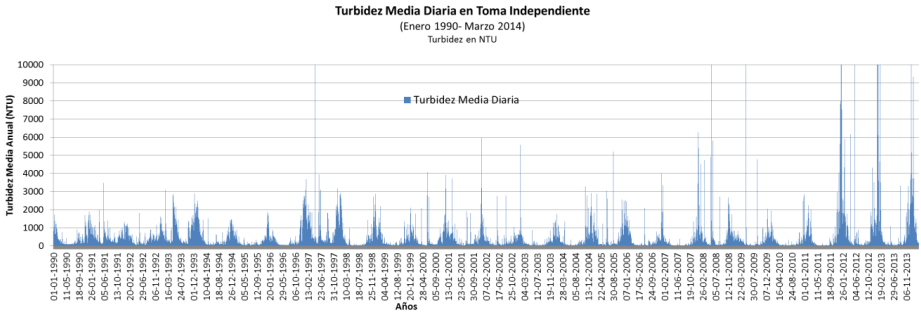


Figura 5. Turbidez media diaria en toma independiente en el río Maipo (Fuente: Aguas Andinas).

El incremento en los valores máximos se puede también observar en los valores máximos horarios registrados a partir del año 2008, año en

3 UNT: unidades nefelométricas de turbidez; corresponde a la medida estándar de turbidez en el agua.

el cual se observó el primer evento con niveles de turbidez que superaron los registros históricos conocidos hasta la fecha, provocaron los primeros cortes de suministro a la población y originaron una serie de estudios y actuaciones para mejorar la capacidad de respuesta de la infraestructura ante eventos de este tipo. Sin embargo, en los años siguientes este fenómeno se volvió más recurrente y se logró un nuevo registro histórico de turbidez en enero-febrero de 2013 en dos eventos que provocaron un nuevo corte de suministro de agua potable. El registro de turbidez máxima horaria del periodo enero-febrero de 2013 se muestra en la figura 6, donde se observan los registros máximos alcanzados el 21 de enero de 2013 y el 9 de febrero de 2013, con 160.000 UNT y 382.000 UNT, respectivamente.

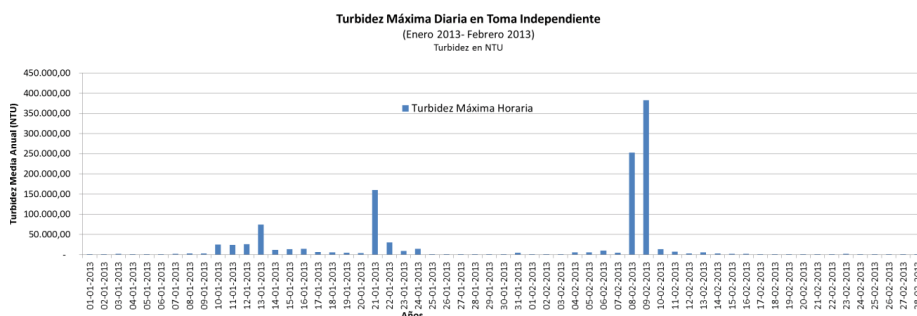


Figura 6. Turbidez máxima horaria en toma independiente en el río Maipo, de enero a Febrero de 2013 (Fuente: Aguas Andinas).

La explicación de las causas de estos fenómenos y la frecuencia con la que ocurrirán en el futuro es un tema actual de estudio tanto en el ámbito interno de la empresa como de entidades de investigación vinculadas a las universidades locales, en particular su vínculo con la tendencia global de cambio climático de origen antropogénico, cuyo principal efecto es el incremento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y que según estudios del IPCC⁴ (2007) ha incrementado la temperatura media en el planeta en 0,8 °C durante el siglo XX. En particular, para Chile hay evidencias de un calentamiento en el valle y un enfriamiento en los sectores costeros, en particular para la Zona Central (BID y Universidad de Chile, 2009).

Las proyecciones de escenarios futuros a finales del siglo XXI realizados para la Zona Central de Chile (BID y Universidad de Chile, 2009) indican un aumento sostenido de temperaturas de entre 2 y 3,5 °C en la tem-

4 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

peratura media mensual del aire cerca de la superficie respecto a una línea base considerando el periodo 1960-1990, y se observan los mayores valores en altitudes por encima de los 3.000 msnm durante los meses de verano austral (diciembre-marzo), un aumento en la temperatura del aire durante tormentas de invierno que causan mayor precipitación pluvial en sectores altos, una reducción de la precipitación media anual a valores del 75-90% respecto a la condición actual y, en consecuencia, una reducción de la escorrentía superficial en la Zona Central, en particular para los meses de enero a abril.

En resumen, el presente trabajo se enmarca dentro de un contexto de:

- Cambio climático con efectos adversos en los recursos hídricos en la Zona Central de Chile de acuerdo con estudios de escenarios futuros basados en los análisis del IPCC.
- Escenario actual de sequía producido por un periodo (2009-2013) de registros de precipitación anual inferior al promedio histórico con un impacto en los recursos hídricos superficiales de acuerdo con los registros de caudales recopilados.
- Incremento en la frecuencia de eventos de niveles extremos de turbidez en la cuenca del río Maipo, en particular para periodos de verano y con valores históricos medidos en enero y febrero de 2013.

3. ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS QUE AFECTAN A LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

3.1 Relación entre turbidez y caudal

Las series de caudal y turbidez en el río Maipo presentan una fuerte estacionalidad, con valores máximos en los meses de verano austral (diciembre-marzo) y valores en general bajos en otoño e invierno, todo ello asociado al régimen de deshielos que caracteriza a los ríos andinos en la Zona Central de Chile (Cortes, Vargas y McPhee, 2011). Existen además máximos de invierno que sobresalen a esta tendencia general, los cuales están asociados a tormentas pluviales y que son en general de corta duración (2-5 días). El comportamiento descrito se observa en la figura F7.

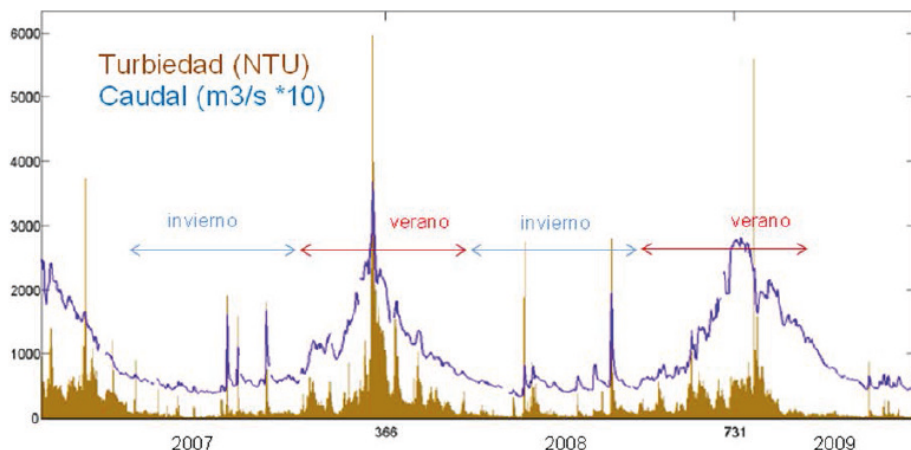


Figura 7. Series diarias de caudal (línea azul en $\text{m}^3/\text{s} \times 10$) en la estación Río Maipo en el Manzano y turbidez (barras marrón en NTU) en captación de toma independiente de Aguas Andinas.

No obstante la similitud estacional descrita, a nivel diario ambas variables exhiben una relación extremadamente no lineal, como se aprecia en la figura 8. Se puede observar que valores altos de turbidez (por encima de las 1.000 NTU) pueden ocurrir en todo el rango de valores diarios de caudal (entre 50 y $700 \text{ m}^3/\text{s}$), es decir, los eventos de alta turbidez que presenta el río Maipo no solamente ocurren en condiciones de alto caudal producto del arrastre y suspensión de sedimentos, sino también por la potencial inyección de altas cargas sedimentarias en condiciones de bajo caudal asociado a eventos aluvionales. Se observa además como las medianas mensuales para el trimestre diciembre-enero-febrero (verano) son en general las más altas.

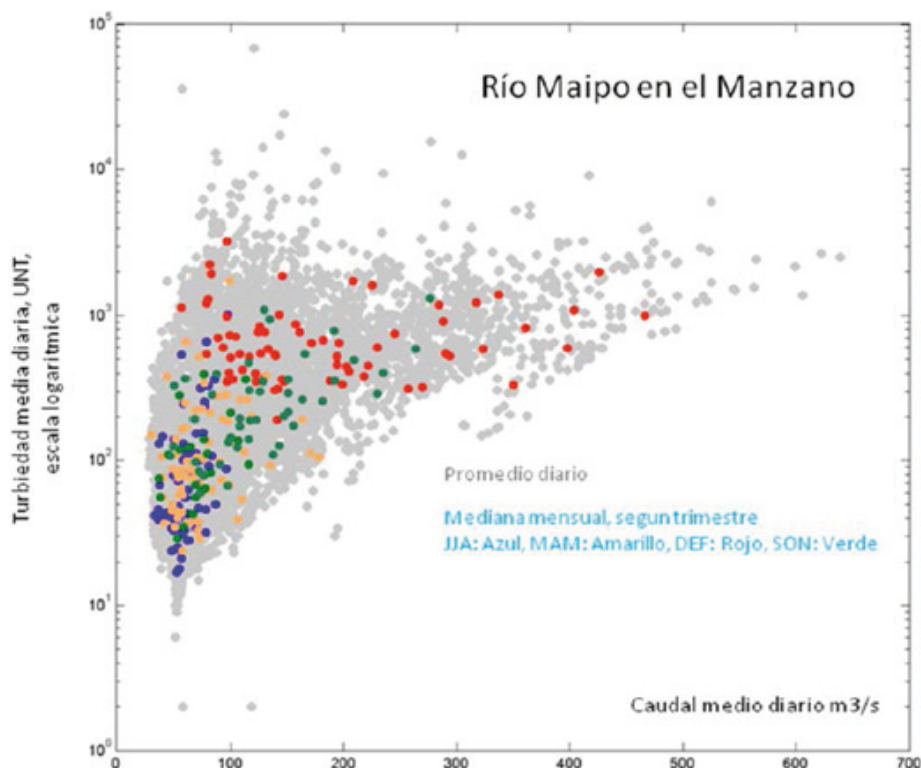


Figura 8. Diagrama de dispersión entre valores diarios de caudal en río Maipo en el Manzano y turbiedad en captación Toma Independiente de Aguas Andinas (círculos grises) para el periodo 1990-2013. Los círculos de colores corresponden a la mediana de cada estación del año.

3.2 Condiciones meteorológicas locales

En este apartado analizamos las condiciones meteorológicas que se asocian a los eventos de alta turbidez (EAT) en el río Maipo, comenzando con las condiciones de escala local. Para ello tomamos como ejemplo el verano 2007-2008. La figura 9 muestra las series de tiempo de turbidez (línea roja), caudal (línea azul), precipitación diaria en Lagunitas (cuenca del río Blanco, 2.700 m de altitud, barras grises) y temperatura del aire en el nivel de 700 hPa sobre la Zona Central de Chile (unos 3.000 m de altitud, línea verde). Superpuestos al ciclo estacional de caudal, temperatura y turbidez existen eventos en los que la turbidez aumenta, marcadamente asociados a un incremento de caudal simultáneo y a un aumento de la temperatura del aire uno o dos días antes. Un ejemplo de este tipo de eventos es el indicado con EAT1 el 2 de diciembre de 2007. En estos casos (identificados por una línea vertical color rojo), el marcado

calentamiento troposférico incrementa el deshielo, aumenta el caudal en el río y, a su vez, aumenta también el arrastre de sólidos en suspensión que incrementa la turbidez.

Sin embargo, existen otros EAT (como el EAT2, identificados por una línea vertical azul) que no van acompañados de un aumento de caudal ni temperatura, sino más bien de una disminución de estas variables. Estos eventos parecen vinculados a la ocurrencia de precipitación en cordillera, al menos registrada en la estación Lagunitas. El acercamiento de un sistema de baja presión a niveles medios de la atmósfera durante estos eventos explica un aumento de la nubosidad, el descenso o la conservación de la temperatura del aire y la eventual disminución del proceso de deshielo, el cual no alcanza a ser compensado por el aporte pluvial, y ello provoca una caída en los caudales. Sin embargo, la precipitación localizada y ocurrida en corto tiempo (de minutos a 2-3 horas) podría generar remociones en masa de diversa intensidad y aumentar por esta vía la turbidez en el río Maipo.

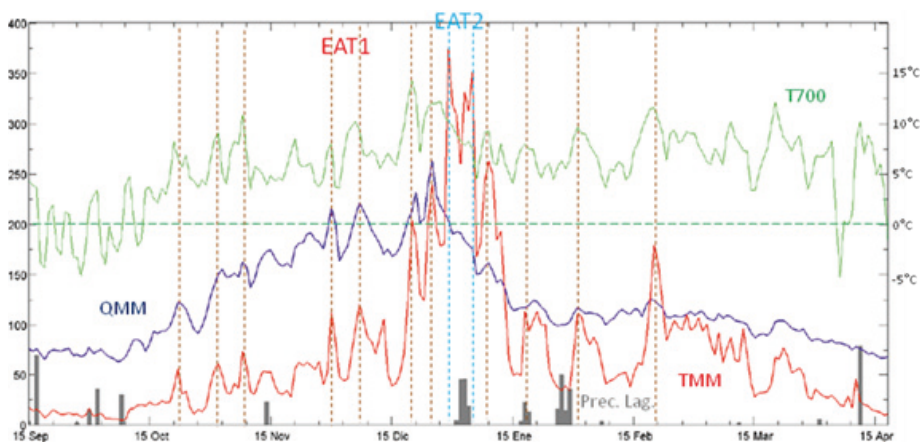


Figura 9. Series de tiempo diaria para el verano 2007-2008 del caudal (línea azul en m^3/s) y turbidez (línea roja, en NTU/100) en la estación Río Maipo en el Manzano, junto con la precipitación diaria en Lagunitas (cuenca del río Blanco, 2700 m de altitud, barras grises en $\text{mm} \cdot 20$) y temperatura del aire en el nivel de 700 hPa sobre la Zona Central de Chile (unos 3.000 m de altitud, línea verde).

Es posible estudiar cómo afectan las forzantes hidrometeorológicas temperatura y precipitación a los eventos de turbidez del río Maipo en el periodo estival, incorporándolas a un gráfico de anomalías (desviación con respecto al promedio estacional) de caudal y turbidez. En la figura F10, cada círculo corresponde a un día de verano de los años 2002, 2005, 2008 y 2010; además, son coloreados de acuerdo con la anomalía de

temperatura y se les agrega un punto si se registró precipitación. En la gráfica se observan dos grupos de eventos, los cuales son llamados en este estudio *térmico* y *pluvial*.

Los eventos térmicos se caracterizan por una buena relación lineal entre anomalías de caudal y turbidez, y tienden además a ser más cálidos aquellos días de mayor caudal y turbidez y más fríos aquellos de menor valor en ambos parámetros. Estos eventos de aumento de turbidez moderados serían entonces generados por un aumento de la temperatura que acelera el deshielo dentro de la cuenca y el transporte de sedimentos por este mecanismo.

Por otro lado, los eventos llamados pluviales son más extremos (nótese el cambio de escala vertical en la figura 10), no están asociados a aumentos de caudal marcados y tampoco ocurren necesariamente en días más cálidos. El acercamiento de un sistema de baja presión en estos eventos explica el descenso o la conservación de la temperatura del aire, la eventual disminución del proceso de deshielo y el aumento de la nubosidad, que genera precipitaciones. Las precipitaciones serían en la mayoría de los casos producidas por celdas convectivas ordinarias, que producen tasas de precipitaciones moderadas, en sectores muy puntales de la cordillera (especialmente en sectores más altos donde no existen estaciones), y en un corto periodo de tiempo (desde minutos hasta pocas horas). Este carácter convectivo y localizado de la precipitación no sería suficiente para producir un marcado aumento del caudal, pero sí generaría remociones en masa de diversa intensidad y aumentaría por esta vía la turbidez en el río.

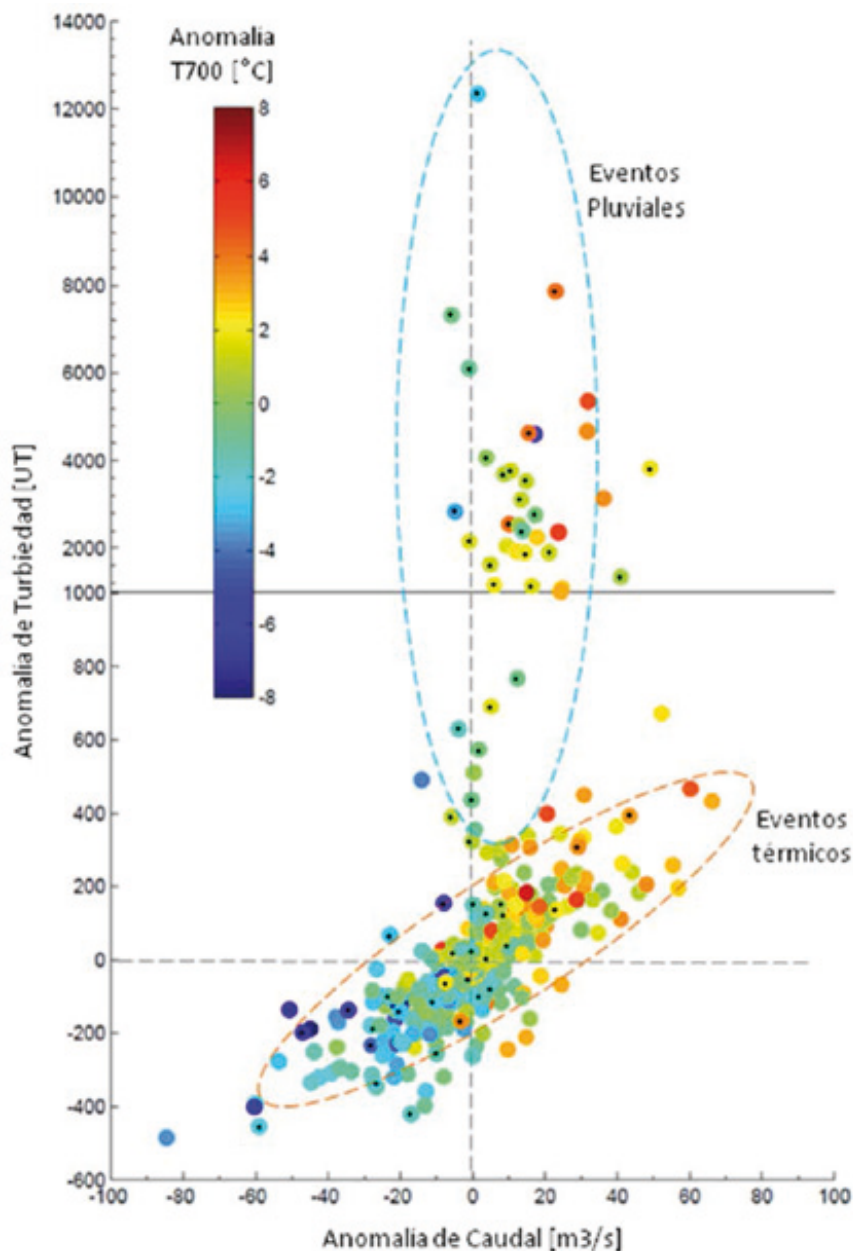


Figura 10. Diagrama de dispersión entre anomalías diarias de caudal en la estación Río Maipo en el Manzano y turbidez en captación de toma independiente de Aguas Andinas para los veranos de 2002, 2005, 2008 y 2010. Los círculos están coloreados de acuerdo con la anomalía de temperatura en el nivel 700 hPa (unos 3.000 m de altitud) y se les agrega un punto en caso de que se hubiese registrado precipitación en la estación Lagunitas (cuenca del río Blanco, a 2.700 msnm).

Son estos últimos eventos los que se desea estudiar, por cuanto generan los niveles más extremos de turbidez justamente en la época de mayor demanda de agua potable en los meses de verano.

3.3 Análisis sinóptico

Diversos trabajos (Viale y Garreaud, 2014; Garreaud y Rutllant, 1997) indican que la precipitación de verano sobre la cordillera de los Andes de la Zona Central de Chile ocurre preferentemente asociada a actividad convectiva, cuando parcelas de aire son elevadas por corrientes termales, potenciadas con bajas presiones y débiles vientos en niveles medios de la atmósfera, hasta su nivel de convección libre. Esta actividad tiene un marcado ciclo diario, con un máximo por la tarde, y puede dar lugar a lluvias intensas (1-10 mm/h) pero de corta duración.

Uno de los factores limitantes es la humedad (usualmente muy baja en el sector chileno). Sin embargo, la presencia de un centro de alta presión en el centro sur de Argentina genera un débil viento del este que es responsable de transportar aire húmedo y cálido, capaz de remontar sobre los Andes y finalmente alimentar las tormentas convectivas en la parte más alta de la cordillera que se proyectan hacia el sector chileno y causan las precipitaciones. La configuración sinóptica asociada se sintetiza en el modelo conceptual de la figura 11.

De acuerdo con lo anterior, una variable de especial interés para el pronóstico de precipitación convectiva (y potencialmente aluviones en el río Maipo) es la componente zonal del viento (U , este-oeste) sobre el tope de los Andes subtropicales. La relación no es lineal ni tampoco estricta (no todos los casos con viento desde el este $U < 0$ implican convección), pero aún así es útil como herramienta de análisis, pues a diferencia de otras variables meteorológicas (como la propia lluvia) el viento es una variable de gran escala de mejor predicción.

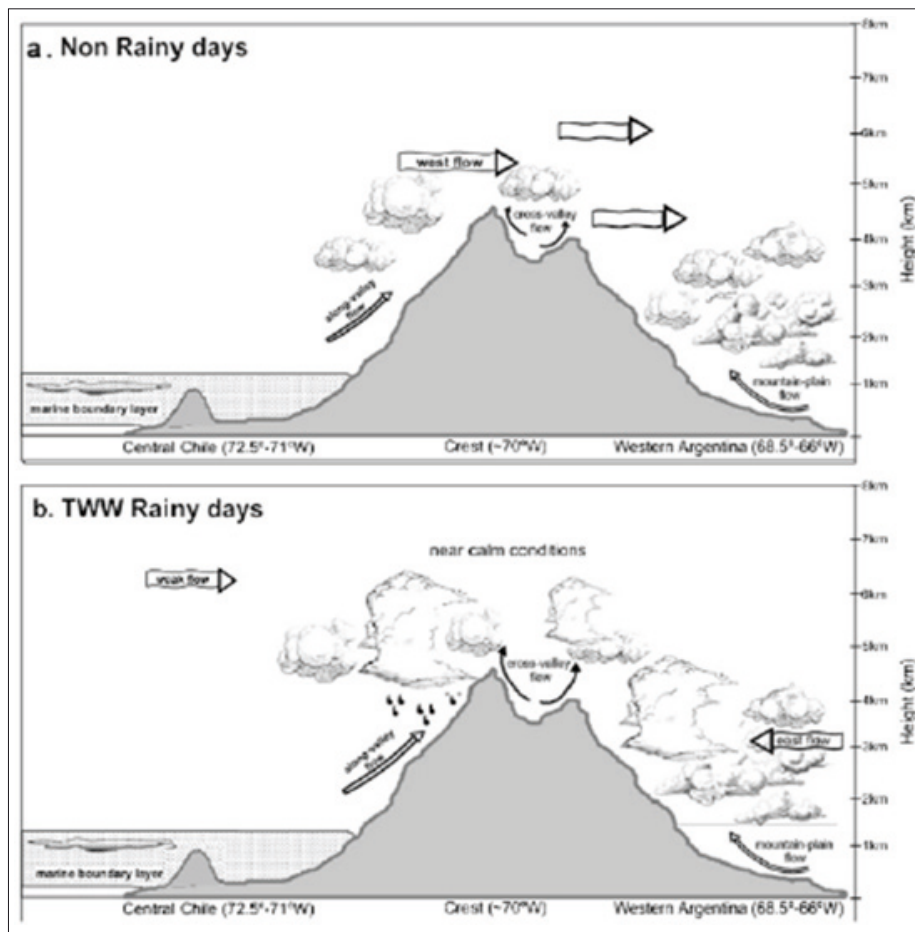


Figura 11. (a) Modelo conceptual de las condiciones medias de Flujo sobre los Andes subtropicales (latitud de Santiago, Chile). (b) Ídem para tormentas de verano con Flujo del este, predominantes en esta estación (Fuente: adaptación de Viale y Garreaud, 2014).

3.4 Descargas eléctricas como aproximación a la actividad convectiva

La condición localizada de la actividad convectiva impide a la actual red de pluviómetros detectar buena parte de estas precipitaciones. Sin embargo, puesto que la actividad convectiva está muchas veces asociada a descargas eléctricas, una alternativa es aprovechar los registros de la red WWLLN (World Wide Lightning Location Network, <http://www.wwlln.net>) para detectar dicha actividad convectiva en la zona de estudio. La red WWLLN está compuesta por más de 60 estaciones terrestres que registran radiación electromagnética y mediante triangulación permiten la localización espaciotemporal de las descargas.

En verano del año 2013 ocurrieron los mayores eventos de turbidez registrados en la serie del río Maipo. Los valores diarios de turbidez alcanzaron las 16.000 UNT el 21 de enero y las 65.000 UNT el 8 de febrero. Según un estudio (DICTUC, 2009), los valores instantáneos probablemente fueron 5-10 veces superiores al promedio diario, lo que enfatiza las extraordinarias concentraciones de sedimentos que afectaron a las captaciones de Aguas Andinas en el río Maipo.

La figura 12 muestra las series de tiempo de los valores medios diarios del caudal y turbidez en el río Maipo y la temperatura del aire sobre la Zona Central de Chile a 700 hPa, para el periodo de noviembre de 2012 a marzo de 2013. Al superponer a estas series los días en que se detectaron más de diez rayos sobre la cuenca de la estación Río Maipo en el Manzano (barras de color naranja), presumiblemente asociados a precipitación convectiva dentro de la región, se observa claramente la condición pluvial en ambos eventos, debido a la actividad eléctrica y la disminución de temperatura y caudal durante los mismos.

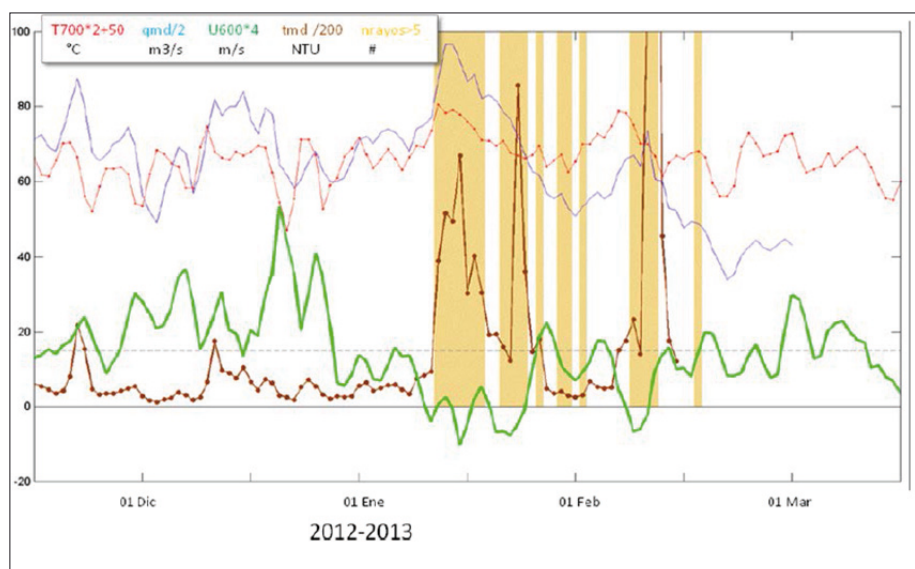


Figura 12. Series temporales diarias de caudal en la estación Río Maipo en el Manzano (línea azul), turbidez en captación de toma independiente de Aguas Andinas (línea café), temperatura en 700 hPa (línea roja) y viento zonal en 500 hPa (línea verde). Unidades y Factor de escala en cuadro superior. Las barras naranjas indican días con actividad eléctrica en la cuenca.

La figura 13 muestra la actividad eléctrica durante el evento de febrero de 2013. Cada punto corresponde a la ubicación de un rayo detectada por la red WLLN para los días 7, 8 y 9 de febrero. Se observa que los días 7

y 9 la mayoría de los rayos están en el sector argentino (condición usual), mientras que el día 8 hay una alta densidad de rayos en el sector chileno, coincidente con el día de máxima turbidez registrada.

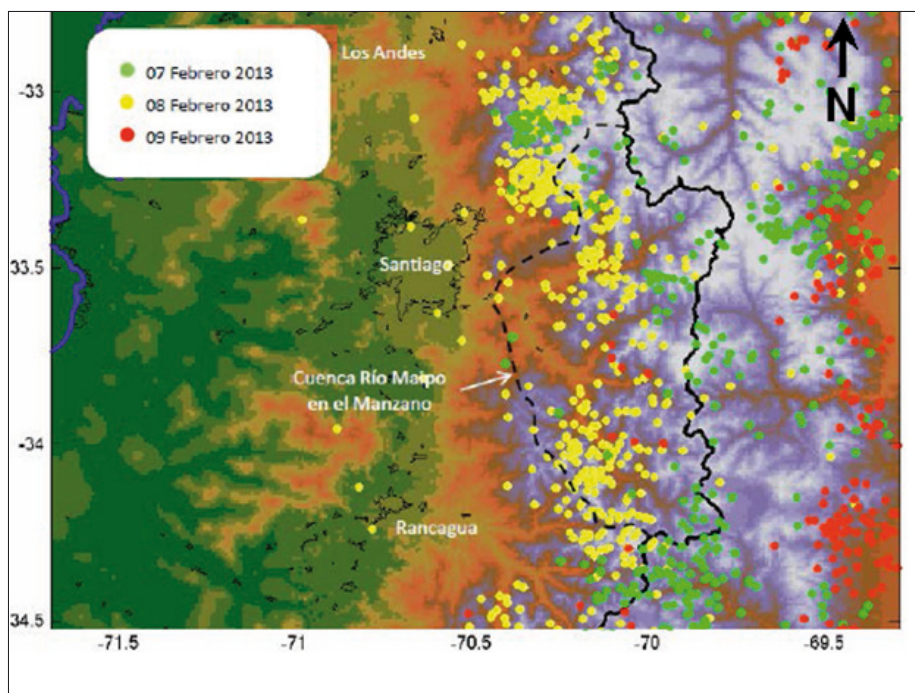


Figura 13. Ubicación de rayos detectados por la red WLLN para los días 7, 8 y 9 de febrero de 2013 superpuestos a un mapa topográfico. Se indica límite político y cuenca de la estación Río Maipo en el Manzano.

3.5 Perspectivas de eventos de alta turbidez en un clima cambiante

Se ha enfatizado en este documento que los eventos extremos de turbidez no ocurren necesariamente por el solo aumento de la temperatura, sino más bien por la ocurrencia de tormentas convectivas localizadas, que pueden generar remociones en masa en algún lugar de la cuenca del Maipo. Así, el aumento gradual de temperaturas que se espera para el resto de este siglo no implica por sí solo un aumento de eventos extremos de turbidez.

Una respuesta más contundente requiere determinar la tendencia en la ocurrencia de tormentas convectivas en la región. Sin embargo, debido a las dificultades inherentes a la modelización de este tipo de eventos de reducido tamaño, no es posible proyectar con claridad su tendencia mediante modelos numéricos. Por otro lado, aprovechando la asociación

estudiada entre tormentas de verano y días con viento zonal desde el este y dado que el viento es una variable de gran escala de mucha mejor representación en modelos globales y regionales de la atmósfera, es posible indirectamente conocer proyecciones sobre la actividad convectiva bajo escenarios de cambio climático.

La figura 14 muestra la diferencia de viento zonal medio para los meses de verano austral (diciembre, enero y febrero) entre finales de siglo y la actualidad, considerando un escenario de emisiones RCP8.5 (fuerte emisión de gases de efecto invernadero). Se observa que la Región Metropolitana está en una zona intermedia, por lo que no existe una señal clara que permita inferir un aumento o disminución de la actividad convectiva (y por consiguiente los eventos extremos de turbidez) sobre el río Maipo.

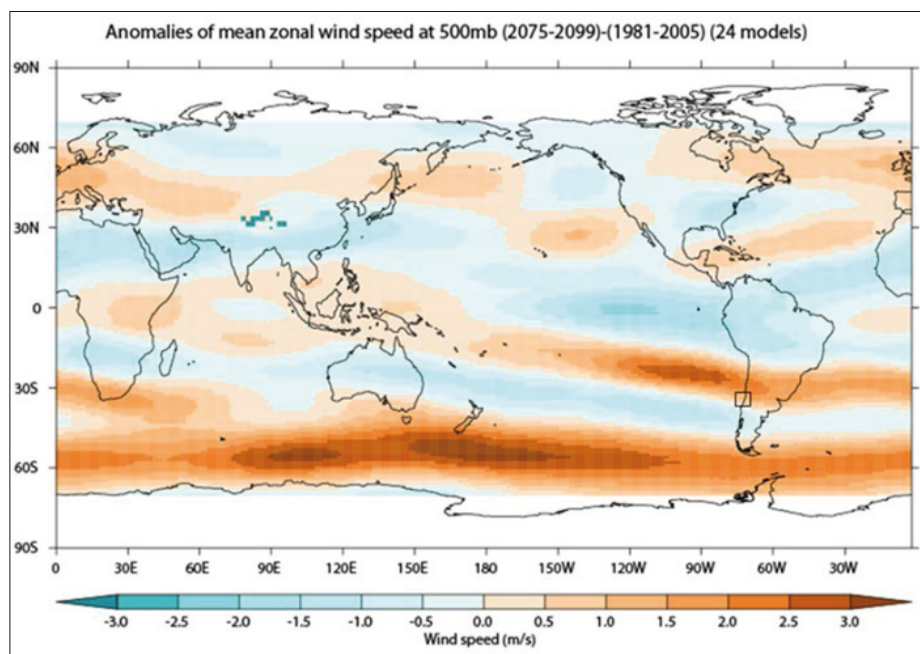


Figura 14. Diferencia entre el promedio del viento zonal en el nivel 500 hPa entre escenario Futuro (2075-2099 bajo escenario de emisiones RCP8.5, similar a la tasa actual) y condición actual (1981-2005) basándose en simulaciones CMIP5 realizadas para el quinto informe del IPCC 2013. La zona de interés se destaca con un cuadro negro.

3.6 Análisis y proyección de sequías

Otro fenómeno relevante en la gestión y el abastecimiento de agua en la región es la sequía. En los últimos cuatro años, la Zona Central de Chile se ha visto afectada por una disminución de las precipitaciones,

cuyos valores individuales no constituyen eventos extraordinarios por sí mismos, pero sí lo es la duración de la condición deficitaria. Al analizar la serie de la estación pluviométrica de Quinta Normal en Santiago de Chile de la figura 15REF, no se observan en los 150 años de estadística cuatro años seguidos bajo el 70% de la media histórica, aunque sí hay casos de tres años. Asimismo, la recurrencia de la condición de sequía de los últimos años se estima inicialmente entre 50 y 100 años.

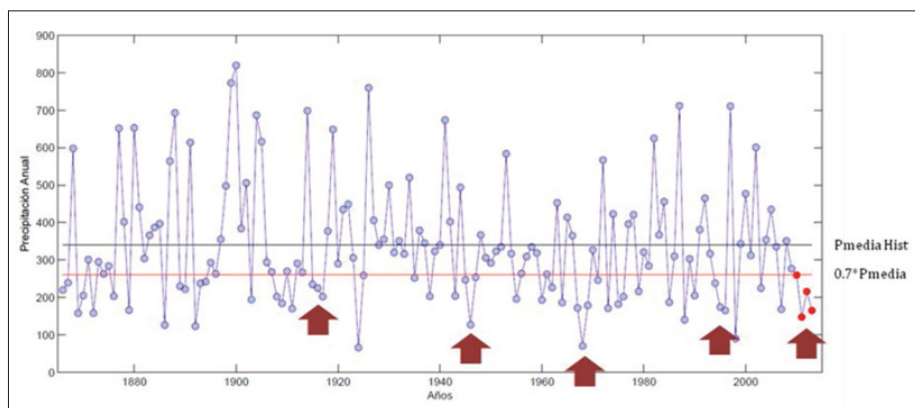


Figura 15. Serie anual de precipitación en la estación de Quinta Normal (Santiago, Chile).

Para analizar las perspectivas futuras de estos eventos, se ha considerado la serie de precipitaciones simuladas para la Zona Central de Chile (33°S 71°W) por los modelos globales del IPCC 2013, se han normalizado por sus respectivos promedios de largo plazo y se ha asumido un escenario de emisiones RCP8.5. La figura 16 refleja que los modelos muestran consenso en una disminución paulatina de la precipitación respecto al periodo histórico, cuyo promedio multimodelo es de un 10% en el futuro cercano (2000-2040) y de un 25% en el futuro lejano (2040-2080).

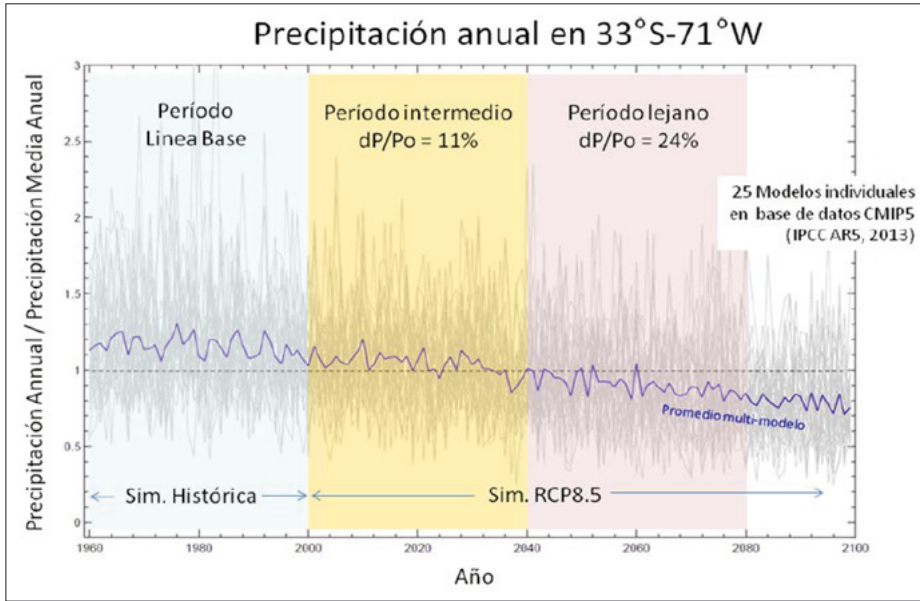


Figura 16. Series anuales de precipitación sobre la Zona Central de Chile, obtenidas de modelos CMIP5. La serie de cada modelo (gris) está normalizada por su promedio de largo plazo. La curva azul corresponde al promedio multimodelo.

Para estudiar el incremento esperado de eventos de sequía similares al actual, a cada periodo y modelo de la figura anterior se aplicó el siguiente procedimiento: 1) se asume condición estacionaria; 2) se ajusta una distribución gamma de dos parámetros a la precipitación (Pp) anual; 3) se genera una serie sintética de 1.000 años, y 4) se cuenta el número de sequías ($p \cdot P^*$, con $P^* = 0,7 P_p$ media histórica) y su duración en años.

La tabla 1 muestra los resultados expresados como el número de sequías de tres o más años en periodos de 1.000 años, que verifican que las simulaciones históricas entregan valores similares a los observados (de dos a cuatro sequías), número que se duplica en el futuro cercano y aumenta en más de siete veces en el futuro lejano.

Tabla 1. Número de sequías en 1.000 años en distintos periodos de tiempo, según modelos CMIP5 bajo escenario RCP8.5 y ajuste de distribución gamma para la generación de series sintéticas

Número de sequías en 100 años	1960-200	2000-2040	2048 2080
Número de años con sequía	96 ± 12	170 ± 18	320 ± 25
Número de sequías bi-anales	17 ± 4	34 ± 8	96 ± 15
Número de sequías de 3 o más años	3 ± 1	6 ± 2	21 ± 5

4. SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIONES EN MASA EN LADERAS DE LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

En el capítulo anterior se ha analizado la no linealidad en la relación entre el caudal y la turbidez media, lo cual indica que la alta turbidez no solo se puede presentar asociada a condiciones de alto caudal por arrastre de sedimento, sino también por eventos de remociones de masa comúnmente llamados *aluviones*

Los eventos de alta turbidez de enero y febrero del año 2013 en la cuenca del río Maipo, que además de provocar daños en infraestructuras y cortes de caminos tuvieron efectos sobre la población producto del cierre de las plantas de agua potable, hacen necesario un análisis de los fenómenos que los provocan para visualizar probabilidades de mayor ocurrencia a medio y largo plazo.

Las características de la cuenca del río Maipo hacen muy difícil llevar a cabo acciones preventivas frente a fenómenos de alta turbidez por efectos de la remoción en masa. No obstante, se visualiza la necesidad de efectuar un estudio de riesgos que involucre por un lado el análisis de la amenaza potencial (peligro) y, por el otro, el impacto que tendrá aguas abajo en la infraestructura y la población en general (vulnerabilidad). El peligro o peligrosidad está directamente relacionado con la probabilidad de ocurrencia del fenómeno en un área y tiempo determinados, así como con la capacidad de control y predicción que se tenga de dicho fenómeno.

Como una etapa previa al estudio de peligro de remociones en masa, suele ser útil identificar en una primera fase las zonas sensibles a la ocurrencia de amenazas. Para ello se estudia —y es lo que resume este capítulo— la susceptibilidad de remociones en masa en laderas de la cuenca del río Maipo, relacionada con la posibilidad de que una zona se vea afectada por un determinado proceso, expresada por lo general en grados cualitativos y relativos.

4.1 Marco teórico

El término *remoción en masa* se refiere a movimientos de laderas que ocurren pendiente abajo de un determinado volumen de suelo, rocas o combinación de ambos, en los cuales el factor gravedad está siempre presente. Estos movimientos de terreno se producen debido al debilitamiento progresivo de los materiales conjugado con condiciones geométricas de terreno (como por ejemplo altas pendientes) y que son en general desencadenados por seísmos, lluvias intensas y cam-

bios en la geometría natural del terreno (en forma natural o realizados por el hombre).

- **Factores condicionantes y factores desencadenantes**

De los distintos procesos de remoción que existen, es posible diferenciarlos por material movilizado, características del movimiento, si presentan o no control de estructuras geológicas o por el mecanismo de falla que predomina.

Cada uno de los tipos de remociones en masa señalados posee características propias, aunque existen factores relacionados con la naturaleza, la estructura y la composición del terreno que favorecen ambientes para que se generen los procesos de remoción. Estos factores, entre los que se pueden citar las pendientes y la topografía abrupta del terreno, la calidad de los materiales, el nivel de meteorización, la presencia o ausencia de vegetación, la presencia de agua y la existencia de intervención antrópica, entre otros, reciben el nombre de *factores condicionantes*.

De la misma forma, existen factores que han alterado o modifican la estabilidad preexistente del terreno, como pueden ser construcciones, caminos, cortes, seísmos y lluvias intensas, y que pueden ayudar a desencadenar un evento; se conocen como *factores desencadenantes*. En particular, el desencadenamiento de remociones en masa por causas meteorológicas y climáticas, que interesan sobre todo a efectos de este estudio, está relacionado fundamentalmente con la duración, la intensidad y la distribución de las precipitaciones y con el régimen climático. Asimismo, el mecanismo capaz de generar remociones se asocia a un aumento en el grado de saturación de los materiales y a un aumento temporal en la presión de fluidos, lo que provoca inestabilidad.

- **Remociones del tipo flujo**

En estudios de este tipo se puede estimar la susceptibilidad basándose en el inventario de los fenómenos registrados en una zona, que se independiza de la variable temporal y del cálculo de la probabilidad de ocurrencia, mediante una sumatoria de factores favorables a la generación del fenómeno. En este sentido, existen numerosos estudios, antecedentes históricos e información de prensa que dan cuenta de eventos de tipo flujo en la zona precordillerana y cordillerana de la Región Metropolitana, por lo que serán estos eventos los que concentren este estudio.

Las remociones tipo flujo se caracterizan por movimientos continuos donde las superficies de ruptura no son preservadas y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, que se compor-

tan de manera similar a un líquido viscoso de material saturado en agua (Varnes, 1978). Se pueden clasificar basándose en el tipo de material involucrado y en la cantidad de agua que presentan. Así entonces, es posible encontrar flujos de detritos, donde la mayor parte del material sólido corresponde a material particulado grueso; los flujos de tierra, donde el material corresponde a la fracción más fina de los suelos y no se encuentra saturado, y finalmente los flujos de barro, donde el material se compone principalmente de material fino y arena fina y se encuentra totalmente saturado.

Un análisis de los eventos de remociones de flujo en la zona pre-andina de la Región metropolitana efectuado por Hauser (1985) comprueba una evidente relación de tales remociones con precipitaciones intensas, más de 60 mm en 24 horas en invierno. El autor señala, en base a estimación realizada a partir de evento de 1980, que para el caso de lluvias de verano bastaría con 5 mm de agua caída/hora para gatillar eventos de flujo. Así también, precipitaciones de gran intensidad en un lapso corto de tiempo, como también precipitaciones de intensidad media en períodos prolongados de tiempo, pueden ser considerados como Factores Desencadenantes de flujo (Padilla, 2006).

4.2 Eventos de verano de 2013 en la cuenca del río Maipo

Según antecedentes consultados, los días 21 de enero y 8 de febrero de 2013 se generaron una serie de flujos de detritos encauzados por quebradas afluentes de los ríos Maipo y Volcán y en el estero San Alfonso (Moreiras y Sepúlveda, 2013).

De acuerdo con los informes (Moreiras y Sepúlveda, 2013; SERNAGEOMIN⁵, 2013), el desencadenante en ambos casos sería la precipitación intensa y muy localizada atribuida a las tormentas convectivas de verano, donde la masa húmeda del este sobrepasó los Andes e intensificó el comportamiento del anticiclón del Atlántico.

Sabida es la insuficiente información pluviométrica existente en la cordillera, lo que impide conocer con claridad la precipitación por hora que desencadenó dichos eventos. Según las estaciones disponibles en la Dirección General de Aguas, entidad dependiente del Ministerio de Obras Públicas, se registraron precipitaciones máximas de 11 mm/día para el 21 de enero (estación El Yeso) y 6,8 mm/día el 8 de febrero (estación San Gabriel) en la cuenca del Maipo. Información no confirmada en el sector

5 SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minas.

señalaría que dichas precipitaciones se habrían producido en un periodo corto de tiempo y podrían haber superado el valor de 5 mm/h de Hauser (1985) como factor desencadenante de generación de flujos. Cabe señalar, además, que el primer evento se habría generado por precipitaciones en un área mayor que la del segundo, con lo cual la precipitación acumulada en el sector en el corto periodo de tiempo transcurrido entre ambos eventos (saturación del suelo) habría influido en que se registrara remoción de flujo el día 8 de febrero (incidencia de fenómenos pluviométricos de 25 días, Padilla, 2006)..

Según antecedentes recabados, los eventos en las fechas señaladas no habrían sido únicos, sino que se habrían generado en varias quebradas principales y tributarias. En efecto, de acuerdo con los resultados de la inspección técnica realizada al área por el SERNAGEOMIN, el 21 de enero se habrían generado flujos en las quebradas de San Alfonso, El Manzano y El Volcán, tal como se observa en la figura 17. En la misma figura, además, se observan los flujos de detritos generados la noche del 8 de febrero y localizados en pequeños afluentes del río Colorado y en la ruta a las centrales Los Maitenes y Alfalfal. La lluvia en el valle del Colorado habría activado una serie de quebradas tributarias al río Maipo en un tramo de 14 km, medido desde la quebrada Aucayes hasta la desembocadura del río Colorado en el Maipo.

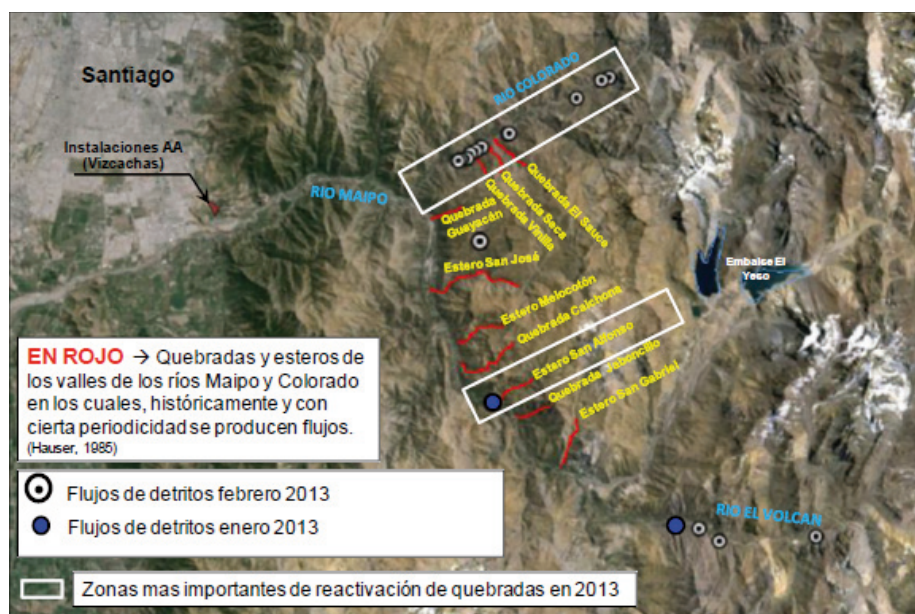


Figura 17. Remociones en masa ocurridas en enero y febrero de 2013 en el área de estudio más quebradas donde históricamente se han generado flujos (Fuente: elaboración propia UFSM).

A partir de estos antecedentes y los objetivos del presente estudio, el área de interés está centrada en el sureste de la ciudad de Santiago, que corresponde a la cuenca del río Maipo y sus afluentes principales, el río Colorado, el río Yeso y el río Volcán. El área mencionada se muestra en la figura 18 con polígono blanco.



Figura 18. Vista general del área de estudio (Fuente: elaboración propia a partir de imagen de Google Earth).

4.3 Metodología utilizada para determinar la susceptibilidad

La metodología aplicada en el presente estudio corresponde a la propuesta por Lara (2007), que permite determinar un índice de susceptibilidad (IS) basado en la suma de puntajes ponderados para distintos factores condicionantes. Los rangos y los valores de la metodología son definidos a partir de la importancia y la influencia en la ocurrencia de la remoción, y se obtiene un IS que varía entre 0 y 100% para cada unidad de análisis. Las zonas críticas de generación de remociones en masa serán aquellas unidades con IS mayor a 50.

El estudio de susceptibilidad en la zona de análisis ha considerado las tres etapas definidas en la metodología:

- Una primera etapa de gabinete destinada a la caracterización del área de estudio, basada en el análisis de información bibliográfica y estudios anteriores en el sector, que permite adicionalmente definir la escala de trabajo y el área específica por evaluar.
- Una segunda etapa de inspección de campo, orientada a caracterizar las unidades presentes en la zona de estudio, la cual se lleva a cabo a través de observaciones (geológica, geomorfológica, geotécnica, hidrológica, hidrogeológica, de vegetación y de descripción *in situ* de suelos y rocas).
- Una tercera etapa de evaluación de susceptibilidad, que consiste en la determinación de los valores de IS a través de la aplicación de tablas con factores condicionantes ponderados para distintas unidades de análisis, definidas basándose en criterios geológicos y geomorfológicos. La tabla 2 muestra los factores condicionantes y la ponderación máxima considerados para flujos.

Tabla 2. Factores condicionantes evaluados para susceptibilidad de flujos y ponderador máximo (Lara, 2007)

FACTOR		%
GEOMORFOLOGÍA	pendientes de laderas	35%
	pendiente canal de drenaje	
	encajamiento canal de drenaje	
	exposición al sol	
GEOLOGÍA-GEOTECNIA	características geológicas-geotécnicas del material	35%
	condiciones de humedad y saturación	
CLIMA-VEGETACIÓN	acumulación de nieve	10%
	cobertura vegetal	
ANTRÓPICO	obstrucción de canal de drenaje	10%
	desestabilización artificial de laderas	
ANTECEDENTES	aluviones declarados en la hoya	10%

A continuación se resume cada una de las etapas consideradas en la metodología planteada, poniendo el énfasis en el resultado de su aplicación.

4.3.1 Caracterización del área de estudio

Geomorfológicamente, el área de interés se caracteriza por pertenecer a la cordillera de los Andes, que en esta zona alcanza altitudes por encima de los 6.000 msnm. Se caracteriza por ser un relieve joven

y con cotas que decrecen hacia el oeste. Esta unidad aporta la mayor cantidad de material que rellena la depresión intermedia, el cual es transportado principalmente por los ríos Maipo y Mapocho. Las laderas que rodean los ríos Maipo, Yeso, Colorado y Volcán presentan alturas que bordean los 1.000 m, con pendientes de entre 30 y 50° y superando en ocasiones los 55°. En el lecho de los cauces actuales se presentan bajas pendientes (menores a 10°) constituidas mayoritariamente por depósitos fluviales y aluviales producto de actividad previa de los cauces (en algunos casos, aluviones anteriores).

La geología del área de estudio fue obtenida a partir de los estudios de Thiele (1985) y Fock (2005). En este, en términos generales se reconocen rocas volcánicas y sedimentarias clásticas estratificadas pertenecientes a las formaciones Abanico y Farellones (Cenozoico), las cuales se presentan fuertemente deformadas. Hacia el este se reconocen las formaciones Río Damas (secuencia continental y rocas volcánicas) y Colimapu (secuencia de rocas sedimentarias e intercalaciones volcánicas), ambas del Mesozoico. Además, se reconocen cuerpos intrusivos (principalmente granitos y granodioritas), siendo los más importantes La Gloria, San Gabriel (edad Mioceno Medio Superior) y La Obra (Mioceno Inferior). Dentro de los depósitos cuaternarios (aluviales y coluviales, entre otros) se destaca la presencia de remoción en masa en las principales quebradas de la zona de interés.

Hidrológicamente, la zona ha sido descrita en los capítulos anteriores donde el río Maipo en su alta cuenca tiene una hoya hidrográfica de casi 5.000 km², que nace en unos bofedales en las faldas del volcán Maipo y tiene los ríos Volcán, Yeso, Colorado y Olivares como sus tributarios principales (de sur a norte).

En lo que respecta a la hidrogeología, el mapa hidrogeológico de la DGA señala que solamente un acuífero se ubica en el sector cordillerano, específicamente en los ríos Volcán y Yeso. Esta reserva de aguas subterráneas, llamada acuífero de Santiago, se localiza desde la cordillera hasta las cercanías del poblado de Talagante, distante aproximadamente 120 km, con dimensiones cercanas a los 10.000 millones de metros cúbicos. Siguiendo el sentido de escurrimiento del río Maipo, otro acuífero se localiza en el sector del río Volcán, en el cual se junta con el río Maipo.

A partir de la caracterización del área de estudio y teniendo identificado que el tipo de remoción motivo de análisis en el presente trabajo son los detritos, en la tabla 3 se definen los siguientes factores condicionantes relevantes :

Tabla 3. Resumen de factores condicionantes relevantes para la zona de estudio

Factor Condicionante	Descripción
Geomorfología	Quebradas activas o en sectores de reactivación de remociones en masas previas
	Existencia de laderas de topografía abrupta
	Presencia de quebradas tributarias cortas, de alta pendiente, rectas y estrechas (o encajonadas).
	Incidencia de la exposición solar (especialmente laderas del valle orientadas según eje este-oeste).
	Presencia de vegetación en la ladera (diferenciando laderas con mayor o menor exposición al sol).
Geología / Geotécnica	Presencia de depósitos de tipo Remoción en Masa, especialmente en los cauces y bases de quebradas. Presencia de depósitos coluviales o materiales en condición de equilibrio límite.
	Sectores donde afloran depósitos volcanoclasticos de las formaciones Farellones, Abanico y Colimapu, las cuales se caracterizan en superficies por presentar altos grados de fracturamiento y/o alteración originando, en superficie, abundantes fragmentos de rocas.
	La presencia de minerales secundarios de alteración (por ejemplo las Zeolitas), las cuales contribuirán a acelerar la meteorización. La presencia de Zeolitas influye además en las propiedades geotécnicas del macizo rocoso, pues tienen propiedades de expansibilidad e hidratación, además de tener una baja resistencia.
	Sectores en los cuales las rocas de la Formación Abanico, han sido afectadas por procesos hidrotermales, lo que genera una mayor porosidad y una disminución en la resistencia final de la roca
Antecedentes	Presencia de depósitos o antecedentes de flujos ocurridos recientemente

En esta etapa se precisa definir los sectores en los que se aplicarán los factores condicionantes presentados. En este sentido, considerando la ubicación donde se han generado flujos en tiempo histórico y también los eventos del verano de 2013, se definió en este estudio la evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa de tipo flujo en el río Colorado, entre el sector de Los Maitenes (estero Aucayes) por el noreste y su desembocadura suroeste en el río Maipo. Por otro lado, la quebrada del estero San Alfonso muestra también cierta recurrencia en eventos de tipo flujo, por lo que también ha sido considerada como área de interés para evaluar la susceptibilidad. Ambas zonas se han denominado respectivamente zona 1 (río Colorado) y zona 2 (estero San Alfonso) y se muestran en la figura 17 destacadas en rectángulos.

Finalmente, se requiere la definición de las “unidades de análisis” y la escala de trabajo. En este sentido, considerando las zonas de análisis y la información disponible, se define la escala de trabajo 1:20.000. Res-

pecto a las unidades de análisis la metodología recomienda no superar las 150 unidades para cada zona a partir de criterios geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Las unidades de análisis deben compartir características comunes, como la pendiente promedio, materialidad, condiciones geomorfológicas (como por ejemplo orientación o tipo de unidad geomorfológica).

La figura 19 y la figura 20 muestran las unidades de análisis definidas para cada zona. Para el caso de la zona 1 (río Colorado), se definen 112 unidades de análisis (escala 1:20.000), entre las cuales destaca una diferenciación de unidades geomorfológicas de tipo quebradas, y laderas con distinta orientación y pendiente. En el caso de la zona 2 (estero San Alfonso) se definieron 71 unidades bajo criterios similares. Se destaca en ambos casos que el límite superior de las unidades de análisis queda definido a partir de máximas alturas, pendientes y divisoria de aguas.

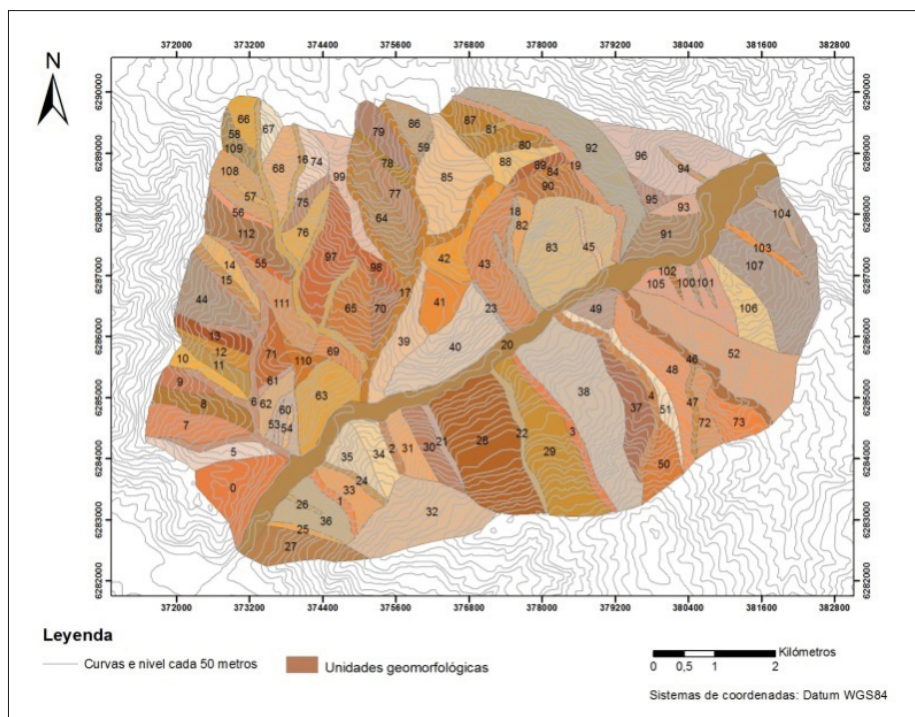


Figura 19. Unidades de análisis de la zona 1 (río Colorado), escala 1:20.000 (Fuente: elaboración propia).

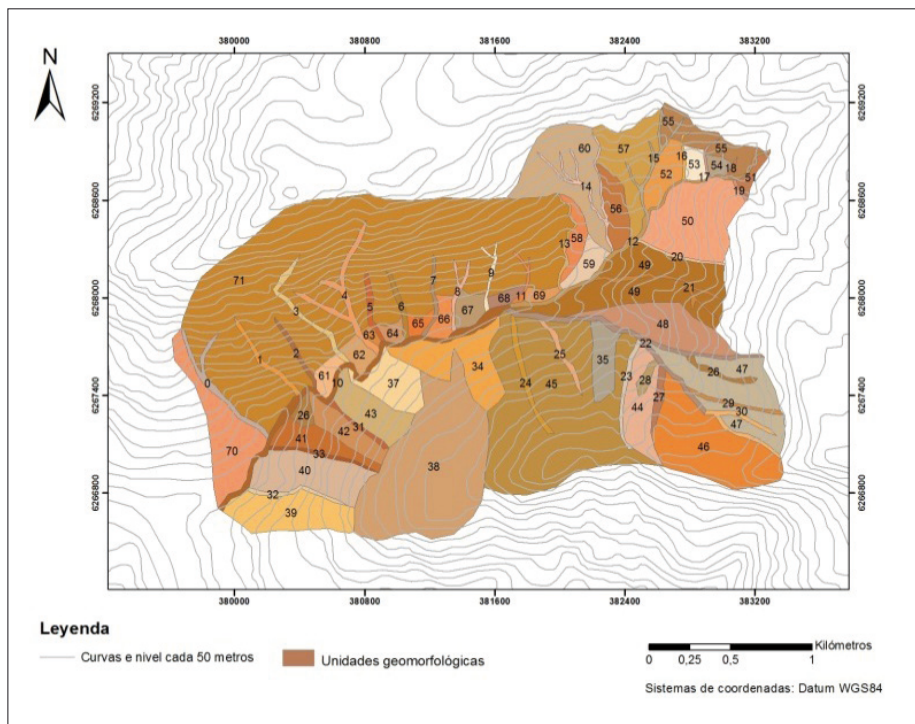


Figura 20. Unidades de análisis de la zona 2 (estero San Alfonso), escala 1:20,000 (Fuente: elaboración propia).

4.3.2 Inspección de campo

Para calcular el IS ante eventos tipo flujos en cada unidad de análisis definida se realizaron un total de cuatro jornadas de campo, con la finalidad de revisar los sectores afectados por las remociones en masa generadas en 2013, y recopilar los antecedentes que permitan asignar rangos a los distintos factores condicionantes.

Las visitas se realizaron por los caminos de acceso establecidos. En el caso de la zona 1 (río Colorado) el acceso fue por la ruta G-25, que va hacia la localidad de San José de Maipo, a partir de la cual se accede a la ruta G-345 (dirección noreste), que va paralela al cajón del río Colorado, por la ribera sur. Cabe señalar que en la zona 1 solo se cuenta con acceso público a las laderas y quebradas de la ribera sur del río Colorado, y no existe camino público por la ribera norte. Para acceder a la zona 2 (estero San Alfonso), se ingresa por la ruta G-25 hacia la localidad de San Alfonso, hasta la intersección con el estero San Alfonso. El acceso a la zona de análisis se realiza a pie por la quebrada, hasta el punto en que la escarpada morfo-

logía lo permite. En ambos casos, los sectores no visitados por problemas de accesibilidad se analizaron mediante fotografías aéreas y observaciones con binoculares.

En términos generales, se observaron depósitos irregulares, dispuestos en los pies de las quebradas tributarias en forma de abanicos aluviales, en los fondos de cauces profundos o en las riberas de los cauces principales (río Colorado y estero San Alfonso) depositados por los eventos del año 2013, y algunos eventos históricos (ver figura 21).



Figura 21. Vista de depósitos de remoción en masa en las riberas del río Colorado (Fuente: registro fotográfico de la visita de campo en marzo de 2014).

Geomorfológicamente, las quebradas tributarias visitadas se caracterizan por ser cortas (menos de 3 kilómetros por la ribera sur), rectas y encajonadas, con una relación profundidad / ancho del canal mayores a 0,7, considerado como alto encajonamiento, un ejemplo de este tipo de quebradas se puede apreciar en la Figura 22.

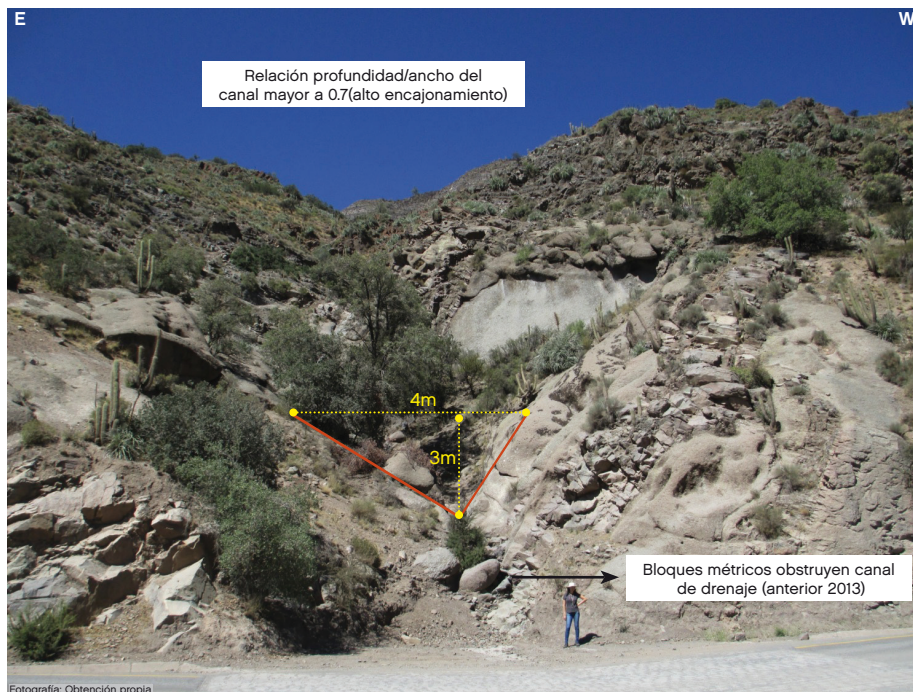


Figura 22. Vista de depósitos de remoción en masa en quebradas tributarias al río Colorado (Fuente: registro Fotográfico de la visita de campo en marzo de 2014).

4.3.3 Evaluación de susceptibilidad

Para la evaluación de la susceptibilidad en ambas zonas de estudio se procedió, para cada unidad de análisis, a la aplicación directa de la metodología adoptada. Los rangos asignados para cada factor condicionante por unidad fueron obtenidos a partir de observaciones de campo, antecedentes bibliográficos, modelos de pendientes construidos y experiencia de los autores en el tema.

Se determinó un IS para las distintas unidades de análisis y los valores obtenidos se graficaron utilizando sistemas de información geográfica (SIG), cuyos resultados se muestran en la figura 23 y en la figura 24. Los rangos graficados se basan en la metodología propuesta (IS entre 0 y 24, baja susceptibilidad; IS de 25 a 49, susceptibilidad media; IS de 50 a 74, susceptibilidad alta, e IS > 75, muy alta susceptibilidad).

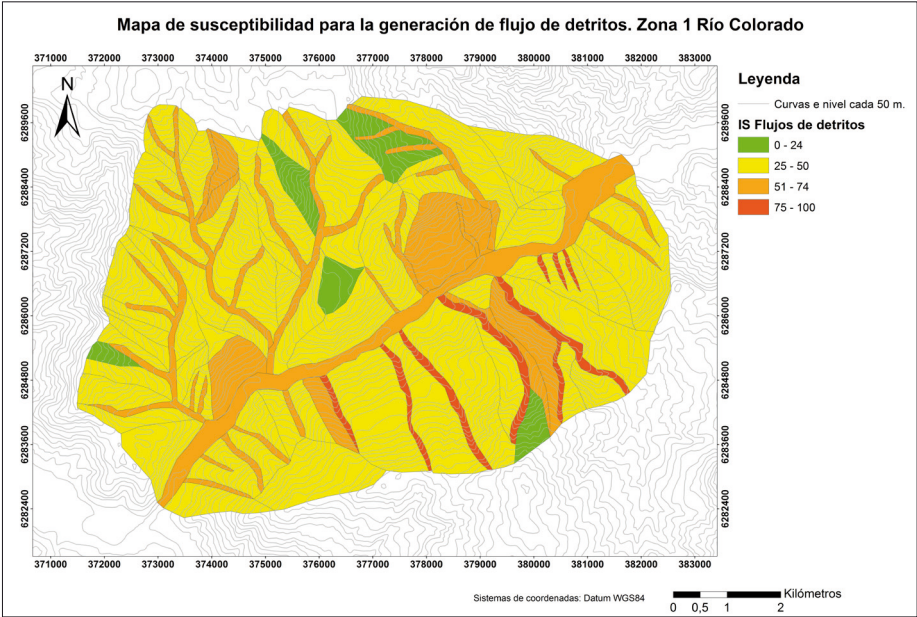


Figura 23. Mapa de susceptibilidad para la generación de Flujo de detritos. Zona 1, río Colorado (Fuente: elaboración propia).

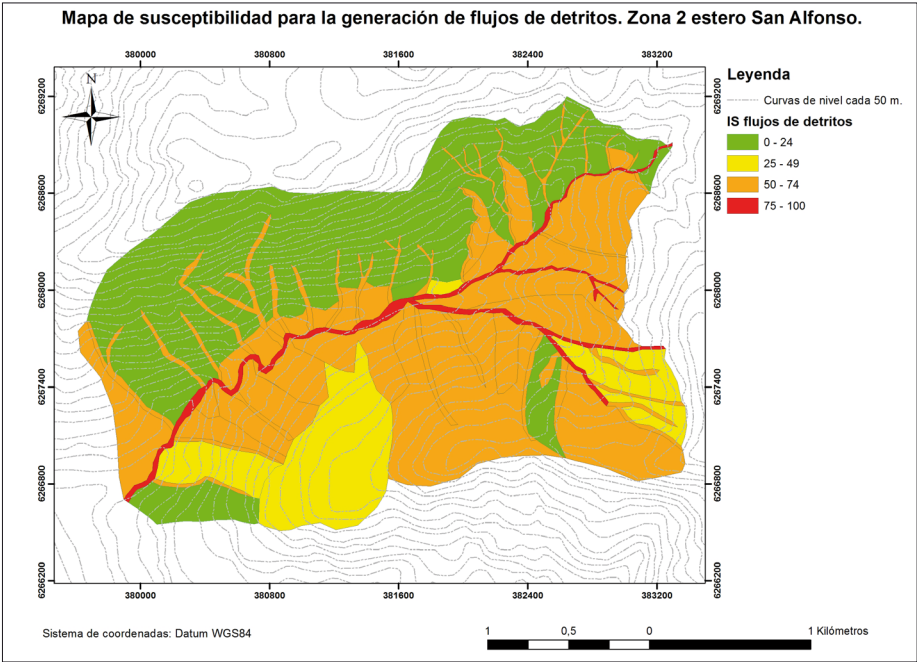


Figura 24. Mapa de susceptibilidad para la generación de Flujo de detritos. Zona 2, estero San Alfonso (Fuente: elaboración propia).

4.4 Resultados de zonificación para las zonas en estudio

Los resultados arrojan mapas de zonificación (para ambos sectores) donde se reconocen unidades con IS variable entre 0 y 25, baja susceptibilidad (color verde en mapas), y de 50 a 100, de alta a muy alta susceptibilidad (colores anaranjados y rojos en mapas).

En la zona 1 (río Colorado), las unidades con mayores IS se ubican en las quebradas tributarias del río Colorado. De un total de 112 unidades analizadas, 26 presentan alta y muy alta susceptibilidad ($IS > 50$). Los mayores valores de IS se reconocen en las quebradas ubicadas en la ladera sur del cauce principal (por ejemplo, las quebradas Vinila, Seca y El Sauce, entre otras), con valores superiores al 76%.

En menor medida se reconocen laderas altamente susceptibles a generar flujos, aportando material disgregado, correspondientes a depósitos coluviales superficiales, y en los cuales se identifican además otro tipo de remociones en masa (tipo deslizamientos y caídas de rocas).

En la zona 2 (estero San Alfonso), de un total de 71 unidades, 59 presentan alta y muy alta susceptibilidad ($IS > 50$). Las unidades con mayores IS corresponden al cauce principal, y destacan además un número importante de laderas y quebradas tributarias altamente susceptibles. Los resultados muestran una tendencia general a tener baja susceptibilidad en las laderas al norte del estero San Alfonso, lo que por una parte concuerda con la asimetría de las laderas de los valles de orientación este-oeste. Además, se identifica un área importante con baja susceptibilidad, puesto que el material dominante en la superficie corresponde a roca, con escasa cantidad de coluvios o material disgregado que pueda ser movilizado.

En definitiva, los valores obtenidos en el presente estudio para los índices de susceptibilidad estarían indicando que los eventos de alta turbidez que históricamente se han producido en la cuenca del Maipo seguramente continuarán ocurriendo. La probabilidad de mayor o menor ocurrencia de ellos presenta una relación directa con los factores desencadenantes como son la intensidad de la precipitación y la precipitación acumulada, con origen en tormentas de invierno y verano.

Aún más, la identificación de los factores condicionantes y desencadenantes en sí no es suficiente para la vinculación directa con los altos niveles de turbidez, no solo por el requerimiento de datos que permitan desarrollar un modelo fiable con capacidad predictiva en el tiempo o por la actualización permanente de la información de ciertos factores geomorfológicos (una

mirada estática/dinámica del problema), sino también porque se requiere un enfoque sistémico del mismo.

Finalmente, convendría señalar que los registros históricos, así como los últimos eventos ocurridos, permiten observar que los flujos se generan en toda la zona precordillerana y cordillerana de la Zona Central de Chile. Sin embargo, los lugares específicos de generación de los eventos son locales, especialmente asociados a quebradas tributarias cortas, empinadas y rectas, cauces principales estrechos y laderas empinadas con material disponible.

Basándose en lo anterior, resulta válido determinar la existencia de zonas más susceptibles que otras a través de la ponderación de factores condicionantes. La aplicación de la metodología en los sectores de análisis (zona 1, valle del río Colorado entre el Maipo y el estero Aucayes, de 65 km², y zona 2, estero San Alfonso, de 7 km²) permite comprobar la existencia de unidades geomorfológicas y sectores con alta susceptibilidad a la generación de flujos ($IS > 50$), los cuales se encuentran mayoritariamente en las quebradas tributarias cortas y encajonadas de los ríos principales, especialmente aquellas con orientación norte (al sur de la ribera), y en menor medida las laderas con coluvios disponibles o material de remociones históricas. Comparativamente se reconoce mayor número de unidades susceptibles en el estero San Alfonso (zona 2). Lo anterior se atribuye a las características geomorfológicas que presenta el valle, siendo a su vez una quebrada angosta y estrecha.

4.5 Análisis preliminar de vinculación de la remoción en masas con la turbidez

La determinación de zonas sensibles a la ocurrencia de amenazas, mediante el índice de susceptibilidad (IS), como parte de la identificación de los factores condicionantes asociados a eventos de alta turbidez, es uno de los primeros pasos necesarios para vincular la turbidez en los cursos de agua superficial que alimentan las instalaciones de la planta de tratamiento. Por supuesto, se requiere también la identificación de los factores desencadenantes como la intensidad de la precipitación y la precipitación acumulada. En cuanto a la zona de estudio particularmente, es necesario entender y predecir el desarrollo de tormentas convectivas generadas en época estival en la parte alta cordillerana de la cuenca del Maipo como uno de los factores predominantes recientemente identificados en el capítulo 3 del presente estudio.

No obstante lo anterior, esta identificación de factores condicionantes y desencadenantes en sí no es suficiente para predecir la vinculación directa con los altos niveles de turbidez. Esto requiere una vinculación, a través de una adecuada

identificación de los volúmenes potenciales de remoción en las laderas previos al evento y su granulometría, la identificación de depósitos existentes en las riberas de los cauces y su granulometría, mejores mediciones de precipitación, caudal y transporte de sedimentos y, evidentemente, de la turbidez, entre otros, dentro del marco temporal propio de cada tipo de parámetro.

Sin embargo, a modo de focalización del problema y preludio de los cursos de acción, es posible efectuar un análisis de algunos factores o parámetros, que sobre una base ingenieril razonable puedan ser desarrollados, tales como:

- Estimación de la velocidad de transporte y el tiempo de llegada de un evento de remoción de masas.
- Identificación de correlaciones entre la turbiedad y otras variables del fenómeno;
- Definición de una función de transferencia entre los factores condicionantes y desencadenantes.

A continuación se desarrollan los parámetros indicados en el párrafo precedente.

4.5.1 Estimación de la velocidad de transporte y el tiempo de llegada de un evento de remoción de masas

El método utilizado es el de Jacobson (USGS, 1996), que permite la determinación de la velocidad máxima probable de transporte en ríos, usando tan sólo información geomorfológica a nivel global y fluviométrica medida en alguna estación cercana a la zona de interés.

$$V_{mp} = 0,25 + 0,02 \times (D'_a)^{0,919} \times (Q'_a)^{-0,469} \times S^{0,159} \times \frac{Q}{D_a}$$

$$D'_a = \frac{D_a^{1,25} \times \sqrt{g}}{Q_a} \quad Q'_a = \frac{Q}{Q_a}$$

Dónde:

V_{mp}: Velocidad máxima probable, en m/seg

D_a: Área de la cuenca, m²

G: aceleración de gravedad, m/s²

Q_a: Caudal medio anual, m³/s

Q: Caudal al momento del pronóstico, m³/s

S: Pendiente media de la cuenca, m/m

Para nuestro caso de estudio (figura 25), asociado a los eventos ocurridos en el sector de la quebrada Vinila y del estero San Alfonso, se utiliza la información de las siguientes estaciones fluviométricas:

- Río Colorado antes junta Maipo
- Río Maipo en el Manzano
- Río Maipo en San Alfonso

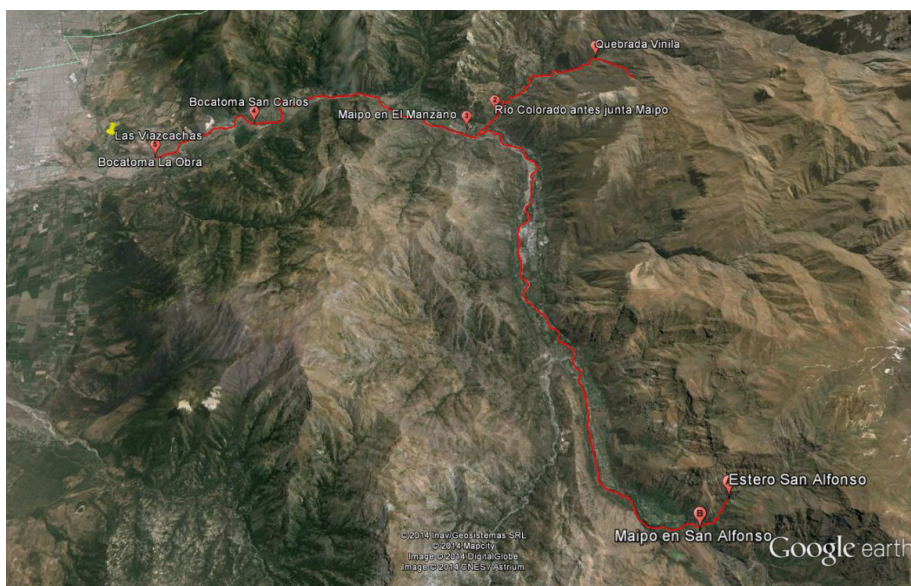


Figura 25. Zona de estudio de la velocidad de transporte: zona 1, río Colorado / zona 2, estero San Alfonso (Fuente: elaboración propia).

Los valores de caudales en puntos intermedios se obtienen mediante transposición de caudales basándose en el área de drenaje, considerando la similitud geomorfológica entre cuencas, y las distancias recorridas por los cauces son obtenidas de Google Earth. Con toda esa información es posible determinar la velocidad máxima probable y los tiempos de llegada postevento, donde las velocidades de transporte máximas son del orden de los 2,2 m/s para tramos del río Maipo, acorde con valores esperados, que dependen del caudal supuesto para los cauces definidos.

Los tiempos de llegada se muestran en la figura 26 y en la figura 27, donde se observa que estos son del orden de 3,8 horas y 5,5 horas para las zonas 1 y 2, respectivamente.

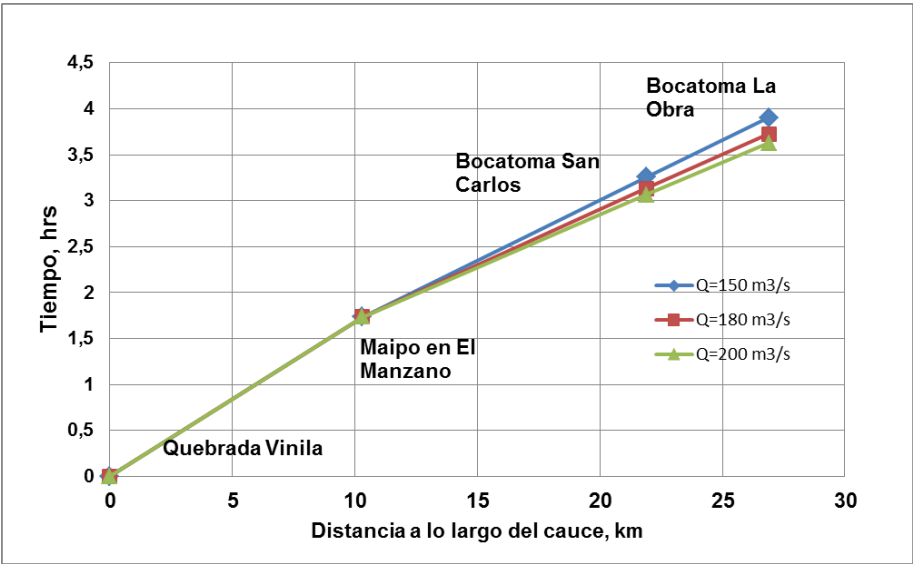


Figura 26. Estimación del tiempo de llegada de caudal con alta turbidez a la planta en la zona 1 (Fuente: elaboración propia).

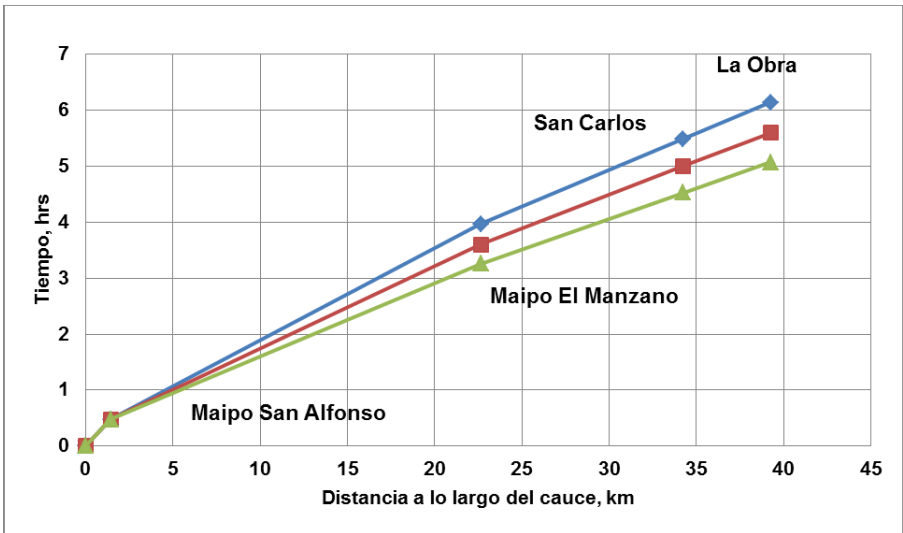


Figura 27. Estimación del tiempo de llegada de caudal con alta turbidez a la planta en la zona 2 (Fuente: elaboración propia).

Si bien es cierto que la expresión utilizada no fue desarrollada para grandes eventos de remoción en masa, puesto que el fluido cambia sus propiedades, sí sería aplicable como una aproximación para eventos de alta turbidez, considerando que es muy utilizada para el cálculo de la dispersión de contaminantes.

4.5.2 Análisis espectral de turbidez

Una de las dificultades para el pronóstico de eventos de altos niveles de turbidez viene representada por la no correlación entre turbidez y caudal. En el presente estudio se evaluó la posibilidad de efectuar algún tipo de pronóstico recurriendo al análisis espectral wavelet (espectro de potencia y espectro cruzado), considerando que el caudal es una variable predecible con buen nivel de confianza.

Como se puede observar en el espectro caudal-turbidez (figura 28REF), no es posible identificar ningún patrón representativo, indicativo de alguna recurrencia de alta correlación entre ambas variables a lo largo del periodo de medición. Por el contrario, se observa una distribución de potencias totalmente aleatoria, con potencias elevadas distribuidas por todo el rango de escalas y ventana temporal. Ello confirma lo observado mediante las inspecciones estadísticas: la relación entre las variables es altamente no lineal y determinar algún tipo de modelo de predicción no es trivial. Lo anterior apunta a pensar en un modelo que incorpore la caracterización física de los procesos involucrados, tanto respecto a los sedimentos que producen la turbidez como respecto a la hidrología de la zona y sus forzantes atmosféricas, y desde luego alguna función de transferencia entre los fenómenos.

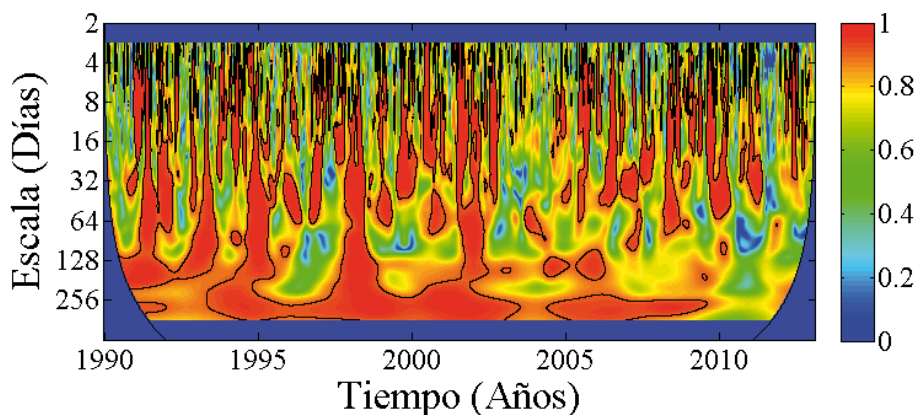


Figura 28. Espectro cruzado caudal-turbidez (Fuente: elaboración propia).

4.5.3 Prospectiva: Función de transferencia entre los Factores condicionantes y desencadenantes

En la década de los años cuarenta, derivado de una serie de análisis de datos de erosión del suelo de estaciones instaladas a principios de 1930 en los Estados Unidos, se determinó una ecuación para la pérdida de suelo asociada a diversos factores geomorfológicos y climáticos, denominada *ecuación universal de pérdida de suelo* (USLE, acrónimo de Universal Soil Loss Equation), que se indica a continuación:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde:

A: pérdida de suelo por unidad de superficie

R: factor asociado a la cantidad de la lluvia

K: factor de erosión del suelo

L: factor de longitud de la pendiente

S: factor de gradiente de la pendiente

C: factor de uso y gestión de suelos

P: factor práctico de control de erosión

Esta ecuación ha evolucionado con el tiempo (RUSLE, MUSLE), conforme a diversas modificaciones relativas a su propósito y la determinación de los factores asociados.

Por ejemplo, la RUSLE, que es la USLE revisada, mantiene su propósito original incorporando nuevos aspectos tales como procesos de heladas, nuevos subfactores de cálculo y nuevas consideraciones de prácticas agrícolas.

La MUSLE (USLE modificada) está orientada a determinar el aporte de sedimento para un evento singular, y su expresión es la siguiente:

$$A = 11.80 (V_o Q_p)^{0.56} KLSCP$$

Donde:

A: cantidad de sedimentos que se producen durante una tormenta singular, en toneladas métricas, t

V_o : volumen de escorrentía, en m^3

Q_p : caudal instantáneo máximo, en m^3/s

KLSCP: resto de factores que se utilizan para la USLE

La importancia de esta ecuación, respecto al tema de estudio, es la potencial vinculación entre los factores condicionantes (principalmente de tipo geomorfológico), considerando que se cuenta con un indicador representativo de tal situación denominado índice de susceptibilidad (IS), y los factores desencadenantes (meteorológicos).

5. IMPACTO EN LA GESTIÓN DE LOS ABASTECIMIENTOS HUMANOS DE AGUA POR ALTOS NIVELES DE TURBIDEZ Y SEQUÍA EN CUENCA

5.1 Análisis de ocurrencia de estos impactos y su evolución a medio y largo plazo

La estadística histórica muestra que los fenómenos de sequía y alta turbidez son cíclicos y forman parte de la condición hidrometeorológica de la cuenca. Sin embargo, en los últimos años ambos fenómenos han tenido comportamientos excepcionales, asociados a una mayor duración de la condición deficitaria (sequía) y a un aumento en la frecuencia de eventos extremos (turbidez). Ambos fenómenos impactan directamente en los ríos y los esteros, principales fuentes de suministro de agua potable para la Región Metropolitana de Santiago.

Respecto a la condición deficitaria, si bien la actual sequía por la que atraviesa la cuenca es un evento claramente excepcional, todas las predicciones indican una tendencia a una disminución paulatina de las precipitaciones, situación que implica un aumento en la frecuencia de este tipo de fenómenos deficitarios. En el punto anterior se indicó que bajo condiciones asociadas al cambio climático, para los próximos 30 años se estima que los eventos de sequías se duplicarán respecto a lo observado, considerando precipitaciones y sequías de tres o más años. Por otro lado, al considerar caudales sobre el 90% de excedencia en la estación Río Maipo en el Manzano, otro estudio estima que estos eventos se triplicarán (DICTUC, 2013).

En el mismo contexto de disponibilidad de caudales, los efectos del cambio climático sobre la hidrología del Maipo fueron evaluados en un estudio (Garreaud *et al.*, 2009) para distintos escenarios de emisiones según los resultados del modelo PRECIS aplicados a las simulaciones del modelo de circulación global HADCM³. La figura 29REF muestra como ejemplo el hidrograma climatológico para la estación El Yeso de la Dirección General de Aguas para un escenario base (BS) y para un escenario A2 (este último remplazado en la actualidad por el escenario RCP8.5), junto con el rango de variabilidad del 20 y el 80%:

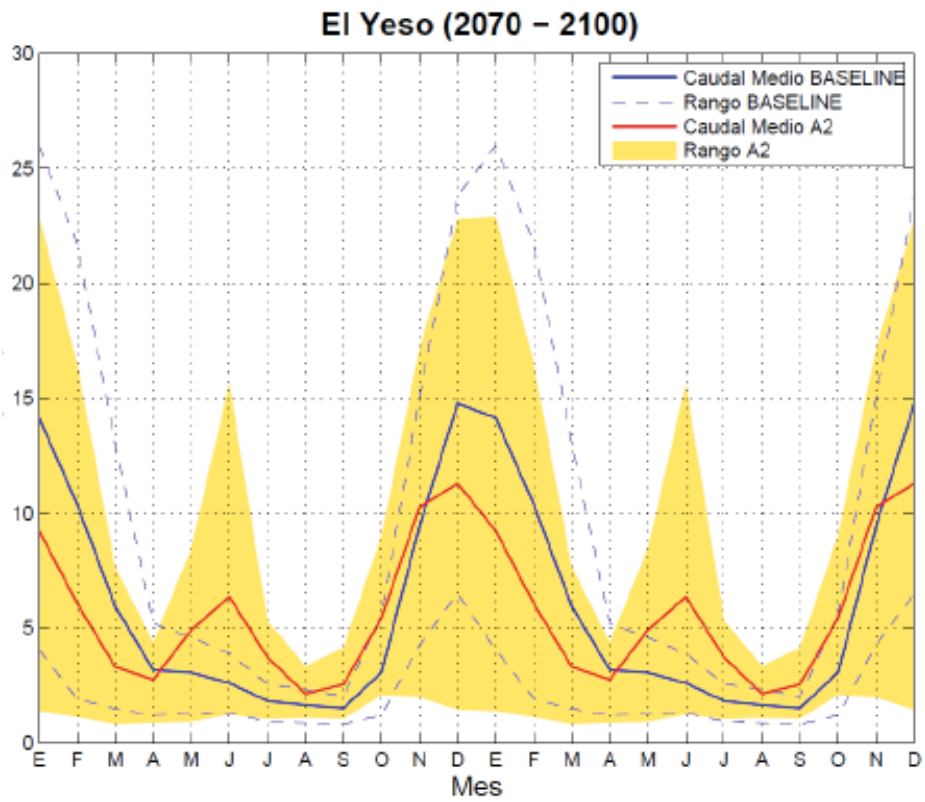


Figura 29. Disponibilidad de caudales para la estación El Yeso para un escenario base y un escenario climático A2 (Fuente: Garneaud et al., 2009).

Al analizar el comportamiento esperado de eventos de turbidez en el futuro, se pueden reconocer dos enfoques que apuntan a fenómenos ligeramente diferentes. Un estudio que compara estadística observada de fenómenos de turbidez registrados sobre un cierto umbral (DICTUC, 2014) muestra que, en el periodo 2008-2013, los eventos de turbidez han aumentado tanto en frecuencia como en intensidad y magnitud para todos los umbrales (desde 1.000 NTU hasta 3.000 NTU), respecto a lo observado en el periodo 1990-2008. Si bien en este estudio no se hace ninguna predicción futura sobre esta tendencia, se observa un aumento consistente en los niveles medios de turbidez que deberá afrontar la empresa de abastecimiento de agua potable Aguas Andinas.

Por otro lado, en el estudio que relaciona eventos de turbidez extrema de verano con precipitaciones convectivas se indica que la Región Metropolitana se encuentra en una zona de transición, por lo que no existe una evidencia clara que apunte a un aumento o una disminución de eventos

de turbidez extrema en verano. Así, se sugiere considerarlos con una periodicidad similar a la actual, situación que no resta gravedad al fenómeno, como demuestran los eventos de 2013 y la estadística hidrológica de los últimos cinco años.

5.2 Tipos de impactos y sus características

En los capítulos anteriores se han analizado fenómenos de sequía y altos niveles de turbidez que se han presentado en los últimos tiempos en la Región Metropolitana de Chile. A continuación se analizan cuáles son los principales impactos que cada uno de estos fenómenos puede llegar a provocar en el abastecimiento de agua potable de esta región del país.

5.2.1 Impactos asociados a Fenómenos de sequía

Este fenómeno es el resultante de una acumulación de años con precipitaciones por debajo de la media anual. Dependiendo de cuán por debajo de la media anual esté la precipitación, podrá empezar a hablarse de sequía después de dos o más años. Como referencia se puede indicar que la sequía actual (periodo 2010-2013) tiene por característica cuatro años seguidos con precipitación inferior al 70% de la media anual y dos de ellos con precipitación menor al 50%.

El problema radica entonces en precipitaciones, tanto de agua como de nieve, por debajo de la media anual y su impacto sobre la hidrología de ríos y quebradas en la cuenca. Desde el punto de vista del abastecimiento de agua para consumo humano, este cambio en la hidrología podría tener los siguientes impactos:

- Necesidad de mayor cantidad de derechos de aprovechamiento: una forma de afrontar los cambios hidrológicos es recurrir al mercado para la adquisición de derechos de agua.
- Necesidad de utilizar fuentes de agua alternativas: las empresas deberán suplir el déficit de caudal disponible con fuentes alternativas. Hoy en día lo más común es el reemplazo del caudal superficial por fuentes subterráneas, pero dadas las limitaciones del acuífero en la Región Metropolitana, esta alternativa tiene un límite y debe recurrirse a la investigación para el análisis de otras alternativas.
- Impacto económico: los cambios hidrológicos tendrán un impacto económico en el funcionamiento de las empresas que se reflejará en los costes de inversión si es que debe aumentar la oferta con inversio-

nes en infraestructura de agua subterránea o en la adquisición de más derechos de aprovechamiento en un escenario de restricción hídrica (mayor demanda – mayor precio). Asimismo, se encarecerán los costes de operación por los mayores costes de explotación de esas fuentes subterráneas.

- Impacto en la tarifa por suministro de agua potable: elemento tremendamente sensible para el consumidor, que se verá afectado por el aumento de tarifa provocado por los mayores costes descritos en el punto anterior.
- Conflictos por el uso de los recursos hídricos: de agudizarse la escasez hídrica podrían producirse conflictos entre los sectores usuarios sanitario, hidroeléctrico, industrial, minero y agrícola.
- Racionamiento eventual: aun cuando no se visualiza un escenario tan complejo como pueden ser racionamientos en el suministro, las empresas deben tomar todas las medidas necesarias al objeto de evitar situaciones de racionamiento en el servicio.

5.2.2 Impactos asociados a Fenómenos de turbidez

Como se ha mencionado, las aguas provenientes del río Maipo son la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la Región Metropolitana y, de acuerdo con los antecedentes anteriormente descritos, parece ser que la frecuencia y la intensidad de los fenómenos de turbidez extrema han ido incrementándose durante los últimos años.

El impacto de estos fenómenos de turbidez desde el punto de vista del abastecimiento de agua potable para el Gran Santiago está asociado principalmente a los sistemas de producción y su capacidad para tratar agua con un elevado nivel de turbidez y a la capacidad de almacenamiento y autonomía de la red de suministro aguas abajo de las plantas. De este modo, se pueden resaltar los siguientes impactos:

- Cortes de suministro: niveles de turbidez de gran envergadura, asociadas tanto a grandes caudales en el río durante el invierno como a eventos convectivos localizados durante el verano, ponen en riesgo las obras de captación que suelen estar a un costado del lecho del río. La empresa sanitaria que abastece mayoritariamente a la Región Metropolitana ha sufrido eventos de estas características, tanto a finales de la década de los ochenta para eventos de turbidez en periodos de invierno como durante el 2013 para eventos de turbidez en época estival. En

ambos casos significó el corte de suministro a la población mientras se procedía a la correspondiente reparación.

Cuando los niveles de turbidez superan la capacidad de tratamiento en las plantas de agua potable, al objeto de proteger su infraestructura, se debe proceder al cierre de la misma por el periodo que dure el evento. El mayor impacto se produce cuando el fenómeno de alta turbidez se extiende por un tiempo más allá de la capacidad que tenga el sistema de regulación de la empresa y provoca el corte de suministro.

- Impacto económico: si existen episodios de alta turbidez pero pueden ser abatidos mediante los tratamientos convencionales utilizados en las plantas de agua potable, implicarán mayores costes por mayor utilización de insumos químicos para los procesos de coagulación y filtración.

No hay que olvidar el impacto económico provocado cuando se producen daños en las obras de captación, las cuales deben ser realizadas en difíciles condiciones y con apremio de tiempo.

Al producirse cortes en el suministro, la empresa debe incurrir en mayores costes de operación por mayor utilización de fuentes subterráneas, distribución de agua en camiones aljibe y, posteriormente al momento de reanudar el servicio, por el cuidado en el llenado de tuberías y los problemas de roturas asociados al aire en su interior.

Finalmente se encuentra la menor recaudación por el periodo en que hubo consumo en las viviendas. No está legislado el tema en el país, pero existen iniciativas de compensación a los usuarios que pueden materializarse, como es el caso de las empresas eléctricas.

- Imagen corporativa: en una empresa de servicios, el coste de imagen al no brindar el servicio a sus clientes es enorme, y en el caso de una empresa sanitaria posiblemente es mayor, por la relación que puede tener en la salud de la población (aseo y alimentación).

5.3 Alternativas de mitigación de impactos asociados a Fenómenos de sequía y alta turbidez

El informe del IPCC sobre gestión de riesgos asociados a eventos climáticos extremos relacionados con el cambio climático (IPCC, 2012) indica que la adaptación involucra toda acción que signifique un ajuste de un sistema natural o humano como respuesta a efectos actuales o esperados de cambio climático o de sus impactos para moderar el daño o aprovechar

oportunidades beneficiosas. De acuerdo con este enfoque, el IPCC define una estrategia de gestión de adaptación y riesgo debido al cambio climático basado en seis aspectos clave, tal como se muestra en la figura 30:



Figura 30. Estrategias de actuaciones para la adaptación y la gestión del riesgo en un contexto de cambio climático (IPCC, 2012).

El enfoque estratégico definido por el IPCC proporciona un marco conceptual adecuado para establecer una serie de actuaciones que permitan hacer frente a los fenómenos climáticos, sequía y turbidez, descritos en este documento y que en función de los estudios recopilados están relacionados con el cambio climático y con una tendencia a incrementar su probabilidad de ocurrencia a medio y largo plazo. De ese modo, una adecuada planificación de estrategias de mitigación, adaptación y gestión de riesgos permitiría minimizar el impacto sobre el abastecimiento de agua en el Gran Santiago.

5.3.1 Alternativas de mitigación a Fenómenos de sequía

Los resultados de los distintos escenarios climáticos a medio y largo plazo son coincidentes en la tendencia general de una menor precipitación para la Zona Central de Chile y, en consecuencia, en una menor disponibilidad de recursos hídricos superficiales. En el apartado 5.1 se comentan con detalle los efectos, pero es necesario destacar que estos implicarán esfuerzos importantes para garantizar, por un lado, una adecuada disponibilidad de recursos y, por el otro, gestionar los usos de agua de forma más eficiente.

• Incremento en el uso de recursos hídricos alternativos

La alta dependencia del abastecimiento para consumo humano de las fuentes superficiales en la cuenca del río Maipo representa un riesgo a medio y largo plazo en relación con los estudios de los efectos de cambio climático que provocarán una reducción en los caudales superficiales, tal como se menciona en el apartado 5.1. De este modo se hace necesario implementar actuaciones para el aprovechamiento de recursos hídricos alternativos. Considerando el contexto regional en el que está inserta la cuenca del río Maipo, las siguientes fuentes alternativas podrían ser aprovechadas:

- Recursos subterráneos – recarga de acuíferos: si bien los recursos subterráneos representan alrededor del 20% de las fuentes de agua para el consumo humano, los acuíferos de la Región Metropolitana se encuentran en una condición de explotación cercana a su límite de sostenibilidad. Es por ello que la implementación de nuevos pozos, salvo cuando se trate de reemplazar captaciones existentes, pasa por encontrar mecanismos que incrementen la recarga de acuíferos más allá de los niveles de recarga en régimen natural.

Una adecuada gestión de recursos superficiales permitiría, por ejemplo, aprovechar los excedentes en época de invierno para ser almacenados en los acuíferos y ser utilizados en periodos de escasez.

- Reutilización de agua tratada: durante la última década, la cobertura en tratamiento de aguas residuales ha experimentado un avance notorio y se ha logrado a nivel nacional una cobertura superior al 99%. En particular, para la Región Metropolitana la cobertura a partir del año 2013 es del 100%.

Esta realidad es sin duda una ventaja comparativa y permite disponer de un volumen de agua de alrededor de 15 m³/s, que hoy en día es descargada al río Maipo y sus afluentes. Si bien parte de este volumen

es aprovechado en actividades agrícolas, su uso para abastecimiento humano en escenarios de escasez hídrica es una alternativa que debe estudiarse orientada a introducir niveles de tratamiento avanzado de estas aguas para garantizar su calidad para el consumo humano.

Es necesario comentar que la implementación de estas actuaciones requiere también de un adecuado soporte reglamentario que garantice la calidad y el uso eficiente de estos recursos.

- **Eficiencia en el uso de recursos hídricos**

El problema de escasez de recursos hídricos es sin duda un problema de balance entre la oferta o disponibilidad de agua y la demanda de esos recursos para distintos fines, es por ello que si bien la mirada hacia la disponibilidad de agua es relevante, las actuaciones tendientes a garantizar el uso eficiente de esos recursos es también de gran importancia.

De acuerdo con los datos contenidos en el documento de Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (MOP, 2012), a nivel de país el uso consuntivo de agua es en su mayor parte destinado a riego, y el agua para consumo humano es de alrededor de un 6% del consumo total. A nivel regional, la Zona Metropolitana de Chile presenta en promedio una demanda superior a la disponibilidad de recursos hídricos.

En cuanto a la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos, el sector sanitario, de acuerdo con los datos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS, 2013), presenta un volumen de agua no facturada, medida como la diferencia entre la producción y la facturación, cercana al 35% a nivel nacional y del 30% para la Región Metropolitana. Dados los bajos niveles de consumos no facturados, este indicador se aproxima bastante al nivel de pérdidas reales existentes en la red de abastecimiento propiamente dicha. Es por ello que las actuaciones tendientes a reducir estas pérdidas considerando las buenas prácticas en gestión de redes significarían una ayuda importante para reducir el déficit en el balance entre la oferta y la demanda, siendo de todos modos el sector agrícola el que debería liderar estas iniciativas, en atención a su alta demanda de recursos hídricos en términos relativos a los otros usos.

- **Eficiencia en la gestión integral de recursos hídricos**

El escenario climático proyectado hacia finales del siglo XXI indica, como se ha mencionado en los apartados anteriores, un complejo balance entre oferta y demanda de recursos hídricos. Dentro de este contexto, para lograr una eficiencia en la gestión es clave la implementación de me-

canismos y políticas de gestión integrada de recursos hídricos, donde los diversos usuarios puedan tener un marco común de entendimiento y coordinación que les permita desarrollar actuaciones en conjunto y bajo una mirada sistémica del recurso hídrico dentro de la cuenca.

Si bien en la práctica no es una medida que permita mitigar de forma directa los efectos de un escenario climático adverso, sí es esencial su desarrollo para la implementación eficiente de las otras actuaciones, tal como señala el Banco Mundial en su *Informe de diagnóstico de los recursos hídricos en Chile* (Banco Mundial, 2011), el cual además hace hincapié en el fortalecimiento institucional en el ámbito de la gestión de los recursos.

5.3.2 Alternativas de Mitigación a Fenómenos de Alta Turbidez

Como se ha mencionado en el apartado 5.1, los fenómenos de alta turbidez son eventos de duración variable pero en general inferiores a 48 horas, cuya aparición es abrupta en el caso de tener su origen en tormentas convectivas (intensas, localizadas y de corta duración) en la alta cordillera durante el verano, y su principal impacto se refiere a la capacidad de tratamiento de las plantas potabilizadoras, que deben ser cerradas durante el periodo que dure el fenómeno, lo que convierte el abastecimiento en extremadamente dependiente del volumen de reserva en estanques, de la capacidad operativa de abastecimiento de recursos subterráneos y de las fuentes superficiales no afectadas por los altos índices de turbidez.

En este sentido, las medidas de mitigación apuntan tanto a mejorar la capacidad y la flexibilidad operativa en el uso de distintas fuentes como a incrementar la capacidad de almacenamiento de reserva.

- **Obras de interconexión y conducción de agua limpia**

Dada la extensión de la cuenca del río Maipo y sus afluentes principales, y considerando además la existencia de reservas de agua en el embalse El Yeso, la laguna Negra y la laguna Lo Encañado, cuyos niveles de turbidez son menos variables, existe un volumen de agua que eventualmente podría no estar afectada por eventos de turbidez extrema en el caso de lluvias convectivas localizadas en ciertas áreas de la cordillera que debería ser aprovechada al máximo.

En este sentido, las obras de infraestructuras destinadas a conectar las reservas de agua a los acueductos más próximos en la cordillera permitirían operar estas conducciones a su máxima capacidad hasta las plantas de potabilización y garantizarían un volumen de agua con niveles de turbidez dentro de los umbrales admisibles de tratamiento,

reduciendo al mismo tiempo el agua que es transportada por cauces naturales y susceptible de ser afectada por alta turbidez.

Dentro de estas medidas, también se debería aprovechar y potenciar la multiplicidad de puntos de captación de recursos superficiales existentes dentro de un área suficientemente extensa como para suponer que no todas las captaciones estarán sujetas a eventos de turbidez extrema. Esto último es particularmente cierto en eventos de turbidez derivados de lluvias convectivas.

- **Disponibilidad de agua cruda**

Uno de los factores de riesgo existente en el sistema de abastecimiento se relaciona con la dependencia del tratamiento de agua superficial a los niveles de turbidez en las captaciones; esto se hace más evidente para la planta de agua potable Las Vizcachas, que trata el mayor porcentaje de agua superficial para la región del Gran Santiago. Por otra parte, y tal como se ha mencionado, los fenómenos de turbidez extrema son en general de corta duración y eventualmente el almacenamiento de suficiente agua (junto con otras medidas) permitiría hacer frente a un cierre temporal de las captaciones en contacto directo con los cauces con niveles de turbidez elevados.

Considerando el gran volumen para garantizar el suministro para periodos sobre las 12 horas, y los costes asociados a disponer de agua tratada aguas abajo de las plantas o la construcción de un acueducto de gran capacidad desde las plantas hasta las partes altas de la cuenca para captar agua de mejor calidad, una alternativa técnica y económicamente más viable es la de disponer de un volumen de agua cruda de calidad aceptable en las cercanías de la planta Las Vizcachas, para ser tratada en caso de emergencia e incrementar la seguridad del abastecimiento.

- **Incremento de la capacidad de regulación de agua potable**

La garantía de abastecimiento en una red tan extensa como la de Aguas Andinas está condicionada por los volúmenes de regulación existentes en la cabecera de cada sistema de transporte en los que se divide la red. Si bien este volumen se encuentra definido por la normativa nacional, el volumen de regulación que define responde a escenarios de suministro con eventos de cortes de poca duración y capacidad de respuesta ante incendios. De ese modo, para garantizar un suministro a un sector determinado se deben realizar inversiones en la infraestructura de regulación que aseguren un nivel de almacenamiento adecuado para abastecer a la población durante un cierto periodo de tiempo y complementen el volumen de almacenamiento de agua cruda.

- **Garantías de operatividad de fuentes alternativas**

Las fuentes alternativas son en su mayoría captaciones subterráneas distribuidas dentro del territorio operacional de Aguas Andinas y representan una infraestructura estratégica para hacer frente a eventos de turbidez. Es por ello que las actuaciones tendentes a garantizar su operatividad en emergencia son claves y deben incluir aspectos tales como mantenimiento de los equipos, conectividad a la red de abastecimiento, protocolo de activación y suministro de energía, entre otros.

- **Monitorización de parámetros clave en la cuenca**

Dentro de los aspectos relevantes que se deben considerar en las actuaciones de mitigación se encuentra la monitorización de la cuenca en relación con los parámetros de interés para el fenómeno de turbidez. Actualmente, el sistema se basa en inspecciones visuales puntuales y en la toma de muestras en la aducción desde el río Maipo hasta la planta Las Vizcachas, lo que a la luz de los eventos pasados no ha sido suficiente.

Un sistema adecuado de monitorización permitiría eventualmente anticipar un fenómeno convectivo o alertar tempranamente de la aparición de un fenómeno de turbidez, y se daría un tiempo valioso a los operadores para tomar las medidas adecuadas (realizar derivaciones de agua, incrementar volúmenes almacenados, etc.). Del mismo modo, permitiría anticipar y programar de forma eficiente la entrada en operación de las plantas una vez que el fenómeno haya perdido su intensidad. No obstante, es necesario realizar un estudio específico para determinar la predictibilidad de las tormentas convectivas de verano sobre la cordillera de los Andes en la región de estudio.

6. CONCLUSIONES

El abastecimiento de agua potable para la Región Metropolitana se encuentra dentro de un contexto climático complejo e incierto dado por la zona geográfica en la que se encuentra. Las proyecciones de escenarios climáticos futuros, basadas en los informes del IPCC, indican efectos adversos que incidirían en una reducción en la escorrentía superficial en particular para los meses de enero a abril, durante los cuales se registran los mayores volúmenes de demanda de agua para consumo humano.

La estadística histórica muestra que los fenómenos de sequía y alta turbidez son cíclicos y forman parte de la condición hidrometeorológica de la cuenca. Sin embargo, en los últimos años ambos fenómenos han tenido comportamientos excepcionales, asociados a una mayor duración de la

condición deficitaria (sequía) y a un aumento en la frecuencia de eventos extremos (turbidez). Lo anterior afecta a las condiciones normales de suministro de agua potable y requiere de esfuerzos de inversión y de mejoras en la gestión tanto pública como privada.

La existencia de eventos de remociones en masa de tipo flujo de detritos en la zona precordillerana y cordillerana de la Zona Central de Chile es frecuente y ha generado a lo largo del tiempo diversos impactos sobre la infraestructura del sector y particularmente en las instalaciones de captación de la empresa sanitaria Aguas Andinas. Estos eventos son desencadenados en su mayoría por precipitaciones intensas en corto tiempo (asociadas a tormentas convectivas) en la parte alta de la cuenca, las cuales saturan el material disponible, aumentan la presión de poros y reducen la resistencia de corte.

Resulta válido efectuar la determinación de zonas sensibles a movimientos de masa tipo flujo como una primera etapa en lo que debería ser un estudio de riesgos que involucre, por un lado, el análisis de la amenaza potencial (peligro) y, por el otro, el impacto que tendrá aguas abajo en la infraestructura y la población en general (vulnerabilidad). El cálculo de indicadores de susceptibilidad por sí solo no es suficiente para la vinculación directa con los altos niveles de turbidez, no solamente por el requerimiento de datos que permitan modelos confiables y predictivos o por la actualización permanente de la información de ciertos factores geomorfológicos, sino también porque se requiere un enfoque sistémico del mismo.

No se ha efectuado una predicción futura respecto a altos niveles de turbidez en la cuenca. Sin embargo, los eventos que se han presentado en los últimos años y los índices de sensibilidad calculados en el presente estudio estarían indicando que dichos eventos continuarían presentándose y las precipitaciones serían uno de los factores desencadenantes (quizás el más importante).

Estudios realizados en relación con el fenómeno de precipitaciones sobre la cordillera de los Andes de la Zona Central de Chile indican que ocurren preferentemente asociadas a actividad convectiva. En tal sentido, una variable de especial interés para el pronóstico de las mencionadas precipitaciones es la componente zonal del viento (U, este-oeste) sobre el tope de los Andes subtropicales. La monitorización de esta variable y su posible correlación con la información de rayos que hoy en día está disponible puede tener un buen carácter predictivo. No obstante, es necesario realizar un estudio específico para determinar la predictibilidad

de las tormentas convectivas de verano sobre la cordillera de los Andes en la región de estudio.

Respecto a las sequías, las estimaciones de futuro en el contexto de cambio climático son complejas, en el sentido que pueden llegar a duplicarse en los próximos 30 años. Lo que sí estarían indicando todas las predicciones futuras es una tendencia a la disminución paulatina de las precipitaciones, con el consiguiente efecto sobre la hidrología en ríos y quebradas de la cuenca.

Basándose en los resultados de los estudios meteorológicos y geológicos realizados, tanto los fenómenos de alta turbidez y sequía como la menor oferta hídrica tienen impactos directos en la gestión del abastecimiento humano y en la población de la Región Metropolitana de Chile. En especial respecto a impactos en la gestión de los servicios sanitarios que lleva a cabo Aguas Andinas, dichos impactos podrían resumirse en:

- Impactos por disminución de caudales: adquisición de derechos de aprovechamiento, utilización de fuentes de agua alternativas, económico (inversión y mayores costes operativos), conflictos por el uso, eventual racionamiento e impacto en la imagen corporativa.
- Impactos por alta turbidez: cortes de suministro, impactos económicos (inversión, reparación y costes de operación) e impactos en la imagen corporativa.

6.1 Enfoque estratégico

El enfoque estratégico que permita hacer frente a los fenómenos climáticos, sequía y turbidez descritos en este documento se orienta hacia la implementación de una serie de actuaciones para mitigar, adaptar y gestionar riesgos que permitan minimizar los posibles impactos asociados al cambio climático sobre el abastecimiento de agua para consumo humano en el Gran Santiago. Dentro de este enfoque se destacan las siguientes actuaciones:

- Incrementar el uso de recursos hídricos alternativos, mejorando la gestión de los acuíferos, introduciendo prácticas como recarga de acuíferos y aprovechando la alta cobertura de tratamiento de agua residual a través de su reutilización.
- Dotar de eficiencia al uso de recursos hídricos, implementando actuaciones tendentes a la reducción de pérdidas incorporando técnicas y estándares mundiales en relación con la gestión de pérdidas en las redes de abastecimiento.

- Lograr una eficiencia en la gestión integrada de recursos hídricos, desarrollando mecanismos de coordinación y entendimiento entre los diversos usuarios que permitan la realización de actuaciones conjuntas bajo una mirada sistémica de cuenca.
- Llevar a cabo obras de interconexión y conducción de agua limpia, destinadas a garantizar la operación de acueductos a su máxima capacidad que alimentan las plantas potabilizadoras y a potenciar la multiplicidad de puntos de captación para garantizar un volumen de agua en condiciones adecuadas para ser tratadas.
- Garantizar la disponibilidad de agua cruda de calidad aceptable mediante volúmenes de almacenamiento que garanticen una operación de las plantas por un periodo de tiempo que minimice el riesgo de corte de suministro.
- Incrementar la capacidad de regulación de agua potable en los sistemas de abastecimiento, como forma de generar una holgura que permita llevar a cabo las acciones adecuadas para garantizar un suministro continuo.
- Garantizar la operatividad de fuentes alternativas, que permita disponer de forma inmediata de fuentes de agua de emergencia.
- Monitorizar los parámetros clave en la cuenca, con el objetivo de anticipar eventos de turbidez y programar la entrada en operación de las plantas una vez que el fenómeno haya perdido intensidad.

De forma complementaria, y considerando la necesidad de generar más y mejor información que permita validar o corregir las hipótesis y análisis contenidos en los diversos estudios, se hace necesario seguir avanzando en la implementación de mediciones y en la generación de estudios. De igual modo, la implementación de sistemas de alerta temprana parece ser una necesidad y dentro de este contexto sistemas indirectos como la monitorización de rayos podrían representar un potencial beneficio si consideramos lo complejo que es medir variables climatológicas directas en regiones de alta montaña.

Por último, la metodología planteada para elaborar un mapa de riesgos de remociones en masa podría ser ampliada hacia la cabecera de la zona 2 del estero San Alfonso, previamente a la posible ampliación hacia otras zonas de la cuenca, lo cual complementaría la identificación de zonas susceptibles con mayor incidencia en eventos de alta turbidez.

REFERENCIAS

Aguas Andinas, 2014; *Memoria Anual 2013.*

Aguas Andinas, 2011; *Plan General de Producción y Transporte Grupo Aguas 2011.*

Aguas Andinas, 2010; *Plan Director Hidrológico Grupo Aguas 2010.*

Banco Mundial (2011). *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos en Chile.* Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Región para América Latina y el Caribe.

BID; Universidad de Chile (2009). *Impacto del cambio climático en el siglo XXI sobre los recursos hídricos de las cuencas del Maipo y el Mapocho.* Proyecto RG-K1049, Banco Interamericano de Desarrollo.

Cortés, G.; Vargas, X.; McPhee, J. (2011). "Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera". *Journal of Hydrology*, 405: 93-109.

DICTUC, 2014; *Estudio hidrológico de fuentes superficiales del grupo Aguas,* Cap 5 Análisis del fenómeno de turbiedad en el río Maipo.

DICTUC (2014). *Estudio hidrológico de fuentes superficiales del Grupo Aguas.* Cap. 5: «Análisis del fenómeno de turbidez en el río Maipo».

DICTUC, 2009; *Caracterización de aguas captables en río Maipo y análisis del fenómeno de turbiedad. Estudio hidrológico de Fuentes superficiales y subterráneas del Grupo Aguas.*

DICTUC (2014). *Estudio hidrológico de fuentes superficiales del Grupo Aguas.* Cap. 5: «Análisis del fenómeno de turbidez en el río Maipo».

Garreaud, R.; Falvey, M.; Rojas, M. (2009). *Impacto del cambio climático en el siglo XXI sobre los recursos hídricos de las cuencas del Maipo y el Mapocho.* Informe final del proyecto RG-K1049 de la Universidad de Chile para Aguas Andinas.

Hauser A. (1985). "Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana: Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas". *Revista Geológica*, 24: 75-92.

- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2012).** *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- Lara, M. (2007).** *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana.* Tesis para optar el grado de máster en Ciencias, mención Geología, y memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, 212 p.
- Ministerio de Obras Públicas, MOP (2012).** *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.*
- Moreiras, S.; Sepúlveda, S. A. (2013).** "The high social and economic impact 2013 summer debris flow events in Central Chile and Argentina". *Bollettino di Geofisica*, 54 (supl. 2, GeoSur 2013 – Resúmenes): 181-184.
- Moreiras, S.; Sepúlveda, S. A. (2013).** "Large Volume Landslides in the Central Andes of Chile and Argentina (32° - 34°S) and related hazard. International Conference Vajont 1963-2013". *Journal of Engineering Geology and Environment*, 287-294.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios, SISS (2013).** *Informe de gestión del sector sanitario 2012.*
- Thiele, R. (1985).** "Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana". *Carta Geológica de Chile*, 39. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1 mapa. 51 p.
- Viale, M.; Garreaud, R. (2014).** "Summer precipitation events over the western slope of the subtropical Andes". *Mon. Wea. Rev.*, 142: 1074-1092; DOI: 10.1175/MWR-D-13-00259.1.

AUTORES

BRAVO FORTUNE, MARCELO

Ingeniero civil de la Universidad Técnica Santa María (2004) y máster en Dirección de Empresas (MBA) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (2009), ha estado vinculado profesionalmente al Departamento de Obras Civiles de esta casa de estudios desde el año 2001. Profesional asociado al Centro de Estudios e Investigación en Infraestructura (CEII), del mismo departamento, donde ha realizado diversas actividades vinculadas a la labor de este organismo en los roles de ingeniero de proyecto y coordinador de diversos estudios y peritajes en diferentes materias. Profesor a tiempo parcial del Curso de introducción a la ingeniería y el proceso de tratamiento de aguas de la UTFSM.

FLORES AUDIBERT, RAÚL

Ingeniero civil y máster en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María (enero de 2012). Desde abril del año 2012 ha estado vinculado profesionalmente al Departamento de Obras Civiles de dicha casa de estudios en calidad de profesor instructor. Como académico, desde 2012 ha estado encargado de las cátedras de Hidráulica Teórica e Hidrología y ha realizado investigación en temas diversos competentes a la ingeniería hidráulica. Ha participado como ingeniero de proyecto en actividades y estudios realizados por el Centro de Estudios e Investigación en Infraestructura (CEII) del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María.

GALINDO URRRA, RAÚL

Ingeniero civil de Chile. Especializado en recursos hídricos, contaminación del agua, tratamiento del agua y emisarios submarinos. Profesor titular de la Universidad Técnica Federico Santa María. Profesor titular (a tiempo parcial) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Docente e investigador sénior en las áreas de su especialidad. Ha sido investigador principal para NSF-USA, CONICYT Chile e INNOVA Chile. Consultor y jefe de proyecto para diversas instituciones nacionales. Ha sido consultor (STC) internacional para World Bank, UNESCO, CEPAL, OPS/NU y CPPS. Miembro de la American Geophysical Union.

GARREAUD SALAZAR, RENÉ

Ingeniero civil y máster en Geofísica por la Universidad de Chile y doctor en Ciencias Atmosféricas por la Universidad de Washington (EE. UU.). Actualmente es profesor titular del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y subdirector del Centro de Investigación del Clima y la

Resiliencia. Su carrera académica se ha focalizado en la meteorología, la variabilidad y el cambio climático del cono sur de Suramérica.

MUÑOZ MORALES, ELEONORA

Geóloga de la Universidad de Chile (2002) y máster en Ciencias, mención Geología (2013), de la misma universidad, ha trabajado en geología aplicada en ámbitos mineros, civiles y de planificación territorial. En el ámbito académico, desde el año 2010 trabaja como profesora a tiempo parcial en distintas universidades de la región de Valparaíso, entre ellas la Universidad Técnica Federico Santa María, la Universidad de Valparaíso y la Universidad Nacional Andrés Bello, dictando en ellas la cátedra de Geología, así como otras asignaturas del ámbito de la geología.

SEREY AMADOR ALEJANDRA

Geóloga de la Universidad de Chile (2011), Magister en Ciencias mención Geología (2011) de la Universidad de Chile, Diplomado en Hidrología aplicada a la minería y el medio Ambiente (2013) de la Universidad de Chile, se ha desempeñado en Geología Aplicada en ámbitos civiles. En el ámbito académico, desde el año 2011 trabaja como profesora part time en distintas universidades de Santiago, entre ellas a Universidad Técnica Federico Santa María, la Universidad de Santiago y la Universidad de Chile, dictando clases asignaturas del ámbito de la geología.

VIALE MAXIMILIANO

Licenciado y Doctor en Meteorología por la Universidad de Buenos Aires, Argentina. Actualmente es investigador Postdoctoral en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Su trabajo de investigación se orienta a la meteorología sinóptica y los mecanismos de precipitación en terrenos de topografía compleja.



www.fundacionaquae.org

NOTAS