

Chile

Chile es un país de contrastes en relación con los recursos hídricos, con una escorrentía per cápita promedio anual de 500 m³ desde el área metropolitana hacia el norte, donde prevalecen condiciones de escasez, y de 7.000 m³ en el sur. Chile ha logrado índices de saneamiento y acceso a agua potable elevados para la región y también ha avanzado considerablemente en el conocimiento y protección de la calidad del agua. Sin embargo, las presiones del desarrollo urbano, minero, agrícola e industrial, sumado a condiciones hidrológicas y geoquímicas diversas, configuran desafíos importantes sobre calidad del agua hacia el cumplimiento de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, en dimensiones que van más allá del saneamiento y acceso a agua potable.

Calidad del Agua en Chile: Avances, desafíos y perspectivas

Pablo Pastén, Alejandra Vega, Paula Guerra, Jaime Pizarro y Katherine Lizama

Resumen

Mucho se ha avanzado en el conocimiento y protección de la calidad del agua en Chile, pero condiciones hidrológicas y geoquímicas diversas sumadas a presiones del desarrollo urbano, agrícola, industrial y minero hacen de Chile un caso interesante, determinando múltiples desafíos hacia el cumplimiento de la Agenda 2030 en dimensiones más allá del saneamiento y acceso a agua potable.

1. Introducción

Chile mostró desde 1990 a 2015 una evolución positiva en los indicadores de acceso a agua potable y saneamiento asociados a los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) de las Naciones Unidas (2001). Esta evolución positiva en tratamiento de agua potable trajo beneficios tanto a la salud y al medio ambiente, como al desarrollo socioeconómico. Ahora, el país enfrenta el compromiso de avanzar hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) acordados en la Agenda 2030 (United Nations, 2015). El ODS 6 propone metas e indicadores directamente relacionados con la calidad del agua. Sin embargo, la calidad del agua juega directa o indirectamente un rol relevante en otras metas e indicadores asociados a los ODS, yendo más allá del acceso a agua potable, saneamiento e higiene. Así, la calidad del agua se vincula también a la gestión de los recursos hídricos, la resiliencia de comunidades y ciudades, el desarrollo agrícola, minero e industrial, la viabilidad de ecosistemas, y con la equidad y justicia ambiental (*e.g.* Evans & Kantrowitz, 2002; VanDerslice, 2011).

Este capítulo busca describir las principales tendencias espaciales y temporales de la calidad del agua en Chile, destacar algunos avances en el conocimiento de los procesos que controlan la calidad del agua e identificar desafíos hacia el futuro. Se pone especial énfasis en temáticas y problemáticas características del país como los enriquecimientos minerales que han motivado una fecunda actividad minera pasada, presente y futura.

Pablo Pastén. ppasten@ing.puc.cl Coordinador del capítulo. Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) y Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Santiago, Chile. **Alejandra Vega.** asvega@uc.cl Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) y Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Santiago, Chile. **Paula Guerra.** paula.guerra@usm.cl Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Valparaíso, Chile. **Jaime Pizarro.** jaim.pizarro@usach.cl Universidad de Santiago, Departamento de Ingeniería Geográfica, Santiago, Chile. **Katherine Lizama.** klizama@ing.uchile.cl Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago, Chile.

Este capítulo comienza presentando objetivos y metas relacionados con la calidad del agua, tanto en los ODM como en los ODS, y su evolución y línea de base para Chile. Luego, presenta las redes de monitoreo e información de calidad del agua existentes en Chile. Seguidamente, describe la calidad del agua ahí mismo identificando las macrotendencias espaciales y temporales de parámetros clave de calidad del agua para aguas superficiales y subterráneas. A continuación, expone aspectos distintivos de la calidad del agua para regiones y cuencas seleccionadas, destacando problemáticas relevantes para Chile y enfatizando los principales avances científicos sobre la ocurrencia, distribución, dinámica y control de contaminantes. Luego, se abordan brevemente aspectos de gobernanza y normativa que enmarcan el control y protección de la calidad del agua. Finalmente, se sintetizan las principales conclusiones y desafíos, con especial énfasis en las necesidades de desarrollo científico y tecnológico, junto con el desarrollo de políticas públicas para el mejoramiento y protección de la calidad del agua.

El lector puede encontrar información complementaria sobre la hidrografía, hidrología y aguas urbanas en Chile en los dos volúmenes previos de esta serie editada por IANAS.¹

2. Calidad del agua en Chile en relación con los ODM y los ODS

Desempeño para metas e indicadores de los ODM

Las principales metas e indicadores asociados a calidad del agua contenidos en los ODM se presentan en la **Tabla 1**, incluyendo su variación para Chile entre 1990 y 2015. La calidad del agua en los ODM se relaciona principalmente con el ODM 7, especialmente con la Meta 7C y los Indicadores 7.8 y 7.9. Así, los aspectos de calidad del agua en los ODM se concentran en acceso a agua potable y saneamiento.

1. Cf. http://www.ianas.org/docs/books/Diagnostico_Agua.html, p. 169 y http://www.ianas.org/docs/books/Desafios_Agua.html, p. 152.

Calidad del agua y metas e indicadores de los ODS

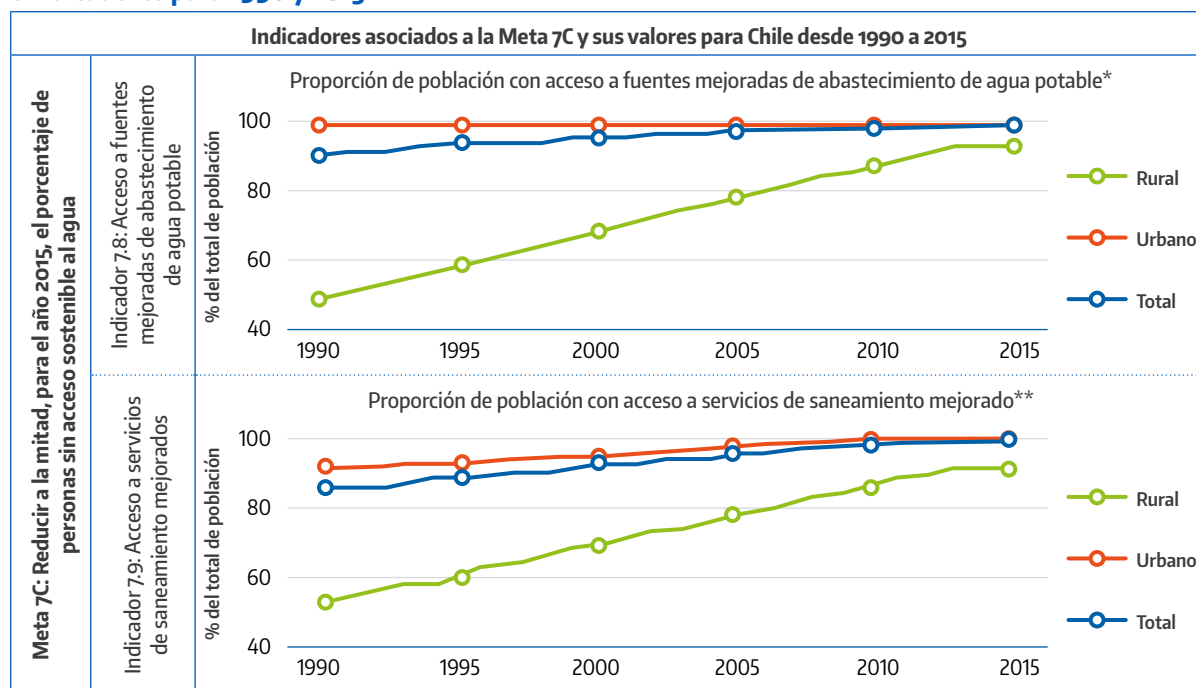
La calidad del agua es una dimensión fundamental para varios de los ODS, partiendo por el ODS 6 donde la disponibilidad de agua para todos depende de la calidad en relación con su uso. Los indicadores directos de calidad del agua están asociados a las Metas 6.3 y 6.6. Para éstas se consideran específicamente los Indicadores 6.3.2 (proporción de cuerpos de agua con buena calidad del agua ambiental) y 6.6.1 (cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua en el tiempo). El listado de indicadores para las metas del ODS 6 se presenta en UN Water (2017a) y se discuten más adelante para Chile.

Las **Tablas 2a y 2b** presentan la evolución de los indicadores de agua potable y aguas servidas para Chile, comparando los valores con la región. Estas tablas confirman que en Chile existió una evolución positiva de los indicadores de agua potable y saneamiento, y muestran un desempeño destacado en el contexto de Latino América y el Caribe.

La implementación sistemática de interceptores, conducciones de aguas residuales, y plantas de tratamiento y disposición de aguas servidas impactó favorablemente los indicadores de salud pública. La implementación de esta política pública –que en este caso se realizó bajo el sistema de concesiones a privados– se asoció a un aumento de la cantidad de hectáreas regadas con aguas de calidad apta para agricultura, disponibilidad de aguas aptas para cumplir estándares internacionales de seguridad alimentaria en productos agrícolas de exportación, condiciones más favorables al turismo y la posibilidad de recuperación de energía en los sistemas de digestión anaeróbica (United Nations, 2017).

No obstante, la estadística de saneamiento incluye la disposición a través de emisarios submarinos. A noviembre de 2014 se contabilizó que cerca de 30% de las aguas servidas municipales de Chile se disponen a través de emisarios submarinos, en 33 sistemas que emplean esta alternativa, resultando cerca de 250.000.000 m³ al año de aguas servidas dispuestas en el mar (SISS, 2014) sin tratamiento secundario. De esta manera, el buen desempeño en la Meta 7C de los ODM ocurre en parte a costa de una transferencia de las aguas residuales hacia los ecosistemas marinos.

Tabla 1. ODM. Identificación de objetivos relacionados con calidad del agua y sus metas e indicadores para 1990 y 2015



Fuente: Elaboración propia con base en Indicadores de los ODM, consultados en <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/Data.aspx> el 4 de junio de 2018. *Fuentes mejoradas de abastecimiento de agua potable corresponden a una instalación que por su diseño está protegida de contaminación externa, en particular contaminación de origen fecal. Los usuarios de agua embotellada se consideran como un acceso adecuado sólo cuando poseen una fuente mejorada secundaria de abastecimiento. No se incluyen pozos, manantiales no protegidos, agua de camiones cisternas y agua embotellada, agua tomada directamente de ríos, estanques, riachuelos, lagos, embales o canales de irrigación. **Servicio de saneamiento mejorado se define como una instalación que higiénicamente evita el contacto de las excreciones con humanos, animales e insectos. Incluyen baños y letrinas conectadas a alcantarillado, fosas sépticas, letrinas con plataforma de cualquier material que cubra la fosa excepto por el orificio de descarga. Servicios no mejorados incluyen instalaciones públicas o compartidas, baños con descarga directa a alcantarillado abierto o zanjales, letrinas sin plataforma, letrinas de balde, baños o letrinas colgantes y defecación al aire libre, campos o cuerpos de agua.

Aunque se ha sugerido que los sistemas de emisarios submarinos bien diseñados pueden ser seguros (Roberts *et al.*, 2010), existe evidencia contundente que los emisarios submarinos generan alteraciones en los sistemas costeros (Gibbs and Miskiewicz, 1995; Roth *et al.*, 2016). Además, la disposición final de aguas servidas en el mar impide su reutilización, aspecto fundamental para regiones áridas y semiáridas en el norte y centro de Chile.

En relación con el agua potable, el porcentaje de cumplimiento de valores de parámetros establecidos en la norma de calidad de agua potable (NCh409Of.2005) y su muestreo a 2016 era de 99,2% en el sector urbano, presentando una evolución positiva en el tiempo (Ministerio del Medio Ambiente, 2017b). El incumplimiento de parámetros como

cloruro, nitrato, sólidos suspendidos totales, sulfato y arsénico se concentran preferentemente en sistemas de agua potable del norte de Chile (*e.g.* Copiapó, Alto Hospicio, Caldera, Tierra Amarilla y Chañaral), aspecto que es abordado a través del cambio de fuentes y tecnologías en los planes de desarrollo de las sanitarias, bajo la fiscalización de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Sin perjuicio de lo anterior, debe existir un proceso periódico de revisión de los parámetros y valores normados en relación con la evidencia de riesgos para la salud humana. Por ejemplo, el boro no se incluye en la norma primaria de calidad de agua potable, pero en la Macrozona Norte existen fuentes de agua con valores elevados de boro, muy por sobre los 2,4 mg L⁻¹ recomendados por la OMS.

Tabla 2.a. ODS. Evolución de las principales variables de desempeño del Indicador 6.1 del ODS 6 relacionadas con la calidad del agua

	Chile		Latino América y Caribe		Norte América y Europa		
	2000	2015	2000	2015	2000	2015	
Población (miles)	15.170	17.948	526.890	634.387	1.040.132	1.096.280	
% urbano	86	90	75	80	73	76	
% población con disponibilidad de agua para consumo							
Nacional	Al menos básico	95	100	90	96	99	99
	Limitado	-	-	1	1	0	0
	No mejorada	5	0	6	2	1	1
	Agua superficial	0	0	3	1	0	0
	Tasa de cambio anual en básico	0,32		0,38		0,02	
Rural	Al menos básico	72	100	71	86	96	97
	Limitado	-	-	2	2	1	0
	No mejorada	28	0	16	6	3	2
	Agua superficial	0	0	10	6	0	0
	Tasa de cambio anual en básico	1,84		0,97		0,05	
Urbano	Al menos básico	99	100	97	99	99	99
	Limitado	-	-	0	0	0	0
	No mejorada	1	0	3	1	0	0
	Agua superficial	0	0	0	0	0	0
	Tasa de cambio anual en básico	0,07		0,14		0	
% población usando suministros de aguas mejorados							
Nacional	Gestionado de manera segura	92	98	61	65	89	94
	Accesible en la vivienda	92	99	82	93	91	94
	Disponibile cuando se necesita	94	99	72	74	-	98
	Libre de contaminación	95	98	61	65	96	98
	Canalizada	94	100	83	91	94	95
	No canalizada	2	0	8	6	5	4
Rural	Gestionado de manera segura	-	-	-	-	-	-
	Accesible en la vivienda	53	95	53	79	78	90
	Disponibile cuando se necesita	67	93	56	61	-	-
	Libre de contaminación	-	-	-	-	-	-
	Canalizada	62	100	54	72	82	89
	No canalizada	10	0	19	16	15	8
Urbano	Gestionado de manera segura	98	98	77	77	-	96
	Accesible en la vivienda	98	100	91	91	96	96
	Disponibile cuando se necesita	99	99	77	77	99	99
	Libre de contaminación	99	98	92	93	-	100
	Canalizada	99	100	93	96	98	98
	No canalizada	0	0	4	3	2	2

Fuente: adaptado de WHO y UNICEF (2017a; 2017b). **Gestionado de manera segura:** Agua potable de una fuente mejorada que está ubicada en viviendas, disponible cuando se necesita y libre de contaminación fecal o química prioritaria. **Básico:** Agua potable de una fuente mejorada para la cual el tiempo de recolección no excede los 30 minutos por ronda incluyendo hacer filas. **Limitado:** Agua potable de fuente mejorada para la cual el tiempo de recolección excede los 30 minutos por ronda incluyendo hacer filas. **No mejorada:** Agua potable de pozo no protegido o manantial no protegido. **Agua superficial:** Agua potable directa de un río, presa, lago, estanque, riachuelo, canal o canal de irrigación.

La **Tabla 3** presenta líneas de base y metas para varios de los indicadores del ODS 6, presentados en el Informe de Diagnóstico e Implementación de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Chile (Gobierno de Chile, 2017), asociado a la labor del Consejo Nacional para la Implementación de la Agenda 2030.² A nivel nacional, las cifras indi-

2. En el Consejo Nacional para la Implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible participan: el Ministerio de Economía Fomento y Turismo, el Ministerio de Desarrollo Social y el Ministerio del Medio Ambiente, y lo preside el Ministerio de Relaciones Exteriores. "Sus principales funciones son: Asesorar a Presidente/a de la República en la implementación y seguimiento de la Agenda 2030; servir de instancia de coordinación en la implementación y seguimiento de la Agenda y de los ODS a nivel nacional y regional" (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2016).

can en 2015 un porcentaje elevado de provisión de agua potable y saneamiento. Sin embargo, las cifras a nivel nacional dan cuenta de un camino importante por recorrer en las áreas rurales, donde en 2015 vivía 12,7% de la población (Instituto Nacional de Estadísticas, 2015), según se muestra en las **Tablas 1, 2.a y 2.b**.

El suministro de agua potable en áreas rurales se organiza mediante sistemas de Agua Potable Rural (APR), fuera del sistema de concesiones de empresas sanitarias que se enfoca a áreas urbanas. Éstas son organizaciones (comités, cooperativas) que obtienen los permisos de funcionamiento del Ministerio de Salud y a las que no son aplicables la normativa de las concesionarias (la SISS no tiene injerencia en su operación), aunque deben cumplir las normas técnicas, como la norma de calidad de

Tabla 2.b: Evolución de principales variables de desempeño del Indicador 6.2 del ODS 6 relacionado con la calidad del agua

		Chile		Latino América y Caribe		Norte América y Europa	
		2000	2015	2000	2015	2000	2015
Saneamiento (% población)							
Nacional	Al menos básico	92	100	75	86	96	97
	Limitado	0	0	4	5	1	1
	No mejorada	6	0	11	6	4	2
	Defecación al aire libre	2	0	10	3	0	0
	Tasa de cambio anual en básico	0,54		0,7		0,1	
	Tasa de cambio anual defecación al aire libre	-0,15		-0,44		0,00	
Rural	Al menos básico	67	99	47	68	89	94
	Limitado	0	0	3	5	1	1
	No mejorada	29	0	20	15	10	5
	Defecación al aire libre	3	1	29	11	0	0
	Tasa de cambio anual en básico	2,12		1,41		0,32	
	Tasa de cambio anual defecación al aire libre	-0,16		-1,21		-0,01	
Urbano	Al menos básico	96	100	84	90	98	98
	Limitado	0	0	4	5	1	1
	No mejorada	2	0	8	4	1	1
	Defecación al aire libre	2	0	3	1	0	0
	Tasa de cambio anual en básico	0,28		0,38		0,01	
	Tasa de cambio anual defecación al aire libre	-0,15		-0,15		0,00	

% población usando sistemas de saneamiento mejorados							
Nacional	Gestionado de manera segura	27	85	10	22	74	78
	Disposición en el lugar	6	5	-	-	-	-
	Vaciada y tratada fuera del lugar	0	0	-	-	-	-
	Tratamiento de agua residual	21	80	10	22	74	78
	Letrinas y otros	5	1	11	9	6	5
	Fosa séptica	7	9	17	17	10	10
	Conexión a alcantarillado	80	90	47	60	79	82
Rural	Gestionado de manera segura	-	-	-	-	42	47
	Disposición en el lugar	-	-	-	-	-	-
	Vaciada y tratada fuera del lugar	-	-	-	-	-	-
	Tratamiento de agua residual	3	20	2	5	42	47
	Letrinas y otros	28	13	20	22	16	14
	Fosa séptica	28	63	18	32	28	29
	Conexión a alcantarilla	11	22	9	14	45	50
Urbano	Gestionado de manera segura	47	81	12	27	86	87
	Disposición en el lugar	2	1	-	-	-	-
	Vaciada y tratada fuera del lugar	0	0	-	-	-	-
	Tratamiento de agua residual	45	80	12	27	86	87
	Letrinas y otros	1	0	8	5	3	3
	Fosa séptica	3	2	16	13	4	4
	Conexión a alcantarilla	91	98	60	72	91	92

Fuente: adaptado de WHO y UNICEF (2017a; 2017b). **Gestionado de manera segura:** Uso de instalaciones mejoradas que no son compartidas con otros hogares y donde los excrementos son adecuadamente dispuestos en el sitio o transportados a sistemas de tratamiento fuera del lugar. **Básico:** Uso de instalaciones que no son compartidas con otros hogares. **Limitado:** Instalaciones mejoradas compartidas entre dos o más hogares. **No mejorada:** Uso de letrinas sin una plataforma, letrinas colgantes o letrinas de balde. **Defecación al aire libre:** Disposición de fecas humanas en campos, bosques, matorrales, cuerpos de agua abiertos, playas y otros espacios o con residuos sólidos.

agua potable. La Ley 20.998 de 2017 que regula la gestión de los servicios sanitarios rurales internaliza la asesoría técnica de los APR en el Ministerio de Obras Públicas. En los últimos años, el Ministerio de Obras Públicas ha realizado inversiones importantes en el sistema de APR, especialmente en localidades del norte de Chile con registros elevados de arsénico. Sin embargo, todavía queda por realizar una vigilancia amplia y sistemática no sólo del cumplimiento de los parámetros de calidad del agua, sino también del costo-efectividad de las soluciones adoptadas.

Primeros pasos en líneas de base y metas para el indicador de calidad del agua

Para el Indicador 6.3.2 de los ODS se estableció una línea de base en 67% de masas de agua de buena ca-

lidad, y una meta de 80% para 2030 (Tabla 3). Cabe señalar que se consideró sólo 6 sistemas para los cuales se dispone de referencia normativa, incluyendo dos secciones de río (Maipo en Cambimbao y Biobío en desembocadura), dos acuíferos (Cachapoal y Tinguiririca) y dos lagos (Villarrica y Llanquihue). El Subindicador 6.6.1.c presenta mayor detalle relacionado con el Indicador 6.3.2, aunque se debe considerar una conversión para reflejar que el Indicador 6.6.1 se refiere a un porcentaje de cambio en el tiempo, mientras que el Indicador 6.3.2 se refiere a un porcentaje de cuerpos de buena calidad (UN Water, 2017b; UN Water, 2017c). Considerando lo reciente del establecimiento de metodologías y guías para el cálculo de los indicadores, es positivo que ya existan estimaciones para 6 cuerpos de agua. El necesario establecimiento de nuevas normas se-

cundarias de calidad del agua permitirá el cálculo de los indicadores para otros cuerpos de agua de interés a lo largo del país. De acuerdo con el *Atlas del Agua 2016* (Dirección General de Aguas, 2016), Chile posee 101 cuencas hidrográficas, 1.251 ríos, 12.784 lagos y lagunas, y 24.114 glaciares, con un total de 829 estaciones vigentes de monitoreo de calidad del agua (**Figura 1**). El trabajo en nuevas normas secundarias de calidad del agua y planes de vigilancia para cuencas priorizadas en Chile será un insumo importante para aumentar la cobertura del cálculo de los indicadores de calidad del agua del ODS 6.

Hacia una contabilidad más integral de presiones e interacciones de la calidad del agua

Los ODM y los ODS también consideran aspectos de sostenibilidad indirectamente relacionados con la calidad del agua. Chile ha impulsado iniciativas

orientadas a articular los esfuerzos y reportes sobre aspectos de sostenibilidad que incluyen el estado de los ambientes acuáticos, presiones y esfuerzos en conservación de la biodiversidad, como la Estrategia Nacional de Biodiversidad (Comisión Nacional de Medio Ambiente, 2003)³ y la Estrategia de Crecimiento Verde (Ministerio del Medio Ambiente, 2013). Una aproximación más integral hacia las cuentas ambientales está considerada en el Plan Nacional de Cuentas Ambientales (Ministerio del Medio Ambiente, 2016). Este plan establece la implementación institucional y operativa del Sistema Integrado de Cuentas Ambientales, Ecosistémicas y Económicas (SICAEE). El SICAEE “*responde a la necesidad de avanzar hacia sistemas integrados*

3. El Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (CMS) aprobó recientemente la Estrategia Nacional de Biodiversidad para el período 2017-2030 (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

Tabla 3: Líneas de base y metas 2030 para los indicadores del ODS 6

Meta	Indicador	Base 2015	Meta 2030	Notas
6.1	6.1.1 Proporción de la población que dispone de servicios de suministro de agua potable gestionados de manera segura (%)	97,95	100	Tier I; MI; Valor nacional
6.2	6.2.1 Proporción de la población que utiliza servicios de saneamiento gestionados de manera segura, incluida una instalación para lavarse las manos con agua y jabón (%)	96,53	100	Tier I; MI; Valor nacional
6.3	6.3.1 Proporción de aguas residuales tratadas de manera segura (%)	99,89	99,98	Tier II; MI; Valor nacional
	6.3.2 Proporción de masas de agua de buena calidad	67	80	Tier III; MI; Ver Nota c e Indicador 6.6.1c
6.4	6.4.1 Cambio en la eficiencia del uso del agua con el tiempo	S/I		-
	Municipal	66,42	ND	Tier III; MN
	Energía	5,22		Tier III; MN
	Industrial	0,83		Tier III; MN
	6.4.2 Nivel de estrés por escasez de agua: extracción de agua dulce como proporción de los recursos de agua dulce disponibles	1,47		Tier II; MN; Año 2014, valor nacional
6.4	Municipal	0,19	ND	Tier II; MN
	Energía	1,25		Tier II; MN
	Industrial	0,03		Tier II; MN
	Agrícola	3,25		Tier II; MN
6.5	6.5.1 Grado de aplicación de la ordenación integrada de los recursos hídricos (0-100)	13,5	30	Tier II; MI
	6.5.2 Proporción de la superficie de cuencas transfronterizas con un arreglo operacional para la cooperación en la esfera del agua	S/I	ND	Tier II; MI no definida

6.6	6.6.1 Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo	Ver nota d	0	Tier III; MI; Ver Nota c
	6.6.1.a Cambio en la extensión espacial del ecosistema acuático (km ²)	S/I		
	Lago Villarrica-Litoral Sur	176	ND	Tier III; Ver Nota e
	Lago Llanquihue-Puerto Octay	870,5		
	6.6.1.b Cambio en la cantidad de agua en el ecosistema acuático	S/I		
	Lago Villarrica-Litoral Sur (km ³)	21		
	Lago Llanquihue-Puerto Octay (km ³)	152,9		
	Río Maipo en Cabimbao (m ³ /s)	111,55	ND	Tier III; Ver Nota e
	Río Biobío en desembocadura (m ³ /s)	954		
	Acuífero Cachapoal (SHAC ^f) Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua	S/I		
	Acuífero Tinguiririca (SHAC ^f) Tinguiririca Superior	S/I		
	6.6.1.c Cambio en la calidad del agua	S/I		
	Lago Villarrica-Litoral Sur (%)	70		
	Lago Llanquihue-Puerto Octay (%)	97		
	Río Maipo en Cabimbao (%)	90	ND	Tier III; Corresponde a Indicador 6.3.2. Ver Nota e
	Río Biobío en desembocadura (%)	47		
	Acuífero Cachapoal (SHAC ^f) Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua (%)	100		
Acuífero Tinguiririca (SHAC ^f) Tinguiririca Superior (%)	81			

Fuente: adaptado de Gobierno de Chile, 2017.

Notas: a) Corresponde a la clasificación de la Comisión Estadística Internacional de Indicadores ODS. Tier I: Indicador conceptualmente claro, metodología establecida y estándares disponibles y datos producidos regularmente por los países; Tier II: Indicador conceptualmente claro, metodología establecida y estándares disponibles pero los datos no son producidos regularmente por los países; Tier III: Indicador para el cual no hay metodología y estándares establecidos o metodología/estándares están siendo desarrollados/probados. MI= corresponde a metodología Internacional; MN = Metodología Nacional; REV= En revisión. b) Incluye las categorías de "Red Pública" y "Pozo"; se excluyen "Río, vertiente, lago o estero", "Camión aljibe" y "Otra fuente". c) Se reporta el lago Villarrica (estación litoral sur); lago Llanquihue (estación Puerto Octay); río Maipo (estación Maipo en Cabimbao); río Biobío (estación desembocadura Norte); Acuífero del Cachapoal (SHAC Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua-Tagua) y Acuífero del Tinguiririca (SHAC Tinguiririca Superior). d) Valores incorporados en cada Subindicador. e) Sólo hay datos para cuerpos de agua puntuales. Queda pendiente indicador nacional. f) SHAC: sistema hidrogeológico de aprovechamiento común. S/I: Sin información. ND: Meta no definida.

de producción de estadísticas, de manera de responder a las crecientes demandas nacionales e internacionales por información ambiental coherente y consistente, así como también integrada a la información económica y social" y así "responder a las mediciones ambientales en el programa estadístico de Naciones Unidas (ODS) y al compromiso con organismos internacionales como la OCDE, Unión Europea, Naciones Unidas, CBD, entre otros". Desde el punto de vista de las presiones sobre la calidad del agua bajo un enfoque DPSIR (*Driving forces-Pressure-State-Impact-Response*) (European Environment Agency, 1999), se encuentra en operación el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) (Ministerio del Medio Ambiente, 2017a),

integrado al Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) para la elaboración de cuentas ambientales. El RETC "es una base de datos destinada a: capturar, recopilar, sistematizar, conservar, analizar y difundir la información sobre emisiones al aire y al agua, residuos y transferencias de contaminantes potencialmente dañinos para la salud y el medio ambiente, generados en actividades industriales o no industriales". El RETC permite disponer de información sobre localización y magnitud de emisiones a aguas superficiales y subterráneas por actividad productiva. El Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2017b) registra que en 2015 las actividades que reportan al RETC que generaron mayores emisiones

hacia cuerpos de agua superficial fueron la eliminación de residuos y aguas residuales, saneamiento y actividades similares (56,6%), la extracción de cobre (16,5%) y la acuicultura y servicios relacionados (14,7%), mientras que hacia aguas subterráneas fueron la elaboración de bebidas (48,7%), la producción, procesamiento y conservación de carne, frutas, legumbres, hortalizas, aceites y grasas (27%), y la cría de animales (13,3%).

3. Red de monitoreo de calidad del agua

Red de monitoreo de la Dirección General de Aguas (DGA)

La DGA es el organismo del Estado dependiente del Ministerio de Obras Públicas que opera la red de calidad de aguas continentales, incluyendo aguas superficiales (ríos, lagos) y subterráneas. La distribución de las 829 estaciones vigentes de calidad del agua junto a un resumen de características demográficas e hidrológicas de las cuatro macrozonas de Chile (Norte, Centro, Sur y Austral) se presenta en la **Figura 1**. Aproximadamente 61% de las cuencas cuenta con estaciones de monitoreo de calidad del agua, de las cuales cerca de 85% monitorea aguas superficiales y 15% aguas subterráneas⁴ (Dirección General de Aguas, 2014). Existe una red de monitoreo para evaluar la condición trófica de 20 lagos y lagunas, de los cuales 3 se encuentran en la Macrozona Centro y 17 en la Macrozona Sur (Dirección General de Aguas, 2016). El criterio de distribución de las estaciones considera especialmente áreas de escasez hídrica, alta densidad poblacional y áreas de presiones antrópicas. En su concepción busca disponer de estaciones que permitan identificar el "estado natural" y estaciones que permitan identificar el efecto de las presiones sobre la calidad del agua. Sin embargo, en la práctica es difícil discriminar cuál es el estado natural para sales disueltas y metales en muchas cuencas andinas, considerando que ocurren enriquecimientos naturales y explotaciones mineras en las cabeceras de dichas cuencas.

El muestreo se efectúa cuatro veces al año (uno por estación) para aguas superficiales desde 2017, y tres o cuatro veces al año en años previos. Para

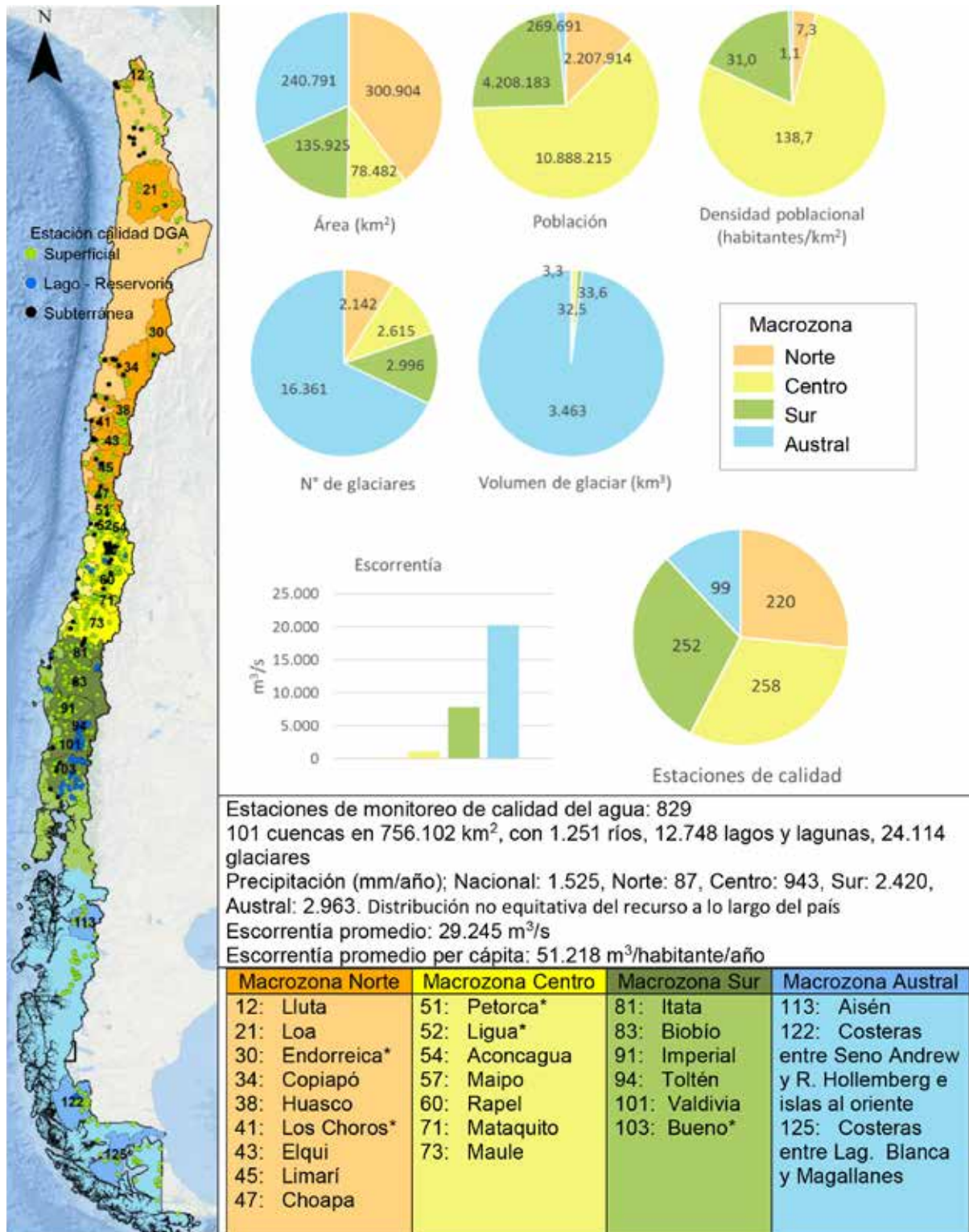
aguas subterráneas, el muestreo se realiza dos veces al año, en otoño y primavera (Gobierno de Chile, 2017). Existe una proporción muy menor de estaciones hidrométricas que disponen de sensores multiparamétricos de calidad del agua que entregan información continuamente a través de la plataforma satelital. El muestreo de calidad de aguas lo realiza personal de la DGA, y los análisis se efectúan mayormente en el laboratorio central de la DGA, que cuenta con acreditación ISO 17.025.⁵ Una vez disponibles los resultados de los análisis, se ingresan a la base de datos BNA (Banco Nacional de Aguas) y son puestos a disposición del público a través de la plataforma CIRH (Centro de Información de Recursos Hídricos).

Los parámetros medidos por la DGA en el campo son temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, mientras que los parámetros medidos en laboratorio incluyen un rango amplio de metales, aniones, nutrientes y un parámetro orgánico agregado (demanda química de oxígeno) (Dirección General de Aguas, 2014). Actualmente, el Laboratorio Ambiental de la DGA mide el 60% de los parámetros normados y se planea al 2022 medir el 80% de los parámetros contenidos en normas secundarias de calidad de aguas. La centralización de los análisis y la disponibilidad de recursos impiden que se analicen otros parámetros que requieren análisis más expedito, como la DBO₅. La lista considera los parámetros básicos propuestos por UN Water (2017b), mientras que algunos parámetros relevantes de la lista de parámetros de monitoreo progresivo no están incluidos. Considerando las presiones a la calidad del agua que podrían ser relevantes en algunas cuencas, el monitoreo de la DGA reportado por Dirección General de Aguas (2014) no considera parámetros como alcalinidad, turbidez, sólidos suspendidos, hidrocarburos, pesticidas, compuestos orgánicos volátiles, contaminantes emergentes y parámetros microbiológicos. Sin embargo, con la progresiva implementación de las normas secundarias de calidad ambiental, estos parámetros serán parte de los planes de vigilancia de acuerdo con las necesidades identificadas en los

4. Esta estadística no considera las estaciones de la red mínima de lagos.

5. ISO/IEC 17025 – Testing and calibration laboratories, "permite a los laboratorios demostrar que operan de manera competente y generan resultados válidos, promoviendo así la confianza en su trabajo a nivel nacional y en todo el mundo"; <https://www.iso.org>

Figura 1. Distribución de red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA y descripción general de las cuatro macrozonas definidas por la DGA



Fuente: elaboración propia sobre la base del *Atlas del Agua* (DGA, 2016) y censo 2017. Disponible en: <https://www.censo2017.cl/>
 Nota: Las cuencas seleccionadas en Figura 2 se listan y destacan en el mapa. Cuencas adicionales presentadas en las Tabla 4 y 5 se indican con asterisco.

cuerpos de agua regulados, consistente con el concepto de parámetro de monitoreo progresivo.

Otras fuentes de información de calidad del agua de instituciones públicas

- a. **Planes de vigilancia asociados a las normas secundarias de calidad ambiental (NSCA) de aguas.** Las NSCA buscan la protección o conservación del medio ambiente. Para ello determinan áreas de vigilancia donde se realiza monitoreo sistemático de parámetros específicos sobre una red de control y también definen una red de observación complementaria para evaluar el desempeño de las NSCA. Los planes de vigilancia asociados a las NSCA son generados por la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA). Estos son ejecutados por la DGA y forman parte de la base de datos de calidad del agua. Si los informes anuales determinan que la norma no se cumple, se declara zona saturada y se establece un plan de descontaminación, mientras que, si un parámetro cumple y está bajo el límite establecido, pero sobrepasa 80% de dicho valor, el área se declara zona latente y se establece un plan de prevención. Actualmente se encuentran vigentes las NSCA de las siguientes cuencas: Serrano (2010), Llanquihue (2010), Maipo (2014), Villarrica (2013) y Biobío (2015), mientras que están en elaboración las de Aconcagua, Mataquito, Elqui, Rapel, Huasco y Valdivia.⁶
- b. **Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).** Un amplio rango de proyectos de inversión nuevos o sus modificaciones deben pasar por un análisis de impacto ambiental.⁷ Aquellos que pueden tener impactos potenciales sobre la calidad del agua requieren el establecimiento de una línea base de los sistemas potencialmente impactados en la situación sin proyecto y un plan de monitoreo durante la

implementación y operación. Esta información está públicamente disponible en el expediente electrónico de la evaluación de cada proyecto en el SEIA y a través de los expedientes de la SMA, encargadas del seguimiento de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) definidas al término de la evaluación en el SEIA.

- c. **SISS.** Fiscaliza las concesiones de servicios sanitarios que operan en áreas urbanas, controlando el cumplimiento de los estándares de calidad de agua potable y de descarga de aguas servidas tratadas. También fiscaliza el cumplimiento de la norma de descarga de residuos líquidos a aguas continentales superficiales y aguas marinas.

4. Macrotendencias de parámetros de calidad del agua a lo largo de Chile

El trabajo de Vega *et al.* (2018) realiza un análisis de tendencias de parámetros de calidad del agua y las secciones siguientes lo usan como base para discusión. En este estudio se integran datos de estaciones en distintos afluentes por cuenca desde los años 80, así como datos provenientes de distintos años, de modo que no necesariamente reflejan una calidad actual, como se constata en parámetros impactados positivamente por mejoras en el saneamiento.

Aguas superficiales: ríos y esteros

La **Figura 2** presenta una síntesis gráfica de la calidad de aguas superficiales en ríos y esteros de cuencas seleccionadas usando la base de datos de calidad de agua de la DGA y la metodología de Vega *et al.*, (2018).

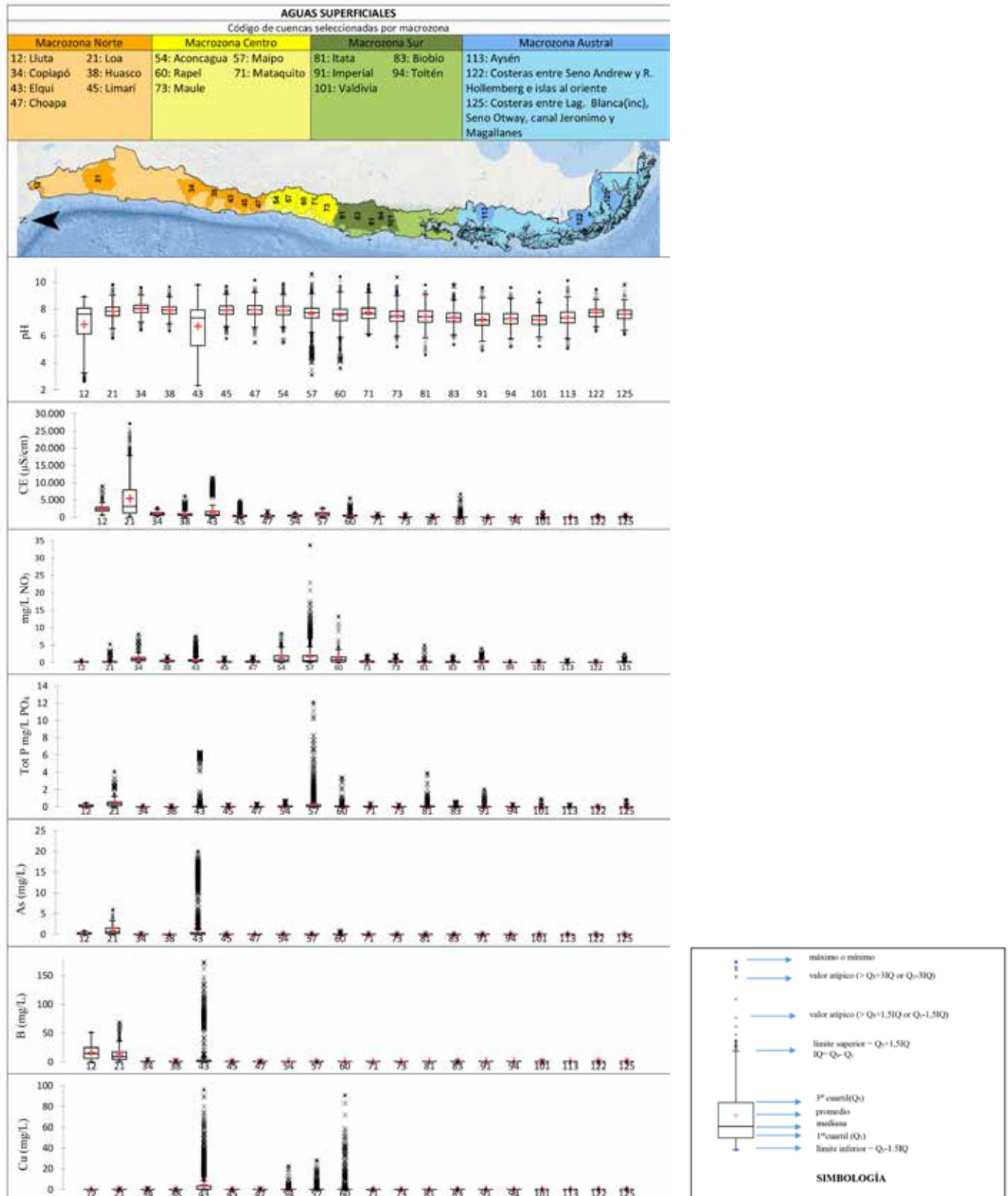
Los valores del pH varían en general entre 6,5 y 8,5, con dos cuencas en la Macrozona Norte con valores excepcionalmente bajos que se han asociado a drenaje ácido presente en las cuencas del río Lluta (Guerra *et al.*, 2016a; Guerra *et al.*, 2016b; Leiva *et al.*, 2014) y del río Elqui (Espejo *et al.*, 2012; Flores *et al.*, 2017; Oyarzun *et al.*, 2013; Oyarzun *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2014).

La conductividad eléctrica en general presenta una tendencia desde valores elevados en la Macrozona Norte hasta valores excepcionalmente bajos en las Macrozonas Sur y Austral. En la Macrozona Norte existen valores sobre 15 mS cm⁻¹, por ejemplo,

6. La NSCA de la cuenca del río Valdivia estuvo vigente desde diciembre de 2014 a septiembre de 2016, pero fue anulada después de un recurso de reclamación presentado ante el Tribunal Ambiental. Su elaboración fue reanudada y a diciembre de 2017 se encuentra en proceso de consulta pública.

7. Qué proyectos ingresan es establecido por La Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente de 1994 y su reglamento.

Figura 2. Síntesis gráfica de calidad de aguas superficiales en cuencas seleccionadas



Fuente: elaboración propia sobre la base a datos de la DGA.

en el río Salado en la cuenca del río Loa, que recibe las aguas provenientes del campo geotermal El Tatio, una fuente importante de arsénico y boro (Dadea *et al.*, 2001; Romero *et al.*, 2003). La cuenca del río Lluta también presenta altos valores de conductividad eléctrica, arsénico y boro. Aunque los enriquecimientos minerales andinos continúan hacia la Macrozona Centro, los aportes de sales disueltas y metales son diluidos por condiciones hidrológicas más favorables como en las cuencas de los ríos Aconcagua (Gaete *et al.*, 2007), Maipo-Mapocho alimentado por el estero Yerba Loca (Montecinos *et al.*, 2016; Pasten *et al.*, 2015; Segura *et al.*, 2006), Rapel (Pizarro *et al.*, 2003) y Mataquito (Tapia *et al.*, 2009). En general, la alta concentración de sales disueltas en cuencas del norte se debe a una combinación de la alta evaporación con fuentes hidrotermales, drenaje ácido y el afloramiento de aguas subterráneas salobres. Más adelante, se presenta y discute en forma más detallada, el caso del arsénico en las cuencas de los ríos Lluta, Loa y Elqui, como casos de enriquecimiento por metales y metaloides desde aportes naturales y fuentes asociadas a la minería. Hacia el sur el marco geológico cambia, los afluentes salobres disminuyen y la escorrentía pluvial y nival aumenta, generando corrientes con menores concentraciones de sales disueltas.

Las concentraciones medias de nitrato son altas para tres cuencas de la Macrozona Centro (Aconcagua, Maipo y Rapel), y tres cuencas de la Macrozona Norte (Copiapó, Huasco y Elqui). En un rango menor, tres cuencas de la Macrozona Sur (Itata, Biobío e Imperial) presentan enriquecimiento respecto a otras cuencas más al sur (Toltén y Valdivia). El enriquecimiento de nitrato en aguas se asocia a contaminación difusa en zonas urbanas y a prácticas agroindustriales y ganadería (*e.g.*, Fernandez *et al.*, 2017; Fuentes *et al.*, 2014; Ribbe *et al.*, 2008).

Las concentraciones de DQO⁸ muestran valores elevados en la cuenca del río Maipo debido a descargas históricas de aguas servidas no tratadas o mínimamente tratadas, principalmente al río Mapocho, previo al plan de saneamiento de los 90

(Pflieger, 2008). El cambio dramático generado por este plan ha posibilitado iniciativas previamente impensadas, como el Proyecto Mapocho 42K, que acerca el cauce del río Mapocho a la población urbana. Éste consiste en un sistema de parques integrados con ciclo-paseo a las orillas del río (Iturriaga *et al.*, 2013).

Aguas superficiales: lagos, lagunas y embalses

Los resultados de la DGA para 20 lagos muestran que existen 3 lagos en condición de mesotrofia y 2 en condición de hipóereutrofia, siendo los restantes todos oligotróficos (Dirección General de Aguas, 2016).

Existe evidencia contundente de que en algunos lagos y embalses en Chile se produce enriquecimiento de metales y metaloides (*e.g.*, Contreras *et al.*, 2015; Galleguillos *et al.*, 2008; Pizarro *et al.*, 2003; Pizarro *et al.*, 2009). El análisis de columnas de sedimentos en lagos y embalses puede entregar un registro histórico de fuentes de contaminación, así como entregar evidencia de los procesos de transferencia de contaminantes entre los sedimentos y la columna de agua en ambientes rurales y urbanos (*e.g.*, Hansen, 2012; Thapalia *et al.*, 2010; Yang & Rose, 2003). En particular, es importante reconocer los nexos entre los flujos de metales desde los sedimentos hacia la columna de agua (*e.g.*, gradientes de óxido-reducción que pueden disolver reductivamente óxidos de hierro u oxidativamente sulfuros) con los ciclos de los nutrientes, materia orgánica, condiciones hidrológicas y descargas de residuos (*e.g.*, Tapia & Audry, 2013; Vega *et al.*, 2017).

Aguas subterráneas

La conductividad eléctrica sigue una tendencia decreciente de norte a sur, al igual que el boro y el cloruro. Las cuencas áridas del norte se caracterizan por la presencia de ambientes con alta evaporación, que funciona como mecanismo concentrador de sales, lo cual unido a la evapotranspiración generada por la agricultura se asocia a altas conductividades (*e.g.*, Lluta, San José, Loa, Copiapó, Huasco). Se ha establecido que las aguas de los acuíferos en las zonas desérticas como la Pampa del Tamarugal (cerca de Iquique) obedecen a patrones de circulación regionales que trae agua desde el noreste al sudoeste, pasando por ambientes salinos, mientras que aguas

8. Demanda Química de Oxígeno. Medida agregada de la concentración de compuestos orgánicos, cuya degradación genera un consumo de oxígeno disuelto, y que se expresa como demanda de oxígeno (mg O₂ L⁻¹). El valor de la DQO puede ser visto como una "deuda" de oxígeno.

de poca salinidad pueden aparecer producto de zonas de fallas (Magaritz *et al.*, 1990).

El arsénico presenta registros sobre los 10 $\mu\text{g L}^{-1}$ ⁹ en aguas subterráneas de las Macrozonas Norte y Centro (acuíferos de la zona norte de Santiago). Esto ha obligado a que algunas empresas sanitarias y APR deban implementar sistemas de remoción de arsénico por adsorción, coagulación con cloruro férrico seguido por filtración y osmosis inversa (*e.g.*, Aracena & Muñoz, 2017; SISS, 2013).

El nitrato y las sales disueltas en la Macrozona Norte provienen de una combinación de formaciones geológicas y ambientes hidrológicos áridos, mientras que en las Macrozonas Centro y Sur estarían asociados localmente con contaminación urbana y contaminación agrícola difusa (Arumi *et al.*, 2005; Donoso *et al.*, 1999; Fernandez *et al.*, 2017; Fuentes *et al.*, 2014; Yevenes *et al.*, 2016). Las altas concentraciones de sulfato, cloruro, nitrato y/o arsénico en las Macrozonas Norte y Centro impone un desafío de sostenibilidad en la producción de agua potable de ciudades del norte de Chile (*e.g.*, Arica, Iquique, Copiapó, entre otras), donde se requiere invertir en tecnologías que demandan uso de energía y reactivos para alcanzar los límites establecidos en la norma de calidad de agua potable.

5. Procesos de contaminación y descontaminación a escala regional

Metales en cuencas de las Macrozonas Norte y Centro de Chile

Las cuencas del centro y norte de Chile están permanente expuestas a la contaminación natural y antropogénica de sus aguas. Un ejemplo de la primera es el alto nivel de arsénico, que ha afectado a poblaciones desde épocas remotas, como se ha demostrado en análisis de restos momificados de la cultura Chinchorro (7000-2000 años AC) (Bundschuh *et al.*, 2012). Un ejemplo de la segunda es la intensa actividad minera del norte, generadora de riqueza y progreso nacional, pero a la vez un factor de preocupación por la potencial contaminación debido a descargas accidentales y difusas en aguas superficiales y acuíferos con impacto en la salud de

los habitantes y deterioro de ecosistemas acuáticos y terrestres, así como la generación de desechos ricos en metales.

En un análisis de calidad del agua de diversos ríos del norte y centro de Chile (Pizarro *et al.*, 2010b), se destaca que en el río Elqui, la concentración promedio de arsénico de las últimas décadas es 1.705 $\mu\text{g L}^{-1}$, valor que supera ampliamente el nivel establecido por la Norma Chilena sobre requisitos de calidad del agua para riego (NCh1333.Of78). Este alto valor se atribuye al desarrollo de la minería de oro en la cuenca, actividad intensiva desde la década de los 80. Dicho estudio muestra a otros 6 ríos que presentan concentraciones promedio de arsénico superiores a la recomendada por esta norma: cuencas endorreicas > Copiapó > Petorca > Los Choros > Aconcagua > Rapel. Las concentraciones de algunos metales también destacan por exceder esta norma (Tabla 4).

La escasez hídrica de las zonas norte y centro y la disminución de precipitaciones derivada del cambio climático tiende a agravar la disponibilidad de agua tanto en calidad como en cantidad, afectando las actividades que se desarrollan en la cuenca. Estas condiciones plantean la necesidad de implementar programas de monitoreo de las aguas que consideren la cuantificación de contaminantes emergentes, mejoramiento de la frecuencia de muestreo, intensificación de estudios del efecto de la contaminación de metales pesados en la cadena alimenticia y la biodiversidad de la flora y fauna locales.

Nutrientes y eutrofización en cuencas de las Macrozonas Centro y Sur de Chile

La concentración de nitrógeno y fósforo se ha incrementado 6 y 9 veces, respectivamente, desde la época previa a la industrialización, en los principales ríos del mundo (Boyer *et al.*, 2006; Dumont *et al.*, 2005; Meybeck, 1982; Smith *et al.*, 2003; Smith, 2002). Los ríos de las zonas centro y sur de Chile no escapan a esta tendencia. El creciente aporte de nitrógeno y fósforo afecta la calidad del agua y acrecienta el proceso de eutrofización. Dependiendo de la cuenca, estos nutrientes provienen de actividades forestales, agrícolas, vitivinícolas y ganaderas, actividades que se han incrementado fuertemente en las últimas décadas. Estos ríos son importantes en la disponibilidad hídrica para la zona, con caudales controlados por la precipitación anual de lluvias y

9. Límite recomendado para arsénico en agua potable por la OMS y límite máximo establecido por NCh409 /1.Of. 2005.

el derretimiento de nieves y glaciares durante el periodo de primavera-verano.

Los promedios históricos de concentración de nitrógeno y fósforo de algunas cuencas en la zona se presentan en la **Tabla 5**. El uso de modelos estadísticos permitió concluir que la concentración de nitrógeno y fósforo ha aumentado en las últimas décadas en 6 (BioBío, Bueno, Imperial, Maule, Rapel y Valdivia) y 2 (Rapel y Maule) de las cuencas analizadas, respectivamente (Pizarro *et al.*, 2010a). La concentración promedio de nitrógeno en el río Rapel es la más elevada debido a la intensa actividad de industrias agroalimenticias, agrícolas y al fuerte incremento del turismo en la zona y densidad poblacional. Sin embargo, el mayor incremento lo presentan los ríos Biobío, Bueno, y Valdivia, cuyos niveles de concentración del estudio no mues-

tran incremento en los primeros años, pero experimentan una fuerte variación en los 10 años finales analizados. La concentración de fósforo sólo muestra un incremento en la última década en los ríos Rapel y Maule, mientras los ríos Biobío, Itata y Valdivia presentan cierta estabilidad en la concentración de fósforo. Sin embargo, en el río Itata se evidencia un incremento que podría explicarse por el desarrollo forestal alcanzado en la cuenca durante la década 1990-2000. Se debe observar la evolución de estos nutrientes que podrían permitir detectar los efectos del crecimiento poblacional y el impacto provocado por las actividades agroindustriales, ganaderas, forestales y turísticas en la zona estudiada.

También se debe considerar el comportamiento de la calidad del agua en los lagos de esta zona, cuerpos de agua que se relacionan íntimamente con

Tabla 4. Promedio histórico de concentraciones en 12 ríos de las zonas Norte y Centro de Chile. Datos DGA, durante 21 años (1987-2008)

Cuencas	As ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Cu ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Cr ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Hg ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Cd ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Mo ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Pb ($\mu\text{g L}^{-1}$)	SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)
Endorreicas	814	2.440	28	9	26	60	ND	236,3
Copiapó	483,6	77	60	148	77	60	148	483,6
Huasco	10	123	31	6	93	60	292	360,2
Los Choros	175,6	ND	60	817	ND	60	817	175,7
Elqui	1.705	6.082	26	3	28	70	147	445,7
Limarí	6	41	30	3	35	60	60	77,1
Choapa	14	78	25	4	43	138	63	110,6
Petorca	182	43	54	3	ND	63	ND	52,8
Ligua	54,4	ND	68	ND	ND	68	ND	54,4
Aconcagua	132	789	25	87	ND	175	80	115,1
Maipo	12	1.293	55	9	35	463	167	215,6
Rapel	119,3	45	215	281	45	215	281	119,3
NCh1333.Of78	100	200	100	1	10	10	5.000	250

Fuente: Adaptado de Pizarro *et al.*, 2010b. ND: no disponible; en negritas, excedencias respecto de NCh1333.Of78 para riego. Los valores presentados corresponden a los reportados en la fuente. La metodología empleada para calcular los valores de la Figura 2 entrega concentraciones características menores (por ejemplo, en Copiapó se obtiene en promedio 0,02 y <0,01 mg L⁻¹ para As y Hg respectivamente).

Tabla 5. Promedio de concentración anual de NO₃⁻-N y PO₄³⁻-P de 9 ríos de las zonas Centro y Sur de Chile. Datos DGA de 23 años

Ríos	Rapel	Mataquito	Maule	Itata	Biobío	Imperial	Toltén	Valdivia	Bueno
NO ₃ ⁻ -N (mg L ⁻¹)	1,57	0,55	0,49	0,35	0,21	0,4	0,11	0,31	0,18
PO ₄ ³⁻ -P (mg L ⁻¹)	0,23	0,29	0,24	0,41	0,15	0,23	0,23	0,1	0,12

Fuente: Adaptado de Pizarro *et al.*, 2010a.

los ríos, ya sea porque estos últimos son tributarios o son la descarga natural formando ríos que desembocan en el mar. Los lagos son testigos de las actividades de la cuenca y proveen información de los cambios biogeoquímicos provocados por perturbaciones naturales o antropogénicas, y las aguas de los efluentes que forman son el medio de transporte que influye en el destino final de los productos de dichos cambios. Los lagos de la zona son monomícticos y oligotróficos con bajos niveles de clorofila y alta transparencia (Soto, 2002; Soto & Campos, 1995). La concentración de nitrógeno y fósforo, en las dos últimas décadas, en lagos cuyas cuencas no han sufrido cambios significativos en el uso de suelo y con tendencia a mantener el bosque nativo, muestran variaciones muy bajas, mientras que aquellos donde la cuenca se ha visto más intervenida como resultado del incremento de actividades forestales, turísticas y/o agrícolas, tienden a aumentar estos nutrientes (Pizarro *et al.*, 2016), lo que podría acelerar el proceso de eutrofización que naturalmente sufren los lagos.

Finalmente, la variación de la concentración de nutrientes en los ríos no presenta diferencias sustanciales con la concentración de éstos en los principales ríos del mundo. No se descarta que, de continuar el incremento en las aguas, en un futuro cercano los ríos podrían adquirir la condición de sistemas contaminados. Especial atención se debería tomar en el manejo y planificación de las actividades en las cuencas de los lagos que, si bien en la actualidad se les considera como sistemas oligotróficos, una rápida expansión de la agricultura, crianza de ganado y turismo intensivo podrían aportar aguas con exceso de nutrientes que aceleren el proceso de degradación, el cual en la actualidad está relativamente controlado. Estos estudios podrían servir de referencia para futuros programas de monitoreo y proyectos de mitigación de la contaminación a nivel de cuenca.

6. Procesos de contaminación y descontaminación a escala local: el caso del arsénico en tres cuencas andinas

El arsénico es un elemento tóxico movilizado a través del agua, suelo y aire de manera antrópica y na-

tural. Su principal origen está en los yacimientos geológicos ricos en elementos de interés económico, cuya explotación ha acelerado la disponibilidad de arsénico. Adicionalmente, las fuentes naturales hidrotermales asociadas a la actividad volcánica constituyen importantes aportes de arsénico. A continuación, se presentará la dinámica del arsénico en tres cuencas ubicadas en zonas áridas o semiáridas del norte: ríos Lluta, Loa y Elqui (**Figura 1**). Estos casos sirven para dimensionar la complejidad y los desafíos en entender la especiación de los contaminantes, especialmente de metales y metaloides, la que es determinante en su fraccionamiento entre fases sólidas y disueltas que, a su vez, condiciona su biodisponibilidad.

Cuenca del río Lluta

La cuenca tiene su origen en el Volcán Tacora (~5.500 msnm), desde donde emanan fuentes hidrotermales ricas en metales, metaloides y sales (Capaccioni *et al.*, 2011). Al costado del volcán se encuentra la Azufrera Tacora, abandonada desde los años 60, donde los depósitos de relaves y rocas expuestos al agua y aire dan origen a una corriente de drenaje ácido denominada río Azufre (Leiva *et al.*, 2014). Este afluente, con $\text{pH} < 2$ y concentraciones de arsénico $> 2 \text{ mg L}^{-1}$, es la principal fuente de contaminación del agua en la cuenca. La cuenca del río Lluta es un claro ejemplo de la diversidad y complejidad de procesos biológicos, geoquímicos, hidrológicos e hidrodinámicos que controlan el destino y transporte de contaminantes. A 400 m del nacimiento del río Azufre existe un humedal donde ocurren procesos biogeoquímicos que modifican la especiación de arsénico (Leiva *et al.*, 2014); *e.g.* bacterias extremófilas oxidan el arsénico de arsenito a arsenato, especie menos tóxica y que tiene mayor afinidad a sorberse sobre oxi-hidróxidos de hierro, presentes en el humedal como lodos anaranjados (Leiva *et al.*, 2014). Gracias a estos procesos locales el arsénico disuelto disminuye prácticamente en su totalidad en unos pocos metros. La comprensión de estos procesos es esencial para conocer los determinantes de la calidad del agua, entregando un punto de control fundamental para mejorar o proteger el recurso.

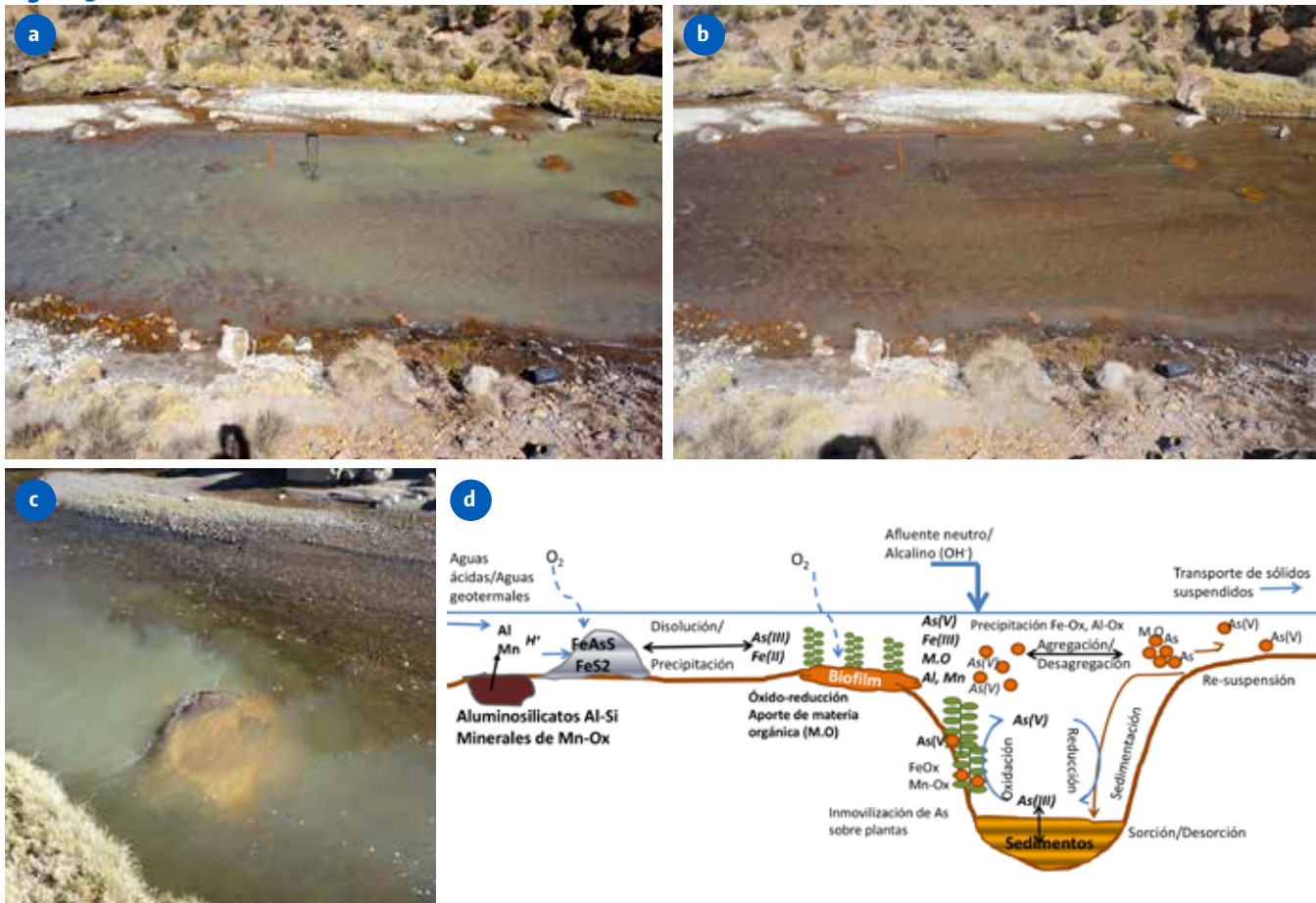
En la confluencia del río Azufre con el río Caracarani ($\text{pH} 8,6$) ocurre una serie de interacciones geoquímicas, hidrológicas e hidrodinámicas

que promueven la formación de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio, modificando el fraccionamiento disuelto y sólido del arsénico (Abarca *et al.*, 2017; Guerra *et al.*, 2016a; Guerra *et al.*, 2016b). Estos precipitados tienden a sedimentar en el lecho del río, reduciendo la concentración de arsénico y metales en el agua: 100 m aguas abajo de la confluencia, el arsénico total disminuye a la mitad. Se han medido concentraciones de arsénico entre 90-900 mg kg⁻¹ en los depósitos del lecho del río Caracarani, muy superior al rango basal en sedimentos (5-10 mg kg⁻¹) (Smedley & Kinniburgh, 2002). Este ejemplo muestra que existen procesos de atenuación natural en los sistemas fluviales, donde el muestreo de sedi-

mentos puede reflejar si el lecho es un repositorio o una fuente de contaminantes.

Este proceso de atenuación en la confluencia puede verse modificado por la presencia de otros elementos y variaciones locales y temporales de caudal. Estudios en el mismo sitio muestran que: (1) la presencia de materia orgánica (presente en sistemas naturales como sustancias húmicas) aumenta el tamaño de los precipitados de oxi-hidróxidos, incrementando así las velocidades de sedimentación y mejorando la remoción de arsénico (Arce *et al.*, 2017), (2) variaciones horarias de caudal debido a ciclos de congelamiento-descongelamiento provoca variaciones del arsénico disuelto (Guerra *et al.*,

Figura 3. Dinámica del arsénico en la cuenca del río Lluta



(a) y (b) Cambio en la concentración de partículas en suspensión por descongelamiento en el río Azufre La figura (a) muestra las partículas antes del descongelamiento aguas arriba; (b) muestra cómo las partículas se disuelven cuando el río Azufre, afluente ácido, se descongela; (c) la mezcla incompleta causa la formación de distintas partículas, que se distribuyen de manera heterogénea; (d) diagrama conceptual de procesos reguladores del destino del arsénico. El arsénico es liberado por procesos naturales (e.g. fuentes hidrotermales) o la oxidación de residuos mineros (e.g. sulfuros), puede ser posteriormente inmovilizado/movilizado por diversos procesos físicos y químicos. Fuente: a, b y c, fotos propias; d, elaboración propia.

2016b). Cuando se descongela el río Azufre, se produce disolución de los sólidos suspendidos (**Figuras 3a y 3b**), mientras que el aumento de caudal del río Caracarani, horas más tarde, diluye las sales y aporta iones OH⁻ para la precipitación de fases minerales de hierro, (3) la mezcla heterogénea que se produce en la vecindad de la confluencia (**Figura 3c**) genera puntos locales que favorecen la precipitación de fases de hierro y retención de arsénico debido al pH y concentraciones de hierro (Guerra *et al.*, 2016a), y (4) el tamaño de partícula también aumenta o disminuye según cómo migran las partículas de un ambiente químico a otro, determinando de esta forma si el arsénico permanece suspendido en fase acuosa o sedimenta sobre el lecho, según sea el tamaño de partícula alcanzado (Abarca *et al.*, 2017). El modelo conceptual de estos procesos se muestra en la **Figura 3d**, que se discute en detalle más adelante.

Más aún, la infraestructura hidráulica también puede impactar el destino de estos contaminantes. Modelos han predicho que la acumulación de sedimentos ricos en arsénico en ambientes anaerobios puede llevar a la liberación de especies reducidas de arsénico, como podría ocurrir en el embalse Chironta (Contreras *et al.*, 2015), actualmente en construcción en el río Lluta (unión del río Caracarani con el río Colpitas). Sin embargo, la presencia de azufre en ambientes anóxicos puede contribuir a la inmovilización de arsenito sobre fases sulfuradas como la mackinawita (FeS) (Vega *et al.*, 2017).

Además de resaltar la importancia de entender los procesos locales en nodos críticos del sistema, el caso del río Lluta muestra las interacciones hidrológicas e hidrodinámicas, con consecuencias específicas para la interacción entre las obras de infraestructura hidráulica y la calidad del agua.

Cuenca del río Loa

El río Loa atraviesa el desierto de Atacama, el más árido del mundo, y constituye el único afluente de aguas superficiales permanente de la Región de Antofagasta. Sus principales tributarios son los ríos Salado, San Pedro y San Salvador. Su agua tiene un uso restringido debido a su pobre calidad (alta salinidad y altas concentraciones de boro y arsénico), especialmente en las cercanías de Antofagasta, situación que se intensifica dada la baja disponibilidad del recurso hídrico y aridez de la región.

La presencia de arsénico en la cuenca se debe principalmente a dos factores: (1) la cuenca está inserta en el cinturón de pórfido cuprífero, donde los yacimientos de Chuquicamata, El Abra y Radomiro Tomic contribuyen al flujo de arsénico debido a la meteorización de los depósitos y a la presencia de relaves mineros (Pell *et al.*, 2013), y (2) el afluente río Salado nace en las fuentes geotermales de El Tatio, que presenta concentraciones de arsénico que superan los 20 mg L⁻¹ (Landrum *et al.*, 2009). Al igual que el río Lluta, existe una serie de procesos biogeoquímicos que controlan la especiación de arsénico en El Tatio. Uno de ellos es la inmovilización del arsénico tanto por la presencia de oxi-hidróxidos de hierro, como por la precipitación de minerales similares a la loellingita (FeAs₂) (Alsina *et al.*, 2014).

La unión del río Salado con el río Loa en la parte alta de la cuenca también provoca una disminución del arsénico, principalmente por efectos de dilución (Romero *et al.*, 2003). Sin embargo, desde la parte alta hasta su desembocadura, su concentración se mantiene dentro de un rango acotado de 1-2 mg L⁻¹, lo que se atribuye a condiciones que no favorecen la adsorción de arsenato y a la falta de tributarios que contribuyan a la dilución de arsénico, sumado a los altos índices de evaporación (Orellana, 1985; Romero *et al.*, 2003). Adicionalmente, el río San Salvador tributa al río Loa en la parte media de la cuenca, aportando también con arsénico al sistema (Romero *et al.*, 2003). Las plantas y algas son importantes para la formación de repositorios de arsénico (Bugeño *et al.*, 2014; Pell *et al.*, 2013). Éstas pueden acumular arsénico, llegando incluso a concentraciones entre 182 y 11.000 mg kg⁻¹ de arsénico en el caso de la especie hiperacumuladora *Chladophora* sp. (Pell *et al.*, 2013). Además, pueden favorecer la acumulación de arsénico en sedimentos, como ocurre en el oasis Quillagua, rico en plantas acuáticas y materia orgánica, el cual presenta un alto enriquecimiento de arsénico en sedimentos en comparación al Tranque Slocman, que carece de macrófitas y presenta un bajo contenido de materia orgánica (Bugeño *et al.*, 2014).

Altas concentraciones de arsénico en la cuenca han sido causa de graves problemas de salud en la población (Ferreo & Sancha, 2006; Smith *et al.*, 2011). Esto ha forzado la instalación de plantas de tratamiento como la Planta del Cerro Topater. La planta desalinizadora de agua de mar ha sido vital

para abastecer a la región de agua potable de buena calidad, en suficiente cantidad y libre de arsénico para las personas, asumiendo el incremento en el costo del agua al utilizar este tipo de tecnología.

Cuenca del río Elqui

La cuenca del río Elqui, en la Región de Coquimbo, es un sistema geoquímicamente complejo donde la composición del agua y de los sedimentos está fuertemente dominada por la actividad hidrotermal y por el legado de la zona minera de El Indio, una zona químicamente reactiva que produce drenaje ácido con altas concentraciones de contaminantes (*e.g.* As > 1 mg L⁻¹) (Oyarzun *et al.*, 2013). Además, la erosión de relaves en el área minera de Talcuna es otra fuente de sedimentos reactivos con altas concentraciones de contaminantes (hasta 340 mg kg⁻¹ de arsénico), los que entran ocasionalmente a la red de drenaje en periodos de crecida.

Al igual que en los ejemplos presentados anteriormente, a lo largo de la cuenca existen procesos que aportan a la disminución de los niveles de metales y arsénico disueltos, principalmente debido a la dilución del flujo originado en la zona de El Indio con otros tributarios como los ríos La Laguna, Inca-guaz, Estero Estrecho y Claro, que son afluentes de buena calidad (Flores *et al.*, 2017). Por ejemplo, al juntarse el río Turbio con el río Claro (dando origen al río Elqui), las concentraciones de arsénico se encuentran en el rango de 0,01-0,1 mg L⁻¹ de arsénico, con un pH en torno a 8 (Espejo *et al.*, 2012; Flores *et al.*, 2017; Oyarzun *et al.*, 2013).

Modelo conceptual para el destino y transporte de arsénico en ambientes andinos

El arsénico en sistemas andinos proviene principalmente de aguas ácidas producidas por la exposición de depósitos mineros y relaves fracturados a agua y oxígeno, como también desde aguas geotermales. Los ejemplos presentados anteriormente dan cuenta de la existencia de una serie de procesos que contribuyen a la atenuación o enriquecimiento de la concentración de arsénico a lo largo de ellas, entre los que se encuentran procesos físicos de sedimentación-resuspensión y reacciones químicas de óxido-reducción, de precipitación-disolución de fases minerales y de adsorción-desorción, los cuales además pueden ser afectados por condiciones hidroló-

gicas e hidrodinámicas, la presencia de otros componentes químicos y la biota, lo que se sintetiza en el diagrama conceptual de la **Figura 3d**.

Este modelo conceptual demuestra claramente la complejidad de la dinámica de contaminantes en sistemas fluviales, de modo que las metodologías de control y muestreo deben considerar más variables y, en algunos casos, una atención especial a la extensión espacial y temporal, para captar de manera adecuada lo que ocurre en cada sitio y poder establecer las medidas de control más adecuadas. Asimismo, este modelo es la base para la generación de modelos que en el futuro permitan evaluar el impacto de obras hidráulicas, alteración en los patrones hidrológicos, o el efecto de otros contaminantes que puedan ingresar al sistema (*e.g.*, nutrientes), revelando así conexiones entre obras de infraestructura, actividades socioeconómicas y la calidad del agua.

7. Gestión de la calidad del agua y desafíos

Aspectos institucionales y normativos

Son varias las instituciones del Estado con competencias y ámbitos de acción relevantes para la gestión de la calidad del agua. En forma directa son 8 (instituciones ambientales indicadas arriba más la DGA y la SISS), existiendo otras instituciones con injerencia en temas de gestión del agua en distintos contextos como la Autoridad Sanitaria del Ministerio de Salud, entre otras. La institucionalidad ambiental fue definida a partir de la Ley 20.417 de 2010 (Ministerio del Medio Ambiente, 2015). Instituciones como la DGA y la SISS juegan roles específicos como la cuantificación de calidad y cantidad del recurso hídrico y la gestión del sistema de concesiones sanitarias, respectivamente.

El Ministerio del Medio Ambiente (MMA) define e implementa los lineamientos políticos y regulatorios, incluyendo aspectos de conservación y desarrollo sostenible, bajo los lineamientos del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (CMS) que propone las políticas al Presidente de la República. Una de sus funciones es gestionar los proyectos de normas, incluyendo las normas secundarias de calidad del agua. El SEA se encarga de administrar el SEIA, un sistema que busca prevenir el deterio-

ro ambiental por proyectos públicos y privados. La evaluación de los proyectos y los actos administrativos del SEIA se encuentran públicamente disponibles y constituyen una fuente importante de información ambiental. Los proyectos que realizan un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y que son aprobados por el SEIA generan una RCA que describe al proyecto aprobado y lista las condiciones aprobadas para su operación. Los recursos de reclamación contra las exigencias establecidas en un EIA son vistas por el Comité de Ministros. La SMA se encarga de la fiscalización y sanción de los incumplimientos de carácter ambiental, por ejemplo, revisando que se cumplan los términos establecidos en las RCA. Finalmente, los Tribunales Ambientales dependientes de la Corte Suprema son encargados de resolver las controversias ambientales. Por ejemplo, recientemente el Tercer Tribunal Ambiental decretó la anulación de la Norma Secundaria de Calidad del Agua del río Valdivia, frente a un recurso presentado por entidades que se consideraron afectadas por esa norma (Tercer Tribunal Ambiental de Chile, 2017). Esto obligó a reanudar el proceso de dictación de la norma, partiendo desde el punto que fue objetado.

La normativa más relevante para la calidad de las aguas considera normas primarias, secundarias y de emisión. Las normas primarias de calidad incluyen norma de calidad de agua para agua potable, riego, aguas minerales y recreación con contacto directo. Las normas secundarias son mucho más recientes (a partir de 2010), e incluyen normas de calidad ambiental de las aguas sólo para dos lagos y la cuenca de tres ríos, encontrándose otras seis en elaboración. Claramente existe un desafío importante para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental de aguas, considerando que la DGA tiene cerca de 100 cuencas en su catastro. Las normas de emisión incluyen limitaciones para la descarga de residuos a aguas superficiales, a las redes de alcantarillado y a las aguas subterráneas. Cabe destacar que existe una norma de emisión específica para el estero Carén –donde El Teniente de la minera estatal Codelco vierte efluentes líquidos–, permitiendo valores de sulfato y molibdeno mayores que para otros lugares del país. La constitucionalidad de esta norma ha sido ampliamente cuestionada, pero el Tribunal Constitucional no acogió el recurso presentado en su contra.

Grandes desafíos para la gestión de calidad del agua

A continuación, se presenta una síntesis de los desafíos que parece necesario abordar para avanzar hacia las metas de la Agenda 2030, desde la perspectiva de los autores. Considerando un enfoque sistémico, algunos de los desafíos se extienden más allá de temas específicos de calidad del agua.

Marco institucional y normativo para una gestión integrada del agua

La fragmentación institucional en la gobernanza del agua en Chile ha sido notoria en el tiempo, con al menos 12 instituciones del Gobierno central que participan en la generación de políticas públicas sobre el agua, el segundo más alto de la región (OECD, 2012). Esta fragmentación ha dificultado el establecimiento de un objetivo común hacia el cual se avance coordinadamente. Sin embargo, en los últimos años se ha avanzado. En 2009 se definió un comité interministerial para coordinar la definición de políticas en temas hídricos (OECD, 2011) y se constituyó el Comité de Ministros del Agua, coordinado por el Ministerio de Obras Públicas y compuesto también por los ministerios de Medio Ambiente, Agricultura, Energía y Minería. Durante 2012 se estableció la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025 (Ministerio de Obras Públicas, 2012), con cinco ejes: gestión eficiente y sostenible, mejorar la institucionalidad, enfrentar la escasez, equidad social y ciudadanía informada. Durante el gobierno siguiente, se definió una Política Nacional de Recursos Hídricos (Ministerio del Interior y Seguridad Pública-Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, 2015) con cuatro ejes: el Estado como agente responsable y participativo, medidas para enfrentar el déficit hídrico, marco regulatorio para los recursos hídricos y fortalecimiento en la participación de las organizaciones sociales. A pesar de tener matices diferentes, estos documentos de política pública reconocen que la multiplicidad de instituciones con injerencia en la gestión de los recursos hídricos es un obstáculo para la coordinación y gestión eficiente del agua, y consecuentemente asignan un rol fundamental a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). Sin embargo, ahora es necesario avanzar en medidas vinculantes que implementen efectivamente este concepto a nivel institucional y normativo.

Una iniciativa clave que facilitaría una gestión integrada es el proyecto de ley presentado en 2011,¹⁰ que modifica el Código de Aguas de 1981. Éste establece el sistema de los derechos de agua en Chile, reconocido como uno de los sistemas más promeritado del mundo (OECD, 2017). La GIRH es así limitada por la preeminencia de los derechos de aprovechamiento de agua (DA), que revisten características de propiedad privada y que son negociables. Esto limita la capacidad del Estado de establecer una visión coordinada de largo plazo con una perspectiva de bienestar común. También impide que los distintos actores públicos y privados se involucren en la definición de estrategias nacionales para el recurso hídrico y se hagan cargo en su conjunto de los *trade-offs* que implica la GIRH (OECD, 2017). Si bien la normativa contempla la existencia de organizaciones de usuarios, ellas son para secciones de ríos, desconociendo las dinámicas que ocurren a nivel de cuenca y la relación entre aguas superficiales y subterráneas. Recientemente se han estudiado modificaciones al Código de Aguas que buscan reforzar el carácter del agua como bien nacional de uso público, e incluyen aspectos como: limitar la extensión temporal de los DA, limitar el ejercicio de los DA en función del interés público a través de su reducción temporal y redistribución, establecer el consumo humano y el saneamiento como usos prioritarios en el otorgamiento y limitación de los DA, prohibición de otorgar DA en Parques Nacionales y Reservas de Región Virgen y restringir en otras áreas protegidas, permitir a la DGA reducir temporalmente el ejercicio de los DA y exigir la instalación de sistemas de medición, entre otros (Ministerio del Interior y Seguridad Pública-Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, 2015).

Definición de políticas públicas basadas en ciencia para la gestión de la calidad del agua

Los procesos físicos, químicos y biológicos que controlan la calidad del agua en sistemas andinos y que determinan el transporte, transformación y destino de contaminantes en sistemas acuáticos son insuficientemente conocidos. Esto es especialmente preocupante en un contexto de cambio global, donde

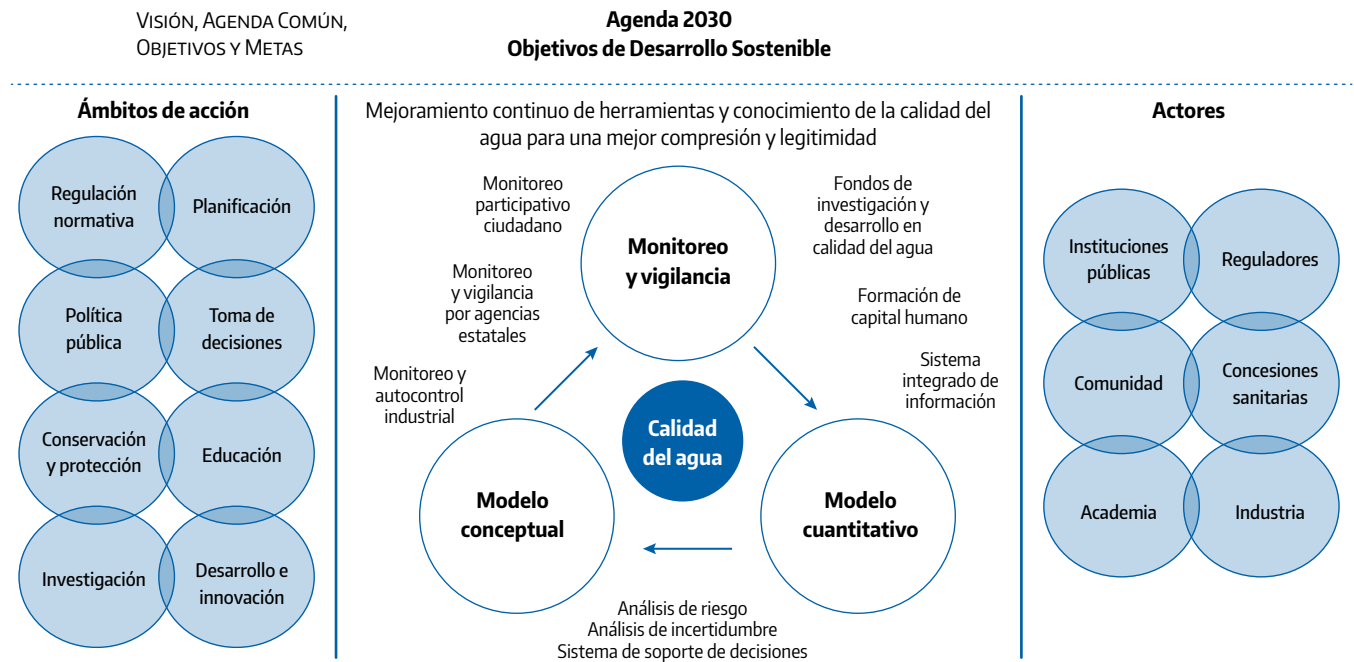
existe una demanda creciente por recursos hídricos, un aumento de la población y un rango amplio de compuestos antropogénicos emitidos al ambiente. Las presiones que afectan la calidad del agua en Chile son múltiples y se distribuyen a lo largo de una variedad de ambientes acuáticos cuyo funcionamiento recién se empieza a conocer.

La calidad del agua es un aspecto central de importantes conflictos sobre recursos hídricos y de las agendas de sostenibilidad, donde intervienen múltiples actores e instituciones. Las interdependencias que se producen en los sistemas socioambientales necesitan que la política pública considere los nexos entre calidad de agua y energía, alimentos, servicios ecosistémicos, patrimonio ambiental y justicia ambiental. La falta de políticas públicas que consideren una GIRH puede afectar el desarrollo sostenible y aumentar la tensión asociada a desarrollos mineros, actividad agrícola y expansión urbana. Esta tensión se ejemplifica actualmente en la cordillera andina de Chile Central, donde las mayores reservas de cobre conocidas en el mundo se encuentran en la cabecera de la cuenca más poblada (Sistema Maipo-Mapocho), cuyos recursos son usados para agua potable y de riego.

La **Figura 4** propone un enfoque para la gestión de la calidad del agua, donde la ciencia juega un rol fundamental como soporte para la toma de decisiones. El mejoramiento continuo del conocimiento y vigilancia de la calidad del agua de nuestros sistemas acuáticos requiere la participación de múltiples actores hacia el logro de una visión común, como la presentada por los ODS de la Agenda 2030. Además, se basa en una retroalimentación continua entre los modelos conceptuales, los modelos cuantitativos y el monitoreo de la calidad del agua, que en su conjunto deberían reflejar la comprensión común del funcionamiento del ambiente. El desarrollo de modelos conceptuales y cuantitativos es la base para lograr una transición desde la "descripción estadística" de la calidad del agua hacia una comprensión más fundamental y, a la vez, operativa de los procesos que la determinan. La visión integrada y sistémica de los procesos constituye una de las bases para construir sistemas adaptativos y resilientes que gestionen adecuadamente riesgos y presiones. La participación de distintos actores (*e.g.* monitoreo participativo ciudadano) en el desarrollo de modelos conceptuales y cuantitativos, así

10. Incluye indicaciones sustitutivas introducidas por el Ejecutivo en 2014. Éstas todavía se discuten en el Congreso a la fecha de elaboración de este documento.

Figura 4. Enfoque propuesto para la toma de decisiones y políticas públicas orientadas a mejorar y proteger la calidad del agua



Fuente: elaboración propia.

como de redes de vigilancia, otorga también mayor legitimidad a los resultados y aporta al desarrollo de un entendimiento común del sistema que debe ser una base para la gestión.

La estrategia nacional de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) para la sostenibilidad de los recursos hídricos (Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo, 2016) propuso cuatro líneas estratégicas: (1) I+D+i para la comprensión de los procesos hidrológicos; (2) I+D+i para la gestión integral de los recursos hídricos; (3) I+D+i para la comprensión de los ecosistemas acuáticos; y (4) desarrollo tecnológico para la sostenibilidad de los recursos hídricos. El desarrollo y financiamiento adecuado de estas líneas estratégicas debería establecer un soporte robusto en el largo plazo.

Un sistema de monitoreo de calidad del agua más comprehensivo

El monitoreo y vigilancia de la calidad del agua es una parte esencial en la gestión de la calidad del agua (Figura 4). El monitoreo y vigilancia debe insertarse en un marco institucional y normativo

con propósitos claros asociados a una GIRH, coherente con la visión, objetivos y metas asociados a la agenda de sostenibilidad. Asimismo, debe existir un financiamiento sustantivo y de largo plazo con alianzas público-privadas para la realización de programas de I+D+i, la formación de capital humano y el establecimiento de sistemas de gestión de información integrados. Debe complementarse con la participación de actores diversos que den viabilidad y legitimidad para una comprensión común de la calidad del agua, con programas de monitoreo participativo, programas de autocontrol de la industria, sumados a la vigilancia desde instituciones estatales (e.g., DGA, SISS, SMA, MMA).

El análisis de las características de la red de monitoreo de calidad y las presiones sobre la calidad del agua en Chile, junto con las prácticas internacionales, permite identificar algunos parámetros que deberían ser considerados en el corto y mediano plazos para incorporarse a campañas de monitoreo en cuerpos de agua, ya sea en la red nacional operada por la DGA o en los siguientes planes de vigilancia de las NSCA:

- a. **Alcalinidad total.** Este parámetro cuantifica la capacidad de resistir la acidificación y es medida por agencias del Gobierno en países desarrollados. Este parámetro es importante para Chile por el potencial latente de generación de drenaje ácido en las cuencas del norte y centro debido al enriquecimiento y movilización de sulfuros metálicos. El drenaje ácido se genera por procesos naturales, así como por las actividades mineras actuales e históricas (*e.g.* cuencas de los ríos Lluta y Elqui).
- b. **Fraccionamiento entre metales totales y disueltos.** La toxicidad y movilidad de los metales en aguas es controlada por su especiación química, es decir, la forma química en que se presentan. Los metales disueltos (*i.e.*, la fracción que puede pasar por una membrana de $0,45\ \mu\text{m}$) son más móviles y biodisponibles que aquellos asociados a partículas. Estos últimos pueden ser depositados en los lechos y removidos bajo condiciones hidrodinámicas favorables, o bien acumulados transitoriamente en lagos y embalses. Las estrategias de gestión para metales dependen, por lo tanto, fuertemente de su fraccionamiento entre fases sólidas y disueltas.
- c. **Turbidez.** Se asocia al grado de transparencia que pierde el agua por la suspensión de partículas inorgánicas y orgánicas y se usa para evaluar el estado de cuerpos de agua, especialmente en relación con la capacidad de sustentar ecosistemas o para recreación. Aunque la turbidez puede tener un origen natural, es posible que también indique procesos de deterioro de la calidad del agua, como descarga de residuos líquidos, neutralización de drenaje ácido o crecimiento de algas fotosintéticas. Asimismo, puede dar cuenta de procesos de erosión de suelos o efectos de contaminación difusa de origen urbano. Aunque se mide en la red de 14 lagos, lagunas y embalses, su uso en aguas superficiales corrientes es recomendado.
- d. **Nutrientes.** Entender sus flujos es esencial para determinar las capacidades de carga de los sistemas lóticos, lo que implicará muy posiblemente adoptar estándares más altos de remoción de nutrientes para plantas de tratamiento de aguas servidas. La medición de las distintas formas de nutrientes en aguas corrientes es necesaria para determinar los flujos hacia los cuerpos de agua, especialmente hacia los lagos en las zonas costeras de Chile. Las principales fuentes de nutrientes hacia los ríos son típicamente las fuentes difusas agrícolas y urbanas, junto a la descarga de aguas servidas tratadas en plantas que no remueven específicamente nitrógeno y fósforo. El crecimiento de algas fotosintéticas en aguas naturales es limitado por la disponibilidad de nutrientes; su aumento acelera la eutrofización y ocurrencia de periodos de anoxia, generando mortandad de peces y aumento de turbiedad.
- e. **Calidad química de los sedimentos.** Los sedimentos pueden ser repositorios de contaminantes en cuerpos de agua, especialmente para metales en el norte y centro de Chile. Los sedimentos tienen el potencial de liberar episódicamente los contaminantes acumulados, gatillado por eventos hidrológicos (*e.g.*, crecidas), manejo de obras hidráulicas (*e.g.* apertura de compuertas, dragado), o procesos que alteren la química de los sedimentos (*e.g.*, derrames, eutrofización). Esto se aprecia claramente en los casos de las cuencas de los ríos Lluta, Loa y Elqui discutidas en secciones previas, y más al sur, notoriamente en las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel.
- f. **Perclorato.** Ocurre junto con el nitrato en ambientes hiperáridos, incluyendo suelos desérticos (Jackson *et al.*, 2015; Parker, 2009) y, especialmente, en caliches y salmueras de los salares del norte de Chile que son materias primas para fertilizantes (Calderon *et al.*, 2014; Jackson *et al.*, 2015; Jackson *et al.*, 2010; Lybrand *et al.*, 2016; Parker, 2009; Renner, 2006). Este compuesto altera el funcionamiento de la glándula tiroides al ser ingerido a bajas concentraciones en el agua potable (Crump *et al.*, 2000; Tellez *et al.*, 2005). Al ser muy soluble y poco reactivo, puede permanecer en las aguas superficiales y subterráneas enriquecidas por procesos naturales y antrópicos (*e.g.*, contaminación difusa por aplicación de fertilizantes), y no es removido en forma relevante por los procesos típicos de tratamiento de agua potable (Srinivasan & Viraraghavan, 2009). Al igual que con los contaminantes emergentes, las metodologías para su detección y cuantificación a niveles traza se encuentran poco disponibles. En California, EUA,

se estableció un objetivo de salud pública para agua potable de 1 ppb (California Environmental Protection Agency, 2015). Esas bajas concentraciones desafían el desempeño analítico de los métodos de cuantificación de perclorato.

- g. **Contaminantes emergentes.** Día a día hay nueva evidencia de la ocurrencia en aguas y/o sedimentos de sustancias químicas con potenciales efectos negativos sobre la salud humana y de ecosistemas acuáticos (Petrie *et al.*, 2015). Muchos de los contaminantes emergentes no son considerados contaminantes prioritarios porque no son incluidos en los protocolos de monitoreo, o las técnicas analíticas no son capaces de detectar concentraciones traza, lo que implica que los registros de su ocurrencia en ambientes acuáticos sean escasos (Murray *et al.*, 2010). Los contaminantes emergentes provienen de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas, descargas industriales, escurrimiento urbano, aguas lluvias y lixiviados de residuos (Wilkinson *et al.*, 2017). Una vez descargados al ambiente son transportados y/o sufren transformaciones químicas, reacciones de sorción (sobre material particulado, micropartículas plásticas, sedimentos) y bioacumulación, siendo degradados por reacciones fotoquímicas, volatilización o por reacciones microbianas (Wilkinson *et al.*, 2017). La propagación de material genético asociado a la resistencia a antibióticos es un tema de especial urgencia (Carraro *et al.*, 2016; Carvalho & Santos, 2016; Martínez, 2009; Vikesland *et al.*, 2017). No sólo es un problema de salud pública y económico, sino también limita la reutilización de aguas tratadas y lodos digeridos desde plantas de tratamiento de aguas servidas (*e.g.* Bondarczuk *et al.*, 2016).

Murray *et al.* (2010) organizan los contaminantes emergentes que se han encontrado ampliamente en ambientes acuáticos en tres categorías, para cada una de las cuales se dispone de evidencia de ocurrencia en Chile: (1) compuestos industriales, (2) pesticidas, y (3) compuestos farmacéuticos y productos de cuidado personal.

Así, es necesario que los sistemas de monitoreo y vigilancia recopilen sistemáticamente información que permita identificar y caracterizar la ocu-

rrencia, y gestionar los contaminantes emergentes, por ejemplo, a través de normas primarias y/o secundarias. Esto involucra un desafío triple: (1) recolectar evidencia que permita asociar ocurrencia con efecto, de modo que su gestión sea basada en el riesgo y sobre la base de datos nacionales; (2) disponer de métodos analíticos que permitan realizar mediciones con un desempeño analítico adecuado y un costo alcanzable; y (3) disponer de tecnologías costo efectivas de control adaptadas a la realidad nacional. Para abordar estos desafíos, el trabajo de las universidades y centros de investigación dentro de una política asertiva de I+D+i juega un rol clave.

Tecnologías sostenibles para el mejoramiento y protección de la calidad del agua

Los sistemas convencionales de lodos activados han demostrado ser una buena alternativa para tratamiento de aguas servidas en ciudades, dado que son capaces de tratar altos caudales y cargas de contaminantes en un espacio reducido (Kadlec & Knight, 1996), pero no necesariamente son la mejor alternativa para áreas rurales, donde a veces han sido abandonados por dificultades en la operación, manutención y financiamiento. Por lo tanto, es necesario evaluar distintas opciones, más sostenibles según las condiciones locales y la disponibilidad de personal requerido para su operación y manutención.

Una opción son los sistemas naturales que, a diferencia de los sistemas convencionales, se basan en la interacción de sus componentes naturales (suelo, vegetación y microorganismos) para la remoción de contaminantes (Crites *et al.*, 2014), por lo que tienen menores costos de inversión y operación. Además, los sistemas naturales se caracterizan por usar fuentes de energía renovables y, por lo tanto, generan menores emisiones de gases invernadero, siendo una alternativa más sostenible comparada con los sistemas convencionales más intensivos en energía proveniente de combustibles fósiles.

Dentro de los sistemas naturales destacan los humedales construidos o artificiales que imitan a los naturales para realizar tratamiento de agua y han sido ampliamente utilizados en distintos lugares del mundo (Kadlec & Wallace, 2009). Su principal aplicación corresponde a tratamiento secundario y terciario de aguas residuales domésticas, siendo capaces de remover una variedad de con-

taminantes incluyendo sólidos suspendidos, material demandante de oxígeno, nutrientes, patógenos, metales y metaloides. Estos sistemas han sido implementados exitosamente a escala domiciliaria y comunitaria principalmente para tratamiento de aguas servidas y grises en distintos lugares de Chile. Algunos ejemplos son un sistema cuyo efluente se usará para regar una ecoplaza en San Pedro de Atacama, en la Región de Atacama, y otro sistema que trata las aguas grises de un colegio en Rungue, en la Región Metropolitana. A escala municipal, existe un sistema piloto que trata aguas servidas de 20.000 habitantes en Hualqui, en la Región de Biobío (Casas Ledón *et al.*, 2017). Recientemente, se han investigado aplicaciones locales a escala de laboratorio, por ejemplo, aguas residuales de la industria porcina (Plaza de los Reyes & Vidal, 2015) y aguas contaminadas con arsénico y metales (Lizama Allende *et al.*, 2014). Esta evidencia indica que es factible utilizarlas en Chile. Además, se requieren más esfuerzos para avanzar en su implementación con aplicaciones distintas a las aguas servidas, considerando principalmente las condiciones locales y la calidad objetivo.

Los humedales construidos pueden cumplir además con otros objetivos, como la recuperación de ecosistemas. Un buen ejemplo corresponde a un humedal centinela, que se construirá en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter en la Región de los Ríos, como parte de las medidas de reparación del daño ambiental debido a las descargas de riles de una industria de celulosa. El principal objetivo del humedal es recibir el primer impacto de disposición de riles de dicha industria, ya que recibirá el efluente del tratamiento terciario de la planta de tratamiento antes de que sea descargado al río Cruces. El humedal ya está diseñado e incorporará especies representativas del humedal del río Cruces, como *Typha angustifolia* (vatro) y *Scirpus californicus* (totora).

Otros sistemas de tratamiento sostenibles corresponden a tecnologías de membranas desaladoras que usan energía solar (Suárez & Urtubia, 2016) o membranas bioactivas para recuperación de bioenergía (hidrógeno) de las aguas residuales (Prieto *et al.*, 2016). Además de los altos requerimientos energéticos de los sistemas convencionales y la creciente demanda hídrica por parte de la actividad industrial, la implementación de las NSCA para pro-

tección de ríos y lagos puede incentivar la búsqueda e implementación de tecnologías amigables con el medio ambiente que permitan mejorar y proteger fuentes de agua para distintos usos.

8. Conclusiones

La interacción compleja entre factores hidrológicos, geológicos, biológicos y humanos determina características hidroquímicas muy heterogéneas a lo largo de Chile. Mientras los ambientes áridos e hiperáridos de la Macrozona Norte se caracterizan por enriquecimiento natural de sales disueltas, metales y metaloides de fuentes hidrotermales, franjas metalogénicas y ambientes evaporíticos, hacia el sur, la menor frecuencia de estas fuentes sumadas a mayores precipitaciones y escorrentía generan mayor dilución, llegando a aguas con escaso contenido de sales disueltas y metales en las Macrozonas Sur y Austral.

La geomorfología del país determina escurrimientos típicos de oriente a poniente, desde las cabeceras de las cuencas en la cordillera de los Andes hasta su desembocadura en el Pacífico. En las Macrozonas Norte y Centro, la actividad minera andina es una presión importante sobre la calidad del recurso hídrico, generando localmente condiciones que favorecen la movilización de metales y metaloides, acidificación de las aguas y aumento de las sales disueltas. El desarrollo de actividades agrícolas y el emplazamiento de los centros urbanos e industriales en los valles de la zona Centro-Sur determinan un aumento de las concentraciones de nutrientes y contaminantes antrópicos que deterioran la calidad de lagos y lagunas, generando condiciones mesotróficas y eutróficas, especialmente en lagos y lagunas en zonas costeras. Hacia la Macrozona Austral, la escasa densidad poblacional y de actividades socioeconómicas determina aguas de calidad excepcional. Allí, la acuicultura es una de las mayores presiones a nivel local, existiendo también algunas presiones localizadas de la ganadería, minería y centros urbanos.

Los niveles de acceso a agua potable segura y saneamiento en el país son altos, gestionado a través de un sistema de concesiones de servicios sanitarios en áreas urbanas que presta servicios al grueso de la población. El cumplimiento de los es-

tándares de calidad del agua potable es alto, existiendo planes para mejorar algunas deficiencias en el cumplimiento en el norte de Chile a través de desalinización. Cerca de 30% de las aguas servidas son dispuestas a través de emisarios submarinos hacia el Océano Pacífico, mientras que de las aguas tratadas sólo 5% contempla la remoción de nutrientes. Junto con mejorar estos aspectos, existe un desafío constante para la industria sanitaria y su regulador, la SISS, de progresar hacia mayor adaptabilidad, resiliencia de la infraestructura sanitaria urbana, junto al desempeño más sostenible y tarifas más bajas. En áreas rurales, el desempeño de Chile a nivel regional es bueno, pero todavía existe un camino por recorrer para llegar a un acceso completo a agua potable y a una gestión segura de aguas servidas.

El desarrollo de estrategias y políticas nacionales para la gestión del recurso hídrico durante los últimos años consideran la GIRH como pilar fundamental, buscando superar limitaciones provenientes de la fragmentación de competencias y agendas entre distintas instituciones del Estado. Adicionalmente, la búsqueda del bienestar común con una visión de largo plazo a través de la GIRH entra en tensión con la preeminencia de los DA establecidos en el Código de Aguas, que revisten características de propiedad privada y que son transables. Se necesita introducir modificaciones al Código de Aguas para una implementación vinculante, efectiva y operativa de la visión del agua como bien nacional de uso público.

Además de un marco institucional y normativo compatible con una GIRH en Chile, existen otros grandes desafíos para el mejoramiento y protección de la calidad del agua, que se pueden resumir en tres áreas: (1) definición de políticas públicas basadas en ciencia donde exista una comprensión común de los procesos que regulan la calidad del

agua, donde el uso de modelos conceptuales y cuantitativos junto a programas de monitoreo y vigilancia son fundamentales en construir, mejorar continuamente y legitimar esta comprensión común para la toma de decisiones; (2) desarrollar e implementar planes de monitoreo y vigilancia de calidad del agua que sean más comprensivos, lo cual implica mejorar la densidad, frecuencia y la cantidad de parámetros de forma coherente con la dinámica de las presiones naturales y antrópicas sobre la calidad del agua y las respuestas de los sistemas acuáticos. Un ejemplo claro de esto es la dinámica de metales y metaloides que tienen fuentes naturales y que pueden ser movilizados por actividades mineras, ejerciendo una presión sobre recursos usados para abastecer ciudades, agricultura y sostener ecosistemas acuáticos. Asimismo, se necesita caracterizar la ocurrencia y transformaciones de contaminantes emergentes con potenciales riesgos sobre la salud humana y ecosistémica; y (3) desarrollar tecnologías que permitan mejorar y proteger la calidad del agua en formas más sostenibles, considerando el nexo agua-energía-alimentación para disponer de sistemas más adaptables y resilientes.

9. Agradecimientos

Este trabajo contó con el apoyo de los proyectos FONDAP 15110020 y FONDECYT 1161337. Agradecemos la información entregada por la DGA y SISS. Agradecemos las sugerencias y comentarios entregados por Mónica Musalem de la DGA. También, agradecemos el trabajo de Guillermo Arce y Pablo Moya del CEDEUS en la revisión de documento y preparación de algunas tablas y gráficos.

10. Referencias

- Abarca, M. *et al.* (2017). Response of suspended sediment particle size distributions to changes in water chemistry at an Andean mountain stream confluence receiving arsenic rich acid drainage. *Hydrological Processes*, 31(2): 296-307.
- Alsina, M.A. *et al.* (2014). Arsenic speciation in sinter mineralization from a hydrothermal channel of El Tatio geothermal field, Chile. *Journal of Hydrology*, 518: 434-446.
- Aracena, A., Muñoz, G. (2017). *Remoción de Arsénico en el Agua Potable de la Región de Tarapacá*. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS Chile. Iquique, Chile: AIDIS.
- Arce, G. *et al.* (2017). Enhancement of particle aggregation in the presence of organic matter during neutralization of acid drainage in a stream confluence and its effect on arsenic immobilization. *Chemosphere*, 180: 574-583.
- Arumi, J.L., Oyarzun, R., Sandoval, M. (2005). Natural protection against groundwater pollution by nitrates in the Central Valley of Chile. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 50(2): 331-340.
- Bondarczuk, K., Markowicz, A., Piotrowska-Seget, Z. (2016). The urgent need for risk assessment on the antibiotic resistance spread via sewage sludge land application. *Environment International*, 87: 49-55.
- Boyer, E.W. *et al.* (2006). Riverine nitrogen export from the continents to the coasts. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(1): n/a.
- Bugueño, M., Acevedo, S., Bonilla, C., Pizarro, G., Pasten, P. (2014). Differential arsenic binding in the sediments of two sites in Chile's lower Loa River basin. *Science of the Total Environment*, 466: 387-396.
- Bundschuh, J. *et al.* (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. *Sci Total Environ*, 429: 2-35.
- Calderon, R. *et al.* (2014). Perchlorate Levels in Soil and Waters from the Atacama Desert. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 66(2): 155-161.
- California Environmental Protection Agency (2015). *Public Health Goal for Perchlorate in Drinking Water*. California: CEPA.
- Capaccioni, B. *et al.* (2011). Geochemical and isotopic evidences of magmatic inputs in the hydrothermal reservoir feeding the fumarolic discharges of Tacora volcano (northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 208(3): 77-85.
- Carraro, E. *et al.* (2016). Hospital effluents management: Chemical, physical, microbiological risks and legislation in different countries. *Journal of Environmental Management*, 168: 185-199.
- Carvalho, I.T., Santos, L. (2016). Antibiotics in the aquatic environments: A review of the European scenario. *Environment International*, 94: 736-757.
- Casas Ledón, Y., Rivas, A., López, D., Vidal, G. (2017). Life-cycle greenhouse gas emissions assessment and extended exergy accounting of a horizontal-flow constructed wetland for municipal wastewater treatment: A case study in Chile. *Ecological Indicators*, 74: 130-139.
- Comisión Nacional de Medio Ambiente (2003). *Estrategia Nacional de Biodiversidad*.
- Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (2016). *Ciencia e Innovación para los Desafíos del Agua en Chile: Estrategia Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación para la Sostenibilidad de los Recursos Hídricos*. Santiago: CNID.
- Contreras, M.T. *et al.* (2015). Potential accumulation of contaminated sediments in a reservoir of a high-Andean watershed: Morphodynamic connections with geochemical processes. *Water Resources Research*, 51(5): 3181-3192.
- Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., Bastian, R.K., Reed, S.C. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Crump, C. *et al.* (2000). Does perchlorate in drinking water affect thyroid function in newborns or school-age children? *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 42(6): 603-612.
- Dadea, C., Fanfani, L., Keegan, T.J., Farago, M., Thornton, I. (2001). Sequential extraction in stream sediments from the Loa basin (Northern Chile). *Water-Rock Interaction*, Vols 1 and 2: 1055-1058.
- Dirección General de Aguas (2014). *Análisis crítico de la red de calidad de aguas superficiales y subterráneas de la DGA*. S.I.T N° 337. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos.

- Dirección General de Aguas (2016). *Atlas del Agua Chile 2016*. Serie de Estudios Básicos DGA. Santiago, Chile: DGA.
- Donoso, G., Cancino, J., Magri, A. (1999). Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile. *Water Science and Technology*, 39(3): 49-60.
- Dumont, E., Harrison, J.A., Kroeze, C., Bakker, E.J., Seitzinger, S.P. (2005). Global distribution and sources of dissolved inorganic nitrogen export to the coastal zone: Results from a spatially explicit, global model. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4): GB4S02.
- Espejo, L. *et al.* (2012). Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North-Central Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(9): 5571-5588.
- European Environment Agency (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*. Technical report No.25. Copenhagen European Environment Agency.
- Evans, G.W. & Kantrowitz, E. (2002). Socioeconomic status and health: The potential role of environmental risk exposure. *Annual Review of Public Health*, 23: 303-331.
- Fernandez, E., Grilli, A., Alvarez, D., Aravena, R. (2017). Evaluation of nitrate levels in groundwater under agricultural fields in two pilot areas in central Chile: A hydrogeological and geochemical approach. *Hydrological Processes*, 31(6): 1206-1224.
- Ferreccio, C., Sancha, A.M. (2006). Arsenic exposure and its impact on health in Chile. *J Health Popul Nutr*, 24(2): 164-75.
- Flores, M. *et al.* (2017). Surface water quality in a sulfide mineral-rich arid zone in North-Central Chile: Learning from a complex past, addressing an uncertain future. *Hydrological Processes*, 31(3): 498-513.
- Fuentes, I., Casanova, M., Seguel, O., Najera, F., Salazar, O. (2014). Morphophysical pedotransfer functions for groundwater pollution by nitrate leaching in Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(3): 340-348.
- Gaete, H., Aranguiz, F., Cienfuegos, G., Tejos, M. (2007). Heavy metals and toxicity of waters of the aconcagua river in Chile. *Quimica Nova*, 30(4): 885-891.
- Galleguillos, G., Oyarzun, J., Maturana, H., Oyarzun, R. (2008). Arsenic capture in dams: the Elqui River case, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23(3): 29-36.
- Gibbs, P.J., Miskiewicz, A.G. (1995). Heavy-Metals in Fish Near a Major Primary-Treatment Sewage Plant Outfall. *Marine Pollution Bulletin*, 30(10): 667-674.
- Gobierno de Chile (2017). *Informe de Diagnóstico e Implementación de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Chile*.
- Guerra, P., Gonzalez, C., Escauriza, C., Pizarro, G., Pasten, P. (2016a). Incomplete Mixing in the Fate and Transport of Arsenic at a River Affected by Acid Drainage. *Water Air and Soil Pollution*, 227(3): 20.
- Guerra, P. *et al.* (2016b). Daily Freeze-Thaw Cycles Affect the Transport of Metals in Streams Affected by Acid Drainage. *Water*, 8(3).
- Hansen, A.M. (2012). Lake sediment cores as indicators of historical metal(loid) accumulation - A case study in Mexico. *Applied Geochemistry*, 27(9): 1745-1752.
- Instituto Nacional de Estadísticas (2015). *Compendio Estadístico*. Santiago de Chile.
- Iturriaga, S., Baixas, J.I., Croxatto, F., Ibieta, P., Quintana, F. (2013). TEAM MAPOCHO 42K, 2013. *Arq* (85): 82-87.
- Jackson, W.A. *et al.* (2015). Global patterns and environmental controls of perchlorate and nitrate co-occurrence in arid and semi-arid environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164: 502-522.
- Jackson, W.A., Bohlke, J.K., Gu, B.H., Hatzinger, P.B., Sturchio, N.C. (2010). Isotopic Composition and Origin of Indigenous Natural Perchlorate and Co-Occurring Nitrate in the Southwestern United States. *Environmental Science & Technology*, 44(13): 4869-4876.
- Kadlec, R., Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kadlec, R.H., Knight, R.L. (1996). *Treatment wetlands*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Landrum, J. *et al.* (2009). Partitioning geochemistry of arsenic and antimony, El Tatio Geysir Field, Chile. *Applied Geochemistry*, 24(4): 664-676.
- Leiva, E. *et al.* (2014). Natural attenuation process via microbial oxidation of arsenic in a high Andean watershed. *Science of the Total Environment*, 466: 490-502.

- Lizama Allende, K., McCarthy, D.T., Fletcher, T.D. (2014). The influence of media type on removal of arsenic, iron and boron from acidic wastewater in horizontal flow wetland microcosms planted with *Phragmites australis*. *Chemical Engineering Journal*, 246(0): 217-228.
- Lybrand, R.A. et al. (2016). Nitrate, perchlorate, and iodate co-occur in coastal and inland deserts on Earth. *Chemical Geology*, 442: 174-186.
- Magaritz, M., Aravena, R., Pena, H., Suzuki, O., Grilli, A. (1990). Source of Ground-Water in the Deserts of Northern Chile - Evidence of Deep Circulation of Ground-Water from The Andes. *Ground Water*, 28(4): 513-517.
- Martinez, J.L. (2009). Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants. *Environmental Pollution*, 157(11): 2893-2902.
- Meybeck, M. (1982). Carbon, nitrogen and phosphorous transport by world rivers. *American Journal of Science*, 282: 401-450.
- Ministerio de Obras Públicas (2012). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025*.
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública-Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015*.
- Ministerio del Medio Ambiente (2013). *Estrategia Nacional de Crecimiento Verde*.
- Ministerio del Medio Ambiente (2015). *Organigrama de la Institucionalidad Ambiental-Chile 2015*.
- Ministerio del Medio Ambiente (2016). Plan Nacional de Cuentas Ambientales. In: *Ambiental*, D.d.I.y.E. (Editor).
- Ministerio del Medio Ambiente (2017a). *Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes*.
- Ministerio del Medio Ambiente (2017b). Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente. In: *Ambiental*, D.d.I.y.E. (Editor).
- Ministerio del Medio Ambiente (2018). *Consejo de Ministros para la Sustentabilidad aprueba nueva Estrategia Nacional de Biodiversidad para la próxima década*.
- Ministerio de Relaciones Exteriores (2016). Decreto 49. Crea Consejo Nacional para la Implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Chile.
- Montecinos, M. et al. (2016). *Persistence of Metal-rich Particles Downstream Zones of Acid Drainage Mining in Andean Rivers*. Fall Meeting American Geophysical Union, San Francisco, USA.
- Murray, K.E., Thomas, S.M., Bodour, A.A. (2010). Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the freshwater environment. *Environmental Pollution*, 158(12): 3462-3471.
- OECD (2011). *Water Governance in OECD Countries: A Multi-level Approach*. OECD Studies on Water. OECD Publishing.
- OECD (2012). *Water Governance in Latin America and the Caribbean*. OECD Publishing.
- OECD (2017). *Gaps and Governance Standards of Public Infrastructure in Chile: Infrastructure Governance Review*. OECD Publishing, Paris.
- Orellana, S. (1985). *Hidrogeoquímica del río Loa: un prototipo para el estudio de hoyas hidrográficas en el norte de Chile*.
- Oyarzun, J. et al. (2013). Hydrochemical and isotopic patterns in a calc-alkaline Cu- and Au-rich arid Andean basin: The Elqui River watershed, North Central Chile. *Applied Geochemistry*, 33: 50-63.
- Oyarzun, J. et al. (2012). Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 115: 47-58.
- Parker, D.R. (2009). Perchlorate in the environment: the emerging emphasis on natural occurrence. *Environmental Chemistry*, 6(1): 10-27.
- Pasten, P. et al. (2015). Geochemical and Hydrologic Controls of Copper-Rich Surface Waters in the Yerba Loca-Mapocho System, American Geophysical Union, Fall Meeting 2015. *American Geophysical Union*, San Francisco, USA.
- Pell, A. et al. (2013). Occurrence of arsenic species in algae and freshwater plants of an extreme arid region in northern Chile, the Loa River Basin. *Chemosphere*, 90(2): 556-64.
- Petrie, B., Barden, R., Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*, 72: 3-27.
- Pflieger, G. (2008). Achieving universal access to drinking water and sanitation networks in Santiago de Chile: An historical analysis 1970-1995. *Journal of Urban Technology*, 15(1): 19-51.
- Pizarro, J., Rubio, M.A., Castillo, X. (2003). Study of chemical speciation in sediments: An approach

- to vertical metals distribution in Rapel reservoir (Chile). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 48(3): 45-50.
- Pizarro, J., Rubio, M.A., Matta, A. (2009). Difussion of Fe, Mn, Mo and Sb in the Sediment-Water Interface of a Shallow Lake, Laguna Caren, Santiago (Chile). *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(12): 2336-2344.
- Pizarro, J., Vergara, P.M., Cerda, S., Briones, D. (2016). Cooling and eutrophication of southern Chilean lakes. *Science of The Total Environment*, 541: 683-691.
- Pizarro, J., Vergara, P.M., Rodriguez, J.A., Sanhueza, P.A., Castro, S.A. (2010a). Nutrients dynamics in the main river basins of the centre-southern region of Chile. *J Hazard Mater*, 175(1-3): 608-13.
- Pizarro, J., Vergara, P.M., Rodriguez, J.A., Valenzuela, A.M. (2010b). Heavy metals in northern Chilean rivers: spatial variation and temporal trends. *J Hazard Mater*, 181(1-3): 747-54.
- Plaza de los Reyes, C., Vidal, G. (2015). Effect of variations in the nitrogen loading rate and seasonality on the operation of a free water surface constructed wetland for treatment of swine wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 50(13): 1324-1332.
- Prieto, A.L. *et al.* (2016). Performance of a composite bioactive membrane for H₂ production and capture from high strength wastewater. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2(5): 848-857.
- Renner, R. (2006). Fertilizer from Chile puts perchlorate on the table. *Environmental Science & Technology*, 40(21): 6524-6525.
- Ribbe, L., Delgado, P., Salgado, E., Flugel, W.A. (2008). Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pochay watershed, Chile. *Desalination*, 226(1-3): 13-20.
- Ribeiro, L. *et al.* (2014). Water Quality Assessment of the Mining-Impacted Elqui River Basin, Chile. *Mine Water and the Environment*, 33(2): 165-176.
- Roberts, P.J.W. *et al.* (2010). *Marine wastewater outfalls and treatment systems*. Colchester: IWA Publishing, 528 pp.
- Romero, L. *et al.* (2003). Arsenic enrichment in waters and sediments of the Rio Loa (Second Region, Chile). *Applied Geochemistry*, 18(9): 1399-1416.
- Roth, F., Lessa, G.C., Wild, C., Kikuchi, R.K.P., Naumann, M.S. (2016). Impacts of a high-discharge submarine sewage outfall on water quality in the coastal zone of Salvador (Bahia, Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 106(1-2): 43-48.
- Segura, R., Arancibia, V., Zuniga, M., Pasten, P. (2006). Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 91(1-3): 71-80.
- SISS (2013). *SISS fiscaliza avances de obras de empresa NOVAGUAS para mitigar presencia de arsénico en agua potable*.
- SISS (2014). <http://www.siss.cl/577/w3-article-11091.html>.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17: 517-568.
- Smith, A.H. *et al.* (2011). Evidence from Chile that arsenic in drinking water may increase mortality from pulmonary tuberculosis. *Am J Epidemiol*, 173(4): 414-20.
- Smith, S.V. *et al.* (2003). Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean. *Bioscience*, 53(3): 235-245.
- Smith, S.V.a.S.D.Pa.T.-M.L.a.B.J.D.a.S.P.T.a.R.N. (2002). Nitrogen in aquatic ecosystems. *Ambio*, 31: 102-112.
- Soto, D. (2002). Oligotrophic patterns in southern Chilean lakes: the relevance of nutrients and mixing depth. *Revista Chilena de Historia Natural*, 75(2): 377-393.
- Soto, D., Campos, H. (1995). Los lagos oligotróficos asociados al Bosque templado húmedo del sur de Chile. En: Armesto, M., Khalin, C., Villagrán, C. (Eds.). *Ecología de los bosques templados de Chile*. Santiago: Editorial Universitaria. pp. 134-148.
- Srinivasan, A., Viraraghavan, T. (2009). Perchlorate: Health Effects and Technologies for Its Removal from Water Resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(4): 1418-1442.
- Suárez, F., Urtubia, R. (2016). Tackling the water-energy nexus: an assessment of membrane distillation driven by salt-gradient solar ponds. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(6): 1697-1712.
- Tapia, J., Audry, S. (2013). Control of early diagenesis processes on trace metal (Cu, Zn, Cd, Pb and U) and metalloid (As, Sb) behaviors in mining-

- and smelting-impacted lacustrine environments of the Bolivian Altiplano. *Applied Geochemistry*, 31: 60-78.
- Tapia, J. *et al.* (2009). Study of the copper, chromium and lead content in Mugil cephalus and Eleginops maclovinus obtained in the mouths of the Maule and Mataquito rivers (Maule Region, Chile). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 54(1): 36-39.
- Tellez, R.T. *et al.* (2005). Long-term environmental exposure to perchlorate through drinking water and thyroid function during pregnancy and the neonatal period. *Thyroid*, 15(9): 963-975.
- Tercer Tribunal Ambiental de Chile (2017). *Corte Suprema confirma fallo de Tribunal sobre norma de calidad ambiental de la cuenca del río Valdivia*.
- Thapalia, A., Borrok, D.M., Van Metre, P.C., Musgrove, M., Landa, E.R. (2010). Zn and Cu Isotopes as Tracers of Anthropogenic Contamination in a Sediment Core from an Urban Lake. *Environmental Science & Technology*, 44(5): 1544-1550.
- UN Water (2017a). *Integrated Monitoring Guide for Sustainable Development Goal 6 on Water and Sanitation – Targets and global indicators*.
- UN Water (2017b). *Step-by-step Methodology for Indicator 6.3.2 on Ambient Water Quality*.
- UN Water (2017c). *Step-by-step Monitoring Methodology for SDG Indicator 6.6.1 on water-related ecosystems*.
- United Nations (2001). *Road map towards the implementation of the United Nations Millennium Declaration: report of the Secretary-General, A/56/326*, 6 September. New York: UN.
- United Nations (2015). *Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. In: General Assembly (Editor), A/RES/70/1, 21 October.
- United Nations World Water Assessment Programme (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. Paris: UNESCO.
- VanDerslice, J. (2011). Drinking Water Infrastructure and Environmental Disparities: Evidence and Methodological Considerations. *American Journal of Public Health*, 101: S109-S114.
- Vega, A.S., Lizama, K., Pastén, P. (2018). Water Quality: Trends and Challenges. In: Donoso, G. (Ed.), *Water Policy in Chile. Global Issues in Water Policy*, pp. 255.
- Vega, A.S., Planer-Friedrich, B., Pasten, P.A. (2017). Arsenite and arsenate immobilization by preformed and concurrently formed disordered mackinawite (FeS). *Chemical Geology*, 475: 62-75.
- Vikesland, P.J. *et al.* (2017). Toward a Comprehensive Strategy to Mitigate Dissemination of Environmental Sources of Antibiotic Resistance. *Environmental Science & Technology*, 51(22): 13061-13069.
- WHO, UNICEF (2017a). JMP launch version July 12 2017. *Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene - 2017 Update and SDG Baselines*.
- WHO, UNICEF (2017b). *Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: Annexes*.
- Wilkinson, J., Hooda, P.S., Barker, J., Barton, S., Swinden, J. (2017). Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water: An overarching review of the field. *Environmental Pollution*, 231: 954-970.
- Yang, H.D., Rose, N.L. (2003). Distribution of mercury in six lake sediment cores across the UK. *Science of the Total Environment*, 304(1-3): 391-404.
- Yevenes, M.A., Arumi, J.L., Farias, L. (2016). Unravel biophysical factors on river water quality response in Chilean Central-Southern watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(5): 17.