



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
ESCUELA DE PREVENCIÓN DE RIESGOS Y
MEDIOAMBIENTE

“Evaluación del efecto de la actividad minera en la calidad de aguas subterráneas según la Norma Chilena 409/1. Of 2005: el caso de la Planta Delta, ENAMI, Ovalle, Región de Coquimbo”

Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión Ambiental

Ulises Alejandro Romero Salinas

Profesor Guía: Ernesto Cortés Pizarro

COQUIMBO, AGOSTO DE 2017



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

Los miembros de esta comisión designada para revisar la tesis de Magíster de ULISES ALEJANDRO ROMERO SALINAS, la han encontrado satisfactoria y recomienda que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Magíster en Gestión Ambiental.

Fecha :

Aprobado Comisión de Calificación

Dr. Juan Macchiavello Armengol
Decano

Dr. Ernesto Cortés Pizarro
Profesor Guía

Dr. Alonso Vega Reyes
Profesor Corrector

M.Sc. Luis Caillaux S.
Profesor Corrector



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

DECLARACION DEL AUTOR

Se permiten citas breves sin permiso especial de la Institución o autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. En cualquier otra circunstancia, se deberá solicitar permiso de la Institución o el autor.

ULISES ALEJANDRO ROMERO SALINAS

AGRADECIMIENTOS

Es difícil ordenar las gracias por el apoyo brindado durante la parte lectiva del magister y su prolongada tesis. En estas primeras líneas agradezco a todas y todos los que me brindaron su amistad durante este período.

Partiré por la parte formal. A Alonso le agradezco su paciencia y el apoyo demostrado durante este largo período, las cosas al final nos salieron bien. Agradezco, además, a Ernesto Cortés, profe guía, que ayudó a estructurar de mejor manera el escrito y a Luis Caillaux, que con sus aportes y ojo de cóndor pudo encontrar los detalles a mejorar.

En este largo periodo, desde marzo de 2010, agradezco muy especialmente a mi Loreto, esposa mía, sin duda tu aliento constante e inconmensurable amor, me dio las fuerzas necesarias para llegar a buen puerto. A mis retoñas, Emilia y Aielén, quienes desde la dulzura de sus ojos me otorgaron el newen para ganarle al cansancio mental de las extensas jornadas laborales.

No puedo dejar afuera mi madrecita, quien en la distancia aplicaba su látigo maternal para que terminara lo comenzado. A mis hermanitas, Bárbara y Natalia, gracias por alentarme a tomar este post grado.

Finalmente, mis agradecimientos a los y las cumpas del Mg, en especial a la Paulita e Ignacio, quienes me ayudaron y alentaron cada vez que se los solicité.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
3.1. Material	8
3.1.1. Base de datos. Antecedentes generales	8
3.1.2. Base de datos. Antecedentes específicos: Pozos de extracción y control de aguas.....	9
3.1.2.1. Pozos de aducción.....	9
3.1.2.2. Pozos de control.....	10
3.1.3. Datos a utilizar	11
3.2. Métodos.....	14
3.2.1. Revisión de antecedentes ambientales, bibliográficos y de actividades productivas relacionadas a la temática en estudio	14
3.2.2. Análisis del comportamiento de parámetros de calidad de aguas en los pozos de aducción y control de la Planta Delta, de acuerdo a la NCh 409.....	14
3.2.3. Definición de criterios para la identificación y evaluación de efectos de la actividad minera sobre la calidad del agua en los pozos de la Planta Delta	14
3.2.4. Aplicación de criterios	16
4. RESULTADOS	17
4.1. Revisión de antecedentes ambientales, bibliográficos y de actividades productivas relacionadas al Proyecto Delta.....	17

4.1.1.	Antecedentes bibliográficos	17
4.1.1.1.	Conceptos generales sobre las aguas subterráneas	17
4.1.1.2.	Contaminación y vulnerabilidad de las cuencas subterráneas	19
4.1.1.3.	Conceptos acerca de la calidad de aguas	21
4.1.1.4.	Calidad de las aguas en Chile	22
4.1.1.5.	Normativa chilena sobre la calidad de aguas.....	23
4.1.2.	Antecedentes ambientales	24
4.1.2.1.	Efecto de las formaciones geológicas sobre las aguas subterráneas.....	24
4.1.2.2.	Calidad de las aguas subterráneas en el norte de Chile	25
4.1.2.3.	Minería y efectos sobre el agua	25
4.1.3.	Antecedentes sobre la actividad productiva.....	29
4.1.3.1.	Breve descripción de procesos de obtención de cobre	29
4.1.4.	Antecedentes del proyecto Delta.....	31
4.1.4.1.	Antecedentes históricos de la Mina Panulcillo	31
4.1.4.2.	Hidrogeología	31
4.1.4.3.	Litología.....	32
4.1.4.4.	Unidades hidrogeológicas.....	32
4.1.4.4.1.	Cuenca Talhuén	33
4.1.4.4.2.	Cuenca Rincón del Sauce	34
4.1.4.5.	Balance hídrico	34
4.1.4.5.1.	Procesos de recarga y descarga	34
4.1.4.5.2.	Flujo de agua subterránea.....	35
4.1.4.6.	Sobre los procesos, materiales de entrada y residuos de producción de la Planta Delta	36
4.1.4.6.1.	Mina Panulcillo	36

4.1.4.6.2.	Proceso de flotación	36
4.1.4.6.3.	Proceso de lixiviación	37
4.1.4.6.4.	Residuos domésticos, Residuos Peligrosos, Residuos industriales y plantas de tratamiento de aguas servidas	38
4.1.4.7.	Principales fuentes de contaminación de aguas subterráneas identificadas en el EIA	38
4.2.	Comportamiento de todos los parámetros.....	40
4.3.	Criterio 1: parámetros sobre la norma.....	40
4.3.1.	Hierro (Fe).....	41
4.3.2.	Manganeso (Mn).....	44
4.3.3.	Arsénico (As)	45
4.3.4.	Plomo (Pb)	47
4.3.5.	Cadmio (Cd).....	49
4.3.6.	Selenio (Se).....	50
4.3.7.	Cianuro total (CN).....	52
4.3.8.	Mercurio (Hg)	53
4.3.9.	pH.....	55
4.3.10.	Sólidos disueltos totales (SDT)	56
4.3.11.	Turbiedad.....	58
4.4.	Criterio 2: total de ocasiones sobre norma por tipo de pozo.....	59
4.5.	Criterio 3: total de ocasiones sobre norma por pozo.....	60
4.6.	Criterio 4: total de ocasiones sobre norma por mes	61
4.7.	Criterio 5: comparación de ocasiones sobre norma por pozo según datos de línea base y operación	62
5.	DISCUSIÓN	64
5.1.	Criterio 1: selección de parámetros fuera de norma.....	65

5.2.	Criterio 2: total de ocasiones sobre norma por tipo de pozo.....	72
5.3.	Criterio 3: total de ocasiones sobre norma por pozo.....	73
5.4.	Criterio 4: total de ocasiones sobre norma por mes	73
5.5.	Criterio 5: comparación de ocasiones sobre norma por pozo según datos de línea base y operación	74
6.	RECOMENDACIONES	77
7.	CONCLUSIONES	79
8.	BIBLIOGRAFÍA	82
9.	ANEXOS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Ubicación de la Planta Delta, Comuna de Ovalle.....	8
Figura N° 2: ubicación de pozos de extracción de agua fresca, T2, T3 y T4. El polígono amarillo representa la ubicación aproximada de la cuenca Rincón del Sauce.....	10
Figura N° 3: Ubicación pozos de control PC-EM, PC-1-PL, PC-2-PL, PC-1-DR, PC-2-DR y PC-EM.....	11
Figura N° 4: Caracterización iónica (diagrama de Stiff) de aguas subterráneas cuenca Rincón del Sauce de línea base de monitoreos.	70

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1: Porcentaje de datos monitoreados por pozo según período de línea base y operación.....	13
Gráfico N° 2: Comportamiento del Hierro en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,3 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	43
Gráfico N° 3: Comportamiento del Hierro en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,3 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	43
Gráfico N° 4: Comportamiento del Manganeso en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,1 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	45
Gráfico N° 5: Comportamiento del Manganeso en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,1 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	45
Gráfico N° 6: Comportamiento del Arsénico en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	46
Gráfico N° 7: Comportamiento del Arsénico en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	47
Gráfico N° 8: Comportamiento del Plomo en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	48
Gráfico N° 9: Comportamiento del Plomo en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	48
Gráfico N° 10: Comportamiento del Cadmio en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	49

Gráfico N° 11: Comportamiento del Cadmio en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	50
Gráfico N° 12: Comportamiento del Selenio en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	51
Gráfico N° 13: Comportamiento del Selenio en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	51
Gráfico N° 14: Comportamiento del Cianuro total en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	52
Gráfico N° 15: Comportamiento del Cianuro total en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	53
Gráfico N° 16: Comportamiento del Mercurio en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,001 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	54
Gráfico N° 17: Comportamiento del Mercurio en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,001 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	54
Gráfico N° 18: Comportamiento del pH en los pozos de control, respecto del límite normativo (6,5 – 8,5), NCh 409/1 of. 2005.....	55
Gráfico N° 19: Comportamiento del pH en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (6,5 – 8,5), NCh 409/1 of. 2005.....	56
Gráfico N° 20: Comportamiento de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en los pozos de control, respecto del límite normativo (1.500 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	57
Gráfico N° 21: Comportamiento de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (1.500 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.....	57
Gráfico N° 22: Comportamiento de la Turbiedad en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (≥ 2 UNT), NCh 409/1 of. 2005.....	59
Gráfico N° 23: Total de ocasiones sobre norma por pozo.....	60
Gráfico N° 24: Serie temporal mensual de número de ocasiones sobre norma por total de parámetros. El mes de agosto de 2009 no se realizó tomas de muestras de ningún pozo.....	61

Gráfico N° 25: Número de ocasiones sobre norma por pozo según período de línea base (LB) y operaciones (Op).	62
Gráfico N° 26: Número de ocasiones sobre norma por pozo y parámetro, según período de línea base (LB) y operaciones (Op).	63

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Porcentaje de monitoreos efectuados por tipo de pozo, según período.....	13
Tabla N° 2: Valores composicionales representativos de las aguas naturales.	22
Tabla N° 3: Calidad de Aguas Subterráneas en Chile. Parámetros cuya concentración exceden valores de la NCh 409/1. Of2005.....	25
Tabla N° 4: Estimación del flujo pasante según la ecuación de flujo pasante de Darcy.	35
Tabla N° 5: Composición mineralógica 100% base mineral a muestras de cabeza de mina Panulcillo.	36
Tabla N° 6: Materias primas e insumos Planta de Flotación	37
Tabla N° 7: Impactos en los Recursos Hídricos Subterráneos y Actividades Asociadas	39
Tabla N° 8: Resumen de ocasiones sobre norma por pozo y parámetro.....	40
Tabla N° 9: Fechas en que Hierro superó NCh 409/1. Of2005.	42
Tabla N° 10: Fechas en que Manganeso superó NCh 409/1. Of2005.	44
Tabla N° 11: Fechas en que Arsénico superó NCh 409/1. Of2005.	46
Tabla N° 12: Fechas en que Plomo superó NCh 409/1. Of2005.	47
Tabla N° 13: Fechas en que Cadmio superó NCh 409/1. Of2005.	49
Tabla N° 14: Fechas en que Selenio superó NCh 409/1. Of2005.....	50
Tabla N° 15: Fechas en que Cianuro Total superó NCh 409/1. Of2005.	52
Tabla N° 16: Fechas en que Mercurio superó NCh 409/1. Of2005.....	53
Tabla N° 17: Fechas en que pH superó NCh 409/1. Of2005.....	55
Tabla N° 18: Fecha en que los Sólidos disueltos totales (SDT) superaron la NCh 409/1. Of2005.	56
Tabla N° 19: Fechas en que Turbiedad superó NCh 409/1. Of2005.	58

Tabla N° 20: Resumen de ocasiones totales en que cada parámetro superó la NCh
409/1. Of2005, para los pozos de Control y Aducción de la Planta Delta..... 60

RESUMEN

Las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes para el consumo humano, cada día cobran mayor relevancia en el contexto del cambio climático, el que en las últimas décadas se ha visto acelerado.

Las actividades humanas influyen en la calidad de aguas superficiales y subterráneas. En este sentido, la actividad minera, a través de los residuos que generan sus actividades, pueden ser una fuente relevante en la contaminación de acuíferos.

El presente estudio pretende evaluar el efecto de la actividad minera sobre los parámetros de calidad de aguas subterráneas, según la NCh 409/1. Of2005, de la Planta Delta, Empresa Nacional de Minería, ubicada en la comuna de Ovalle, Región de Coquimbo. Para esta evaluación se utilizaron datos provenientes de los análisis de aguas de los pozos de aducción (del que se extrae agua fresca) y control (pozo utilizado, solamente, para extraer muestras de agua), fechados entre junio de 2009 a mayo de 2013. Entre junio de 2009 a junio de 2010 se considera como línea base de aguas, ya que en esa fecha se realizaron actividades de construcción del proyecto incluidos los pozos de control. Posterior a junio de 2010, la Planta entra en operaciones.

El estudio consideró la revisión bibliográfica de antecedentes ambientales y productivos del proyecto. Además, consideró el análisis de todos los parámetros de los pozos, la generación de criterios que permitieran identificar y evaluar los efectos de la actividad minera sobre los pozos.

De los 47 parámetros estudiados según la NCh 409/1. Of2005, 11 presentaron al menos una ocasión sobre norma (Hierro, Manganeso, Selenio, Cianuro, Arsénico, Cadmio, Mercurio, Plomo, pH, Sólidos Disueltos Totales y Turbiedad). Hierro es el parámetro con mayor número de ocasiones sobre norma, con 88 eventos. Por otra parte, los pozos que presentaron una mayor cantidad de ocasiones sobre la norma fueron el PC-2-DR con 47 eventos y PC-1-EM con 42.

De la evaluación del efecto de la actividad minera de la Planta Delta sobre los parámetros estudiados, se puede concluir que existe un efecto positivo sobre la calidad

de aguas, debido a que la mayor cantidad de alteraciones se produjo durante el período de línea base. Una vez puesta en marcha la operación de las actividades de mina, de línea de chancado, de flotación, lixiviación y del relave de espesados, junto a la puesta en marcha de los sistemas de control de impactos medio ambientales permitieron llevar a la baja la cantidad de ocasiones sobre la norma.

Si bien estos resultados indican un efecto positivo, con el objetivo de consolidarlos; se hace necesario complementarlos con estudios de análisis mineralógico y químico del perfil de suelo que permita dilucidar el aporte natural de características químicas al agua subterránea, análisis mineralógico de relave, entre otros descritos en las recomendaciones.

ABSTRACT

Groundwater is one of the main sources of human consumption, and is becoming increasingly relevant in the context of climate change, which in recent decades has accelerated.

Human activities influence the quality of surface water and groundwater. In this sense, the mining activity, through the waste generated by its activities, can be a relevant source in the contamination of aquifers.

The present study intends to evaluate the effect of the mining activity on the parameters of groundwater quality, according to NCh 409/1. Of2005, of the Planta Delta, Empresa Nacional de Minería, located in Ovalle, Coquimbo Region, Chile. For this evaluation data was gathered from the analysis of water from the adduction wells (fresh water is extracted) and control (well used only to extract water samples), between June 2009 and May 2013. Between June 2009 and June 2010, it is considered as a base line of water, since at that date, project construction activities even the wells were carried out. After June 2010, Planta Delta starts its operations.

The study included in its literature review, the environmental and productive background of the project. Additionally, it also addresses the analysis of all the parameters of the wells and the application of criteria that allowed to identify and evaluate the effects of the mining activity on the wells.

From 47 parameters studied according to the NCh 409/1. Of2005, 11 had at least one occasion above standard (Iron, Manganese, Selenium, Cyanide, Arsenic, Cadmium, Mercury, Lead, pH, Total Dissolved Solids and Turbidity). Iron is the parameter with the highest number of occasions above the standard, with 88 events. In addition, the wells that presented a greater number of occasions on the standard were the PC-2-DR with 47 events and PC-1-EM with 42.

From the evaluation of the effect of the Planta Delta mining activity on the studied parameters, it can be concluded that exist a positive effect on the water quality, because the greatest number of alterations occurred in the base line period. This indicates that once the operation of the mine started: crushing line, flotation, leachate and thickening

tails operations, along with the implementation of environmental impact control systems, allowed to reduce the number of occasions above the standard.

Although these results indicate a positive effect, with the objective of consolidating them, it is necessary to complement them with mineralogical studies and chemical analysis of the soil profile that allows to elucidate the natural contribution of chemical characteristics to groundwater, mineralogical analysis of tailings, among others described in the recommendations.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento vital. En sus distintos estados constituye un factor esencial en el desarrollo de los múltiples procesos bióticos y abióticos, tales como la fotosíntesis de las plantas para la producción de oxígeno o en la meteorización de rocas en la formación de suelo. Tal es su trascendencia que, sin ella, la vida en nuestro planeta simplemente no existiría.

A pesar de que un 70% de la superficie del planeta es agua, solo un 3% es dulce. De este 3%, el 68,7% se encuentra en las capas de hielo y glaciares, el 30,1% en acuíferos y el 0,9% es de tipo superficial (ríos, lagos, pantanos)¹. Es el agua proveniente de fuentes bajo el suelo la que principalmente se utiliza en el consumo humano y agrícola, en especial en las zonas donde no existen cursos superficiales. Para el caso del consumo humano, el 40% del volumen total consumido en áreas urbanas de Chile proviene de aguas subterráneas, mientras que en el sector rural aumenta a 76% (Pizarro *et al*, 1999; citado por Arumí y Oyarzún, 2006).

El agua también es parte fundamental en actividades productivas tales como la generación de energía, en la industria forestal, agricultura y minería; entre otros rubros. Según datos de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), durante el año 2013 la gran industria del cobre utilizó un total 12,5m³/s de agua fresca; del total de este volumen para empresas ubicadas desde la Primera a Cuarta Regiones; entre el 35 al 90% utilizado corresponde a agua proveniente de acuíferos (Hernández, 2014).

Si bien la extracción de agua es un dato importante a considerar, ya que influye en la disponibilidad de agua de aquellos que la extraen cuenca abajo, también se debe considerar el aspecto de calidad que este cauce presentará después de una actividad productiva como la minería. Entre las fuentes de contaminación de los acuíferos se pueden nombrar los Residuos Industriales Líquidos (RILES), Residuos Sólidos Industriales (RISES), pesticidas y fertilizantes, entre otros, los que pueden incrementar

¹U.S. Geological Survey. El ciclo del agua: Thewatercycle [en línea]

<<http://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>>, [consulta: 20 de noviembre de 2014]

el nivel de compuestos químicos tóxicos en el agua que se utiliza para el consumo humano, la agricultura y la que mantiene el ecosistema (caudal ecológico).

El peligro de contaminación del agua subterránea, está determinado, principalmente, por la vulnerabilidad de contaminación del acuífero y por la carga contaminante que se aplica, será o podría ser aplicada en el medio subterráneo (Foster *et al*, 2002). Esto implica que se deben tomar medidas de control en referencia a los residuos sólidos o líquidos que se produzcan y, de esta manera, disminuir los riesgos de contaminación de suelos, es decir, los riesgos de infiltración o escorrentía hacia cursos de aguas subterráneas. En este sentido, el monitoreo y seguimiento permanente a la calidad del agua permite conocer de manera más precisa el nivel de impacto que una o varias actividades puedan generar, por lo que esta actividad en el largo plazo se transforma en una importante herramienta de gestión ambiental.

En Chile existen dos normas que regulan la calidad de aguas, estas son la Norma 1333/1987 de calidad de agua de riego y la Norma 409/1. Of2005 de calidad de agua potable. Dichas normas explicitan los valores máximos de compuestos químicos o parámetros que pueden estar presentes en el agua, siendo su objetivo el “...*proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen.*”

En el contexto de lo anteriormente expuesto, el presente estudio pretende evaluar el posible efecto de la actividad minera en los parámetros de calidad de agua potable (NCh 409/1. Of2005) en los pozos de aducción y control de la Planta Delta, perteneciente a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), en la comuna de Ovalle, Región de Coquimbo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la actividad minera de la Planta Delta sobre los parámetros de calidad de aguas de los pozos de aducción y control pertenecientes a la empresa, según la Norma Chilena 409/1. Of 2005.

2.2. Objetivos específicos

- Revisar bibliográficamente antecedentes ambientales y productivos relacionados a la temática en estudio.
- Analizar el comportamiento de los parámetros de calidad de aguas en los pozos de aducción y control de la Planta Delta, de acuerdo a la NCh 409/1. Of 2005.
- Aplicar criterios de identificación y evaluación de efectos de la actividad minera sobre la calidad del agua en los pozos de la Planta Delta, de acuerdo a la NCh 409/1. Of 2005.
- Elaborar recomendaciones que permitan mejorar la gestión de los aspectos ambientales de la actividad minera asociados a los efectos identificados.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Base de datos. Antecedentes generales

El presente estudio se realizará en la Planta Delta (figura N° 1), propiedad de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), el cual se sitúa a 15 Km al noroeste de la ciudad de Ovalle, Comuna de Ovalle, Provincia del Limarí, Región de Coquimbo. El acceso a la Planta es a través de la ruta D-43 Ovalle - La Serena, hasta el desvío hacia Panulcillo ubicado a 20 Km. al norte de Ovalle y a 60 Km. al sur de La Serena.



Figura N° 1: Ubicación de la Planta Delta, Comuna de Ovalle.

Según el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado en el año 2007, la Planta Delta contempla la explotación de una mina subterránea de cobre, un poder de compra para Mineros Varios y los procesos de chancado, flotación, lixiviación en pilas, extracción por solvente y electroobtención para producir concentrado de cobre y cátodos de cobre.

Este proceso genera una Resolución de Calificación Ambiental, la RCA 32/2008, la que aprueba la ejecución del proyecto.

Posteriormente, se amplía la planta de Molienda y flotación de mineral sulfurado de oro, efectuando un circuito con una capacidad para beneficiar 10.500 t/mes, paralelo al circuito existente, el cual alcanzará un total de 75.000 ton/mes, mediante Declaración de Impacto Ambiental (DIA) ingresado el año 2010. El año 2012, se presenta una nueva DIA, con el fin de optimizar y regularizar modificaciones menores del procesos dentro de las operaciones actuales de la planta Delta - ENAMI, para satisfacer la creciente demanda de mayores proveedores, mejorar el desempeño ambiental de la faena y mejorar la eficiencia en el fomento de la pequeña y mediana minería de la zona. Estas modificaciones consistieron en incrementar la capacidad de chancado de minerales autorizada, disponer nuevas canchas de stock de minerales para ser beneficiados, regularizar modificaciones menores de la operación y optimizar los actuales procesos de la planta.

3.1.2. Base de datos. Antecedentes específicos: Pozos de extracción y control de aguas

Los pozos de aducción y control se ubican en la cuenca Rincón del Sauce (figura N°2).

3.1.2.1. Pozos de aducción

Son tres los pozos de extracción de agua fresca autorizados por la DGA, estos son el T2, T3 y T4. Están ubicados aproximadamente a 2 km del depósito de relaves y a 6 desde el depósito de estériles de la mina Panulcillo (figura N° 2).

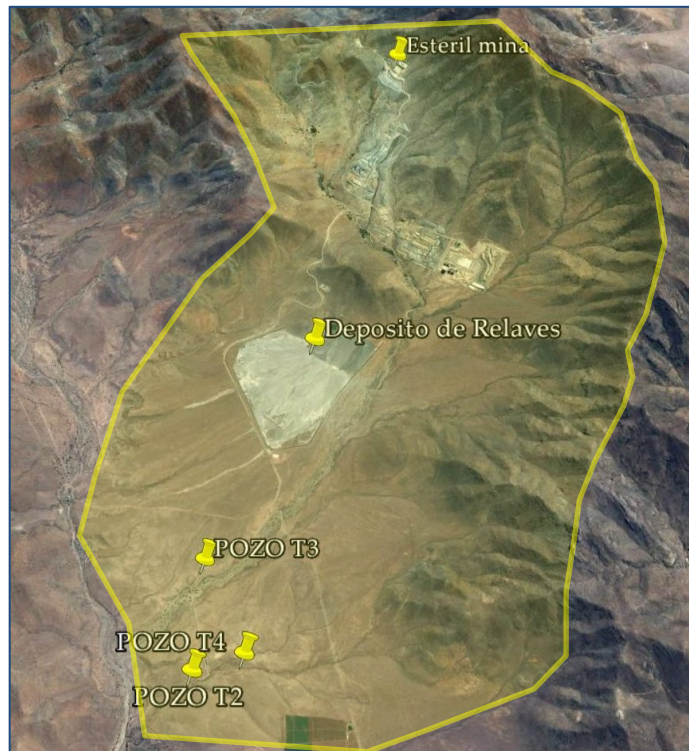


Figura N° 2: Ubicación de pozos de extracción de agua fresca, T2, T3 y T4. El polígono amarillo representa la ubicación aproximada de la cuenca Rincón del Sauce, en la parte baja se une a la cuenca El Talhuén.

Las profundidades de los pozos de aducción, bordean los 100 m.

3.1.2.2. Pozos de control

El objetivo de estos es cuantificar si existe un cambio en la calidad del agua subterránea. Los pozos de control son (figura N° 3): Pozo de Control aguas arriba Planta LIX-SX-EW (PC-1-PL), Pozo de Control aguas abajo Planta LIX-SX-EW (PC-2-PL), Pozo de Control aguas abajo Estéril Mina (PC-EM), Pozo de Control aguas arriba depósito de relaves (PC-1-DR, no operativo durante el período de estudio) y Pozo de Control aguas abajo depósito de relaves (PC-2-DR).



Figura N° 3: Ubicación pozos de control PC-EM, PC-1-PL, PC-2-PL, PC-1-DR, PC-2-DR y PC-EM.

Las profundidades de los pozos es la siguiente:

- Pozo (PC-1-DR): 50 m
- Pozo (PC-2-DR): 70 m
- Pozo (PC-1-EM): 40 m
- Pozo (PC-1-PL): 50 m
- Pozo (PC-2-PL): 50 m

Todos cuentan con tubería de 3" de diámetro.

3.1.3. Datos a utilizar

Los datos provienen de monitoreos de calidad de aguas realizados por laboratorios certificados. Para el monitoreo mensual se realizan muestras puntuales por pozo, a inicio de cada mes.

Entre junio de 2009 a enero de 2013 realiza los monitoreos la empresa Hidrolab, desde febrero a mayo de 2013 los realiza la empresa ANAM. Ambos laboratorios son

acreditados por el INN, NCh ISO 17025. Of 2005. La metodología de diseño y muestreo de ambos laboratorios se basa en las NCh 409/2 y Manual SISS, para el muestreo de Agua Potable y serie NCh 411 (partes 1, 2, 3, 4, 6, 10 y 11).

El monitoreo de aguas de pozos de control es un compromiso emergido de la RCA 32/2008, mientras que el monitoreo de los pozos de aducción es voluntario. Este monitoreo se realiza una vez por mes, en todos los pozos de aducción y control, desde junio de 2009, momento en que se da comienzo a las actividades de construcción de la Planta Delta.

Para el caso de los Pozos de Control, se utiliza la norma de agua de riego (NCh 1333). Estos pozos fueron construidos con el inicio del proyecto. Dada la no existencia de monitoreos antes de junio de 2009, es que la empresa denomina los monitoreos realizados entre junio de 2009 a junio de 2010 como Línea Base, aun cuando no cumple con la definición literal de este concepto.

Para el caso del monitoreo de aguas de los Pozos de Aducción, se utiliza la norma de agua potable (NCh 409/1. Of2005). Estos pozos contaban con un monitoreo realizado para la presentación del proyecto para su evaluación ambiental, el cual no fue considerado para el presente estudio debido a que fue realizado en enero de 2002 y, además, por que los pozos de control no poseían dichos monitoreos.

Para acceder a los datos de manera pública, se debe realizar una solicitud vía transparencia a la SEREMI de Salud de la Región de Coquimbo.

Los parámetros analizados en los Pozos de Aducción fueron (47):

Fluoruro, Cromo, Cobre, Hierro, Magnesio, Manganeso, Selenio, Cinc, Cianuro Total, Nitrate, Nitrito, Razón nitrato+nitrito, Arsénico, Cadmio, Mercurio, Plomo, Benceno, Tetracloroetano, Tolueno, Xileno, 2,4 D, DDT+DDD+DDE, Lindano, Metoxiclor, Pentaclorofenol, Monocloraminas, Bromodichlorometano, Dibromoclorometano, Tribromometano, Triclorometano, Trihalometanos, Amoniaco, Cloruros, pH, Sulfato, Compuestos Fenólicos, Color VERDADERO, Sólidos disueltos totales, Coliformes Totales, Turbiedad, Cloro libre residual, Calcio, Potasio, Sodio, Alcalinidad, Conductividad, Dureza Teórica.

Los parámetros analizados en los Pozos de Control fueron (25):

Alcalinidad, Arsénico, Cadmio, Calcio, Cianuro Total, Cinc, Cloruros, Cobre, Conductividad, Cromo, Dureza Teórica, Fluoruro, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Nitrato, pH, Plomo, Potasio, Selenio, Sodio, Sólidos disueltos totales, Sulfato disuelto.

En ambos casos, la toma de muestras fue realizada de manera discontinua. Los períodos principales en que no se realizaron monitoreos por tipo de pozo se puede observar en la Tabla N°1. En cuanto al porcentaje de monitoreos por pozo según el período de Línea Base u Operaciones se puede visualizar en el Gráfico N°1.

Tabla N° 1: Períodos/meses sin monitoreos. Porcentaje de monitoreos efectuados por tipo de pozo y período.

	Períodos/meses sin monitoreos		Porcentaje de monitoreos realizados		
	Línea base	Operación	Línea base	Operación	Total
Pozo control	08-2009	05/06-2012	88,5	83,4	85
Pozo aducción	08-2009	04-2011 07/11-2011 01/02-2012	68,8	72,3	71

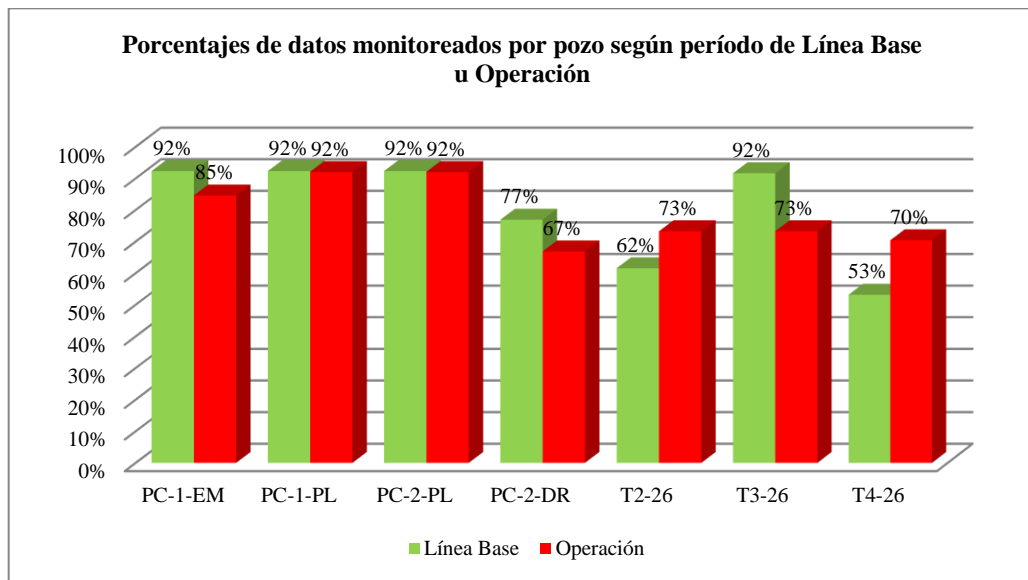


Gráfico N° 1: Porcentaje de datos monitoreados por pozo según período de línea base y operación.

Para la tabulación de datos, elaboración de gráficos y estadísticos descriptivos se utilizó un computador personal con software Excel de Windows.

3.2. Métodos

3.2.1. Revisión de antecedentes ambientales, bibliográficos y de actividades productivas relacionadas a la temática en estudio

Para los antecedentes bibliográficos, ambientales y de la actividad productiva, se revisaron publicaciones relacionadas al tema. Estas se recolectaron preferentemente a través de los buscadores web Google y scholar.google.es.

Para las referencias en torno al Proyecto Delta se revisó el Estudio de Impacto Ambiental presentado en el año 2006 y las posteriores Adendas. En especial se utilizó el Estudio Hidrogeológico del Proyecto Delta del año 2007.

3.2.2. Análisis del comportamiento de parámetros de calidad de aguas en los pozos de aducción y control de la Planta Delta, de acuerdo a la NCh 409

Se observó el comportamiento de todos los parámetros por pozo a través del tiempo en estudio. La metodología de análisis de datos utilizado fue la comparación de datos a través de series temporales.

El primer paso, fue el traspaso de datos desde archivos pdf para, posteriormente, desarrollar la serie temporal en tablas que contenían toda la información de monitoreos del período analizado. Luego, se elaboraron gráficos por parámetro que incluyeran todos los pozos.

3.2.3. Definición de criterios para la identificación y evaluación de efectos de la actividad minera sobre la calidad del agua en los pozos de la Planta Delta

Una vez realizada la revisión de antecedentes nombrada en el punto 3.2.1. y la visualización del comportamiento de todos los parámetros descrito en el punto 3.2.2., se encausó el análisis hacia la detección de aquellos parámetros que en al menos una ocasión superaron la NCh 409/1.Of2005. Lo anterior, se fundamenta en los compromisos emanados de la RCA 32/2008 de la Planta Delta, en que la vigilancia de la calidad de aguas se basa sobre aquellos parámetros que superan la norma. Para el posterior análisis se definieron los criterios que se describen en los numerales siguientes.

a) Criterio 1: selección de parámetros fuera de norma

Desarrollada la serie temporal, se procedió a identificar los niveles de parámetros por sobre la norma de agua potable (NCh 409/1.Of2005). Luego, se seleccionaron dichos parámetros y procedió a identificar las fechas en que ocurrieron las ocasiones en que se superó la Norma. Posteriormente, se describieron las ocasiones en que se supera la Norma. Se elaboró una tabla por parámetro en que se detalla la fecha y el valor de dicho parámetro, por pozo.

Con los gráficos por parámetro obtenidos en el punto 3.2.2., se buscó la presencia de variaciones estacionales.

b) Criterio 2: determinación del total de ocasiones sobre norma por tipo de pozo

Para este criterio, se realizó una tabla con el total de ocasiones en donde cada parámetro superó la norma de agua potable, según si era pozo de aducción o de control.

Además permitió realizar comparaciones entre el tipo de contaminación predominante por tipo de pozo (Tipo I-V).

c) Criterio 3: determinación del total de ocasiones sobre norma por pozo

En este caso, se realizó una tabulación de datos, en que se determinaron el total de ocasiones por pozo en que se su superó la norma de agua potable. Luego, se graficaron dichos datos.

d) Criterio 4: determinación del total de ocasiones sobre normas por mes

Se elaboró una tabla en que se determinaron el número de ocasiones por mes en que se superó la norma de agua potable. Para este criterio se utilizó la comparación de fechas de línea base y operaciones, de junio/2009 a junio/2010 y de julio/2010 a mayo/2013, respectivamente.

e) Criterio 5: comparación de ocasiones sobre norma por pozo según datos de línea base y operación

Para este criterio se desarrolló una tabulación que contenía el número de ocasiones sobre norma por pozo, considerando cada parámetro y el período de monitoreo (línea base y operación).

Se desarrollaron dos gráficos a partir de esta tabulación. El primero muestra una comparación de valores totales de ocasiones sobre norma por pozo, según el período de monitoreo.

En el segundo, se describe por parámetro la cantidad de ocasiones en que se superó la norma de agua potable, según el período de monitoreo. Esta imagen permite identificar con certeza las diferencias de ocasiones de alzas fuera de norma entre parámetros, según sea línea base u operaciones, además de mostrar cuáles son los parámetros que más excedieron el límite normado.

3.2.4. Aplicación de criterios

Cada uno de los criterios antes descritos permitió conocer las ocasiones y fechas en que se observaron los valores por sobre la norma en cada pozo. Además, permitió conocer la cantidad de ocasiones en que se sobrepasó la Norma durante línea base y en la etapa de operación del proyecto.

Para el análisis y discusión de resultados se tomaron los antecedentes ambientales, bibliográficos y de la actividad productiva y se cruzaron con los resultados obtenidos a partir de los criterios de identificación y evaluación descritos en los numerales del punto anterior. Este cruzamiento se basó en la coincidencia de las fechas en que se superó la norma por parámetro, pozo y período de línea base/operación. Con este cúmulo de información se realizó un análisis de las posibles causas que propiciaron las ocasiones sobre norma, la relación con el período de ocurrencia y la evaluación de posibles efectos. Finalmente, a partir de la evaluación general se proponen recomendaciones a la gestión ambiental de recursos hídricos de la Planta Delta.

4. RESULTADOS

4.1. Revisión de antecedentes ambientales, bibliográficos y de actividades productivas relacionadas al Proyecto Delta

4.1.1. Antecedentes bibliográficos

4.1.1.1. *Conceptos generales sobre las aguas subterráneas*

Agua subterránea es aquella que se aloja y circula en el subsuelo, conformando los acuíferos. El abastecimiento principal que reciben los acuíferos es por parte de la infiltración de las aguas lluvias y, en menor medida, por infiltración de lagos o ríos (Collazo y Montaña, 2012), siendo parte importante del ciclo hidrológico.

Entre las características principales de las aguas subterráneas se pueden nombrar que el movimiento desde zonas de recarga a zonas de descarga es a velocidades bajas, que van desde un metro/año a cientos de m/día. Se pueden mover de manera horizontal y vertical. Pueden presentar tiempos de residencia largos, lo que resulta en grandes volúmenes de almacenamiento (EPA, 1990; Collazo y Montaña, 2012).

En cuanto a los acuíferos, existen de distintos tipos, dependiendo de su estructura y de su porosidad. Acorde a lo anterior, Collazo y Montaña (2012) los clasifican según su estructura en:

- a) **Acuíferos libres o saturados:** Son acuíferos cuyo piso es impermeable y su techo está a presión atmosférica. La recarga de este tipo de acuífero es directa y se realiza por infiltración del agua de lluvia a través de la zona no saturada o por infiltración de ríos o lagos. Pozos muy someros se ven afectados (se secan), cuando el nivel freático desciende hasta por debajo de la profundidad total del pozo. Además, pueden ser fácilmente contaminados desde la superficie.
- b) **Acuíferos confinados:** Limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad, es decir, encerrados entre capas de rocas o de algún otro sedimento sólido, que no permiten que el agua escape hacia la superficie. Este tipo de acuíferos están protegidos de la infiltración de contaminantes.

- c) **Acuíferos semi-confinados:** Son mucho más frecuentes en la naturaleza que los confinados. En estos, el techo, el piso o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad que si bien dificultan no impiden la circulación vertical del agua, es decir, presentan alguna medida de ingreso y salida de agua.

Respecto del tipo de *porosidad*, estos mismos autores los clasifican en:

- a) **Acuíferos de porosidad primaria:** Constituidos por formaciones geológicas sedimentarias. Los materiales suelen ser gravas y principalmente arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc). Estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (generalmente son formaciones recientes, de edad cuaternaria) o consolidados.
- b) **Acuíferos de porosidad secundaria o fisurado:** Formados por rocas “duras” de origen ígneo o metamórfico. La porosidad en estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua de almacenarse y de circular. Hay que tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas.
- c) **Acuíferos kársticos por disolución:** Compuestos por rocas de origen carbonático (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan en forma secundaria por disolución del carbonato. El agua en estos acuíferos circula por entre los huecos con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados.

Al momento de analizar las aguas subterráneas y poder determinar si existen efectos de algún tipo de actividades humanas sobre ellas, además, de conocer las características geológicas, también se hace necesario comprender las características químicas de estas.

Las aguas lluvia que en un principio poseen un escaso contenido iónico, debido a la escorrentía superficial y la infiltración, van adquiriendo sustancias químicas como especies disueltas (Lillo, 2007). Entre los múltiples factores que condicionan la composición del agua subterránea, se pueden nombrar la naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en contacto, superficie y duración del contacto, temperatura, presión, existencia de gases, grado de saturación del agua en

relación con las distintas sustancias incorporables, actividad bacteriana, etc. (Collazo y Montaña, 2012; Lillo, 2007).

En cuanto a la composición química del agua subterránea, se puede nombrar que los cationes más comunes son sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}), mientras que los aniones son cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{-2}) y nitrato (NO_3^-) (Lillo, 2007; Kovalevsky *et al*, 2004; Collazo y Montaña, 2012).

En cuanto a los componentes minoritarios se encuentran Boro (B^{+3}), Bromuro (Br^-), Compuestos fenólicos, Fosfato (PO_4^{-3}), Manganeseo (Mn), Sílice (Si), Circón (Zr^{+2}), Cobre (Cu^+), Hierro (Fe^{+2}), Carbonato (CO_3^{-2}), Nitrito (NO^{-2}), Amonio (NH^{+4}), Estroncio (Sr^{+2}) (Collazo y Montaña, 2012; Lillo, 2007).

Dentro de los constituyentes tóxicos y carcinógenos, se encuentra el Arsénico (As), Bario (Ba^{+2}), Cadmio (Cd^{+2}), Plomo (Pb), Fluoruros (F^-), y Selenio (Se). Con respecto a los gases disueltos en el agua, los principales son el oxígeno disuelto (O_2), Gas Carbónico (CO_2) y el Gas Sulfhídrico (H_2S) (Collazo y Montaña, 2012).

Por otra parte, el agua subterránea posee características físicas y químicas. Entre los físicos se encuentran la temperatura, olor-sabor, turbidez y conductividad eléctrica. Entre las características químicas se encuentran pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), dureza, entre otras (Lillo, 2007; Collazo y Montaña, 2012).

4.1.1.2. Contaminación y vulnerabilidad de las cuencas subterráneas

Como se ha descrito en puntos anteriores, las aguas provenientes de lluvias poseen una muy baja carga iónica o de otros compuestos, por lo que al tocar el suelo y el subsuelo mediante procesos de oxidación u otros se procede a una contaminación de tipo natural, la que en definitiva otorgan las características físico-químicas a los caudales (Auge, 2006; Banco Mundial, 2011). Además del aporte químico natural, existe contaminación de aguas por las distintas actividades que realiza el ser humano.

La contaminación de aguas subterráneas presenta características distintas a lo que ocurre en cauces superficiales, tales como la dificultad de detección, el retardo entre la fuente contaminante y su impacto, la permanencia prolongada del efecto, la reacción retardada

frente a las medidas correctivas que se pudieran adoptar, la naturaleza de los procesos físico-químicos e hidrodinámicos involucrados (Orrego, 2002).

La contaminación de aguas subterráneas provocada por el ser humano se conoce como contaminación artificial, la que puede ser directa o inducida (Auge, 2006). La artificial directa, se refiere a vertidos sobre cauces, como por ejemplo, RILES, purines o aguas servidas. En el segundo caso, se genera por salinización de un acuífero, debido a una sobreexplotación de pozos en áreas costeras.

La contaminación de los acuíferos se produce cuando la carga de contaminantes sobre el subsuelo generado por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras no es controlada adecuadamente, superando la capacidad de atenuación natural del subsuelo (Foster *et al*, 2002).

Entre las fuentes de contaminación de los acuíferos se pueden nombrar la minería, la agricultura, las urbes, etc., con distintos tipos de contaminantes como los Residuos Industriales Líquidos (RILES), Residuos Sólidos Industriales (RISSES), fertilizantes y agricultura, entre otros (Foster *et al*, 2002).

En cuanto a la vulnerabilidad de un acuífero, Foster *et al* (2002) la define como la susceptibilidad a ser afectado por una carga contaminante de forma adversa. De la misma manera, considera que la vulnerabilidad de un acuífero es en función de la accesibilidad de la zona saturada a la penetración de contaminantes y la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada. En este sentido, los acuíferos más vulnerables son los no confinados, poco profundos y cuya granulometría contiene escasa cantidad de finos (Orrego, 2002; Salazar, 2003). También, los acuíferos semiconfinados son vulnerables, si las capas acuitardas confinantes son relativamente delgadas y permeables (Foster *et al*, 2002).

En Chile, la mayoría de los acuíferos explotados son libres o semiconfinados, con baja presencia de finos (Orrego, 2002; Salazar, 2003). También, se observa vulnerabilidad en los acuíferos de zonas costeras por sobre-explotación, en especial en el litoral del Norte Chico, que sirven de fuente de abastecimiento a balnearios (Salazar, 2003).

4.1.1.3. Conceptos acerca de la calidad de aguas

En términos históricos, es la cultura helénica la que comienza a desarrollar los primeros conceptos de calidad de aguas, diferenciando entre agua para consumo humano, uso en baños públicos y aguas residuales. Además, utilizaban embalses de aireación para la purificación del agua. Posteriormente, los romanos se transformaron en los grandes constructores redes de distribución de agua, diferenciándola por tipo de uso. También utilizaron el sistema de tratamiento por aireación como método de purificación. Posterior a este período, por varios siglos se detuvo la evolución de los sistemas de purificación de agua. En Europa ante el crecimiento de la población y después de grandes epidemias de los siglos 18-19, se comienza el tratamiento de aguas mediante plantas de tratamiento de aguas. Desde fines del siglo 19 y comienzos del 20, se comienza en distintos países del mundo a incorporar el concepto de calidad de aguas, con el fin de proteger cultivos y la salud de la población (Lenntech, 2013).

La calidad es un concepto que nos indica una propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor, es decir, realizar comparaciones respecto de una condición a la que se espera llegar. Cuando lo anterior se incorpora en el concepto de *calidad de agua*, se pretende que esta alcance la condición tal que nos permita utilizarla en diversos fines.

La calidad del agua está dada por las características químicas, físicas y biológicas que tiene un cuerpo de agua, lo cual permite interpretar el estado en que se encuentra el recurso. Los cuerpos de agua presentan una calidad natural, entendida como las características propias del sistema, donde la concentración de un compuesto corresponde a la situación original del agua y sus ecosistemas sin intervención antrópica (CADE-IDEPE, 2004).

El ciclo hidrológico provee de distintas calidades de aguas a medida que avanza (tabla N° 2). El agua más pura, de mejor calidad, se encuentra en la fase de lluvias, las que contienen los elementos atmosféricos o efecto de contaminación atmosférica. Una vez que cae al suelo y se transforma en agua superficial, se le incorporan distintos iones y contaminantes. Cuando el agua llega al acuífero, ya ha adquirido una gran cantidad de iones y cationes producto de los distintos procesos químicos que se desarrollan en el

subsuelo, además de la influencia que ejerce sobre ella el agua superficial y de la carga de compuestos que esta pueda contener. Finalmente, el agua que llega al mar está saturada de sales y, por lo tanto, la hacen de la peor calidad (Lillo, 2007; Sancha, 2005).

Tabla N° 2: Valores composicionales representativos de las aguas naturales.

Aniones	Unidades	Agua lluvia	Agua subterránea	Agua mar
Cloruro	Mg/l	0-20	10-250	2000
Sulfato	Mg/l	0-10	10-300	3000
Bicarbonato	Mg/l	0-20	50-350	120
Nitrato	Mg/l	0-5	0-300	1
Bromuro	Mg/l	0	0-2	65
Cationes				
Sodio	Mg/l		5-150	10.000
Calcio	Mg/l		10-250	400
Magnesio	Mg/l		1-75	400
Potasio	Mg/l		1-10	1.200
Estroncio	Mg/l		0-1	400
Otras características				13
Conductividad	µs/cm		100-200	45.000

Fuente: Técnicas Hidrogeoquímicas (Lillo, 2007).

4.1.1.4. Calidad de las aguas en Chile

Según un informe del Banco Mundial (2011), existen insuficientes datos para poder determinar con certeza el estado de la calidad de las aguas en Chile. Los datos actuales indican que las aguas presentan variabilidad espacial con respecto a su composición química a lo largo del territorio nacional, observándose en general una alta concentración de sales en las zonas áridas del país, decreciendo fuertemente hacia las regiones más húmedas (Sancha, 2005).

Las aguas superficiales del Norte Grande se caracterizan por su alto contenido salino, debido a la disolución de sales contenidas en formaciones geológicas que son interceptadas por el cauce. Además, poseen altos contenidos de arsénico, asociados al volcanismo cuaternario altiplánico. En las aguas del Norte Chico, el contenido salino es menor que en el Norte Grande, aunque en los cursos inferiores de los ríos suele aumentar, generando restricciones al uso de las aguas. En la zona central, la calidad del agua en relación a la salinidad mejora, aunque en lo que se refiere a metales pesados se sigue detectando cobre en los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel. En la zona sur la calidad

de las aguas presenta valores adecuados, con algunas excepciones en los ríos Biobío, Damas y Rahue. En la zona austral, la calidad de las aguas es catalogada como muy buena (Sancha, 2005; CONAMA, 2007).

Las aguas subterráneas, como se ha mencionado anteriormente, son muy influenciadas por el agua superficial, por lo que la calidad sigue de cerca su tendencia, aumentando los niveles de sólidos disueltos. Entonces, al igual que en las aguas superficiales el contenido de sales es fuertemente creciente hacia el norte del país, manteniendo valores muy bajos al sur de Santiago (Sancha, 2005).

En 1990 se llevó a cabo en todo el país una encuesta independiente de los servicios sanitarios, con la que se puso de relieve que, de 395 acuíferos de los cuales se obtiene agua potable, 102 (el 26%) eran de mala calidad. Se encontró un alto nivel de *nitratos* en 45 acuíferos, así como de *hierro* y *magnesio* en 35 acuíferos (CEPAL-OCDE, 2005). Además, la DGA, en el año 1999, informa que los principales contaminantes de aguas subterráneas corresponden a lixiviación de sales del suelo, y a la incorporación de fertilizantes y pesticidas utilizados en la actividad agrícola.

4.1.1.5. Normativa chilena sobre la calidad de aguas

Los problemas sanitarios provocados por la contaminación de aguas desde el siglo 19 en el continente europeo, con vertido de aguas residuales industriales y domiciliarias en cauces superficiales, el uso intensivo de pesticidas y fertilizantes provocaron grandes crisis a la salud de la población (Lenntech, 2013). Es por eso que se vio la necesidad de contar con parámetros mínimos de elementos o compuestos que fuesen nocivos para la salud de la población, de tal manera de proporcionar niveles de seguridad sanitaria en particular sobre el agua de consumo humano (agua potable).

En Chile, es a partir del año 1968 que se comienza a diferenciar sobre usos de aguas y las condiciones mínimas que debe presentar en los casos de usos sanitarios a través del código sanitario. Posteriormente, el año 1969 se oficializa la Norma de Calidad para el Agua de Consumo Humano NCh 409. Durante los años 1984 y 2005 se actualiza la NCh 409 adoptando los parámetros que aparecen en la *Guías para la calidad del agua potable*, de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En cuanto a la calidad de aguas para usos generales (riego, recreación y vida acuática), es en el año 1978 que se publica

la NCh 1333 (para mayor información sobre la evolución de la normativa de calidad de aguas y agua potable, ver Anexo N°1).

La anteriormente nombrada NCh 409/1. Of2005, establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional. Agrupa parámetros en 5 tipos, estos son:

- **Tipo I:** Parámetros microbiológicos y de turbiedad;
- **Tipo II:** Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud;
- **Tipo III:** Elementos radiactivos;
- **Tipo IV:** Parámetros relativos a las características organolépticas;
- **Tipo V:** Parámetros de desinfección.

Los parámetros exigidos por la NCh 409/1. Of2005 así como los límites permisibles, se muestran en el anexo N° 2.

4.1.2. Antecedentes ambientales

4.1.2.1. Efecto de las formaciones geológicas sobre las aguas subterráneas

En el contexto del ciclo hidrológico, las precipitaciones son la fuente principal de recarga de los acuíferos. Una vez que el agua de la lluvia toma contacto con el suelo, esta tomará una determinada composición química, la que irá cambiando a medida que se infiltre a través de las formaciones rocosas hasta llegar al acuífero (Montes, 2011).

La composición de los minerales de las rocas (litología), el tiempo de contacto, la tectónica, el agrietamiento, textura, porosidad, etc., determinarán el tipo de agua presente en el acuífero (Fagundo y González, 2005; Montes, 2011). Por lo tanto, el agua irá cambiando su composición en la medida en que avance a través de las capas geológicas.

Según lo dicho anteriormente, en un contexto general, debido a que el 95% del peso de la corteza terrestre es de silicatos y que la sílice está presente generalmente en rocas ígneas, las que posteriormente son oxidadas por agua, se genera que los óxidos de calcio sean los que predominan en las aguas subterráneas (Donado, 1999). Entonces, respecto de los tipos generales de formaciones geológicas, se puede observar que las aguas de terrenos kársticos carbonatados resultan de una composición bicarbonatada cálcica o

cálcico-magnésicas; de suelos con predominancia de yesos composiciones sulfatadas cálcicas; las de terrenos sedimentarios marinos composición cloruradas sódicas y las de terrenos sedimentarios de origen continental son bicarbonatadas cálcicas (Carrillo, 2002; Fagundo y González, 2005; Montes, 2011).

4.1.2.2. Calidad de las aguas subterráneas en el norte de Chile

Las aguas del Norte Grande presentan una importante heterogeneidad espacial. Ello es un reflejo de las características geológicas de la zona, de la importancia de los procesos evaporativos y de la escasa o nula recarga de muchos acuíferos lo que permite una interacción agua-roca muy prolongada (Sancha, 2005). Estas aguas subterráneas presentan problemas de calidad asociados a la presencia de arsénico (Arumí y Oyarzún, 2006), además, se han detectado procesos de salinización en zonas agrícolas existentes en los pequeños valles en que se desarrolla esta actividad (DGA, 1999).

En acuíferos que suministran agua potable a la I región se han encontrado *altos niveles de boro*, fenómeno con efectos potenciales sobre la salud. En Chile no hay normas para la concentración de boro en el agua potable, a pesar de la recomendación de la OMS de establecer una norma de 0,3 mg/litro (CEPAL-OCDE, 2005).

En el Norte Chico, existen problemas asociados con la presencia de hierro, sulfato, cloruros y manganeso (tabla N° 3), por tener altas concentraciones de origen natural y causas antrópicas (Sancha, 2005; Arumí y Oyarzún, 2006).

Tabla N° 3: Calidad de Aguas Subterráneas en Chile. Parámetros cuya concentración exceden valores de la NCh 409/1. Of2005 (modificado de Arumí y Oyarzún, 2006).

Región	Parámetro que excede Norma de Agua Potable
Arica y Parinacota	Cloruro, arsénico y manganeso
Tarapacá	Arsénico y sulfato
Atacama	Sulfatos
Coquimbo	Sulfatos, hierro y manganeso

4.1.2.3. Minería y efectos sobre el agua

Las actividades mineras generan impactos ambientales, incluso cuando se realizan bajo los mejores estándares operacionales. Los principales impactos ambientales afectan a: 1) la estabilidad física de los terrenos, lo que favorece la escorrentía, subsidencia y la erosión, incrementando la carga de sedimentos de la red fluvial; 2) la calidad química -

biológica de los suelos y de la red de drenaje (generación de drenaje ácido de roca); 3) la configuración y estabilidad de la red de drenaje superficial y subterránea; 4) el paisaje y la fragilidad química remanente del yacimiento explotado y de los pasivos mineros acumulados (Oyarzún y Oyarzún, 2011).

De los impactos ambientales antes nombrados, el más significativo es sobre la calidad y disponibilidad de recursos hídricos en términos de consumo humano y la mantención de vida de especies de flora y fauna nativas acuáticas y terrestres (ELAW, 2010). Al respecto, es el drenaje ácido de minería (DAM), una de las amenazas más graves de un proyecto minero, siendo su mayor pasivo ambiental, ya que sus efectos son a muy largo plazo (Septoff, 2005; CMACB, 2006). El DAM degrada severamente la calidad del agua, pudiendo aniquilar la vida acuática y volverla inservible inclusive para usos de riego o recreación (CPL, 2002; CMACB, 2006). También puede inhibir el crecimiento de comunidades vegetales aledañas a los canales de drenaje, debido a que la acumulación de hierro y de sulfuros en la superficie de los suelos dificulta la penetración de las raíces. Además, el ácido sulfúrico afecta la tasa de crecimiento de las plantas (CPL, 2002).

El DAM se produce cuando los sulfuros presentes en la roca, material que proviene de las paredes de minas, tajos abiertos, relaves, estériles, y pilas de lixiviación, se excavan y exponen al agua, aire y a la acción catalizadora de algunas bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, bacteria acidófila sulfo-oxidante y ferro-oxidante mesófila (CPL, 2002; Septoff, 2005). Todo comienza con la oxidación de la pirita, fundamental en el proceso de oxidación-lixiviación, que genera iones Fe^{3+} y ácido sulfúrico. Esta agua ácida, puede disolver otros metales peligrosos en rocas cercanas (Septoff, 2005; Oyarzún y Oyarzún, 2011). Finalmente, se formará una solución ácida con alto contenido de sulfuros y rica en metales (por ejemplo, cadmio, cobre, plomo, zinc, arsénico, etc.). No obstante lo anterior, el lixiviado de compuestos tóxicos, como el arsénico y selenio, inclusive puede ocurrir en ausencia de condiciones ácidas (ELAW, 2010).

Si bien el suelo, lugar donde se depositan casi todos los desechos sólidos y líquidos, juega un papel “amortiguador” para la contaminación, dicha capacidad dependerá de su

composición mineralógica y propiedades físicas (Oyarzún y Oyarzún, 2011). Por lo tanto, si el drenaje ácido no es controlado, este podrá discurrir o percolarse hacia los cursos de agua superficiales y subterráneos (Septoff, 2005).

A diferencia de los cauces superficiales, la calidad del agua subterránea es difícil de observar debido a la lentitud de su movimiento, la extensión de los acuíferos afectados y la falta de oxígeno disponible para el proceso de oxidación. Lo anterior redundaría en que, una vez que se ha determinado la contaminación de un acuífero, es muy difícil remediar la situación (MINEO, 2000).

En un estudio realizado por Rodríguez-Pacheco *et al* (2000), en el municipio de Moa, Cuba, se determinó la contaminación de aguas subterráneas del aluvial del río Moa por desechos mineros. Se pudo constatar la presencia en elevadas concentraciones de níquel, cromo, manganeso, hierro y sulfatos; en que la fuente de contaminación se debía a la recarga inducida por las aguas que lixivian los residuos mineros almacenados en relaves ubicados sobre las terrazas del río Moa. Los análisis demostraron que, a menor distancia del relave más aumentan las concentraciones de metales en las aguas del acuífero.

De acuerdo a Orrego (2002), en Chile la primera actividad contaminante de fuentes hídricas es la minería, seguido por la agricultura. Según el investigador, no se tienen datos o investigaciones suficientes que pueda determinar el real impacto de los numerosos tranques de relaves diseminados por Chile. Sánchez y Enríquez (1996), afirman que los derrames de relaves de lixiviación de cobre y cianuración de oro, revisten mayor riesgo para suelos y aguas, dados sus contenidos de ácido sulfúrico y cianuro. En el *Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile del año 2012* (Universidad de Chile, 2013), se da cuenta de un mapa de riesgo de generación de DAM de minas de Chile, un estudio realizado por la Unidad Ambiental del Ministerio de Minería en el año 2000, pero no se exhibe o se demuestra las reales consecuencias en la calidad del agua subterránea de estas faenas, ni menos se hace cargo de los cientos de relaves abandonados a su suerte, lo que significa un riesgo de tamaño mayor para la población y el ecosistema.

La contaminación a partir de una faena minera se produce a través de las aguas lluvias o de cauces de agua que pasan por desmontes, minas, rios de lixiviación, en cuyo

contacto pueden incorporar contenido metálico en el agua o acidificarla. Si estas fluyen hacia cauces superficiales o subterráneos, existirá un riesgo ambiental. Por otra parte, eventuales derrames de soluciones, botaderos de ripios, lixiviación en botaderos podrían impactar al suelo y aguas subterráneas si no hay una buena impermeabilización del sector (Sánchez y Enríquez, 1996).

También los residuos líquidos industriales presentan un riesgo actual y potencial. Según Sánchez y Enríquez (1996), esto se presenta en los Residuos líquidos en Amalgamación/Flotación y en los Residuos líquidos en Lixiviación. Los primeros se refieren a contenidos de mercurio y cobre sobre la norma. Los segundos, se refieren a fierro, cobre, sulfatos, arsénico y pH en concentraciones mayores a la norma. En ambos casos, reviste un serio riesgo a la salud humana.

En el caso de que un tranque no esté bien construido o impermeabilizado existe riesgo de derrames y filtraciones, ya que estos pueden contener metal que no pudo flotar o que no fue recogido por los reactivos de concentrado pudiendo alcanzar el suelo y, posteriormente, aguas subterráneas (Sánchez y Enríquez, 1996). Lo anteriormente expuesto es grave en relación a la contaminación de acuíferos. Debido a la geografía del país, la contaminación de un acuífero en la precordillera de Los Andes puede significar el afloramiento posterior de aguas contaminadas en bofedales, en vertientes y humedales costeros con posibles consecuencias de bioacumulación en su paso por la cadena trófica (Orrego, 2002). En este sentido, la gran minería chilena se desarrolla principalmente en la cordillera, lugar donde se ubican las cabeceras de las cuencas. Por lo tanto, los acopios de elementos tóxicos, los tranques de relaves, los vertidos y efluentes que produce esta actividad, afectan en forma negativa las aguas superficiales y subterráneas aguas abajo de las cuencas hasta las zonas costeras, produciéndose infiltración y percolación en pozos (Orrego, 2002; Salazar, 2003).

Según la revisión bibliográfica realizada, no se encontró una variada literatura respecto de los efectos medio ambientales de las actividades relacionadas a la minería en Chile, en particular, relacionada a los efectos nocivos sobre las aguas subterráneas. Lo anterior es preocupante debido a que en nuestro país, la minería se desarrolla en las zonas áridas, donde prácticamente no existen cauces superficiales, el ser humano y sus actividades

productivas dependen de la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, así como la mantención de los delicados ecosistemas superficiales, tales como formaciones xerofíticas, humedales, bofedales, etc.

4.1.3. Antecedentes sobre la actividad productiva

4.1.3.1. Breve descripción de procesos de obtención de cobre

El cobre se obtiene a partir de minerales sulfurados (80%) y de minerales oxidados (20%). La concentración del mineral se realiza generalmente mediante los métodos de flotación, para el caso de sulfuros, o mediante lixiviación, cuando los minerales que predominan son óxidos (Carbajal y Favela, 2008). Ambos procesos comienzan con el chancado, hasta llegar a los tamaños de grano requeridos por cada uno.

La flotación se refiere a un proceso de separación de materias de distinto origen que se efectúa desde pulpas acuosas por medio de burbujas y a base de sus propiedades hidrófilas e hidrófobas. Esta pulpa se obtiene gracias a la adición de reactivos (aceite de pino, xantatos de sodio y potasio, tionocarbonatos, ditiofosfatos, tiocarbanilida etc.). Posteriormente se le inyecta aire, provocándose la adsorción del cobre el cual flota, mientras el rechazo o ganga se va hacia el fondo. Luego, el cobre se espesa en equipos, que pueden ser cilindro-cónicos, mediante las fases de clasificación, transición y compresión. De este proceso, se obtiene un concentrado que oscila entre el 20 al 30% de ley. El material rechazado se deriva a relaves (Hermida, 2007).

La composición química de un relave dependerá de la naturaleza mineralógica de las menas, mientras que sus características físicas (granulometría, porcentaje de sólidos, etc.) dependen de las características de los procesos de concentración. Sin perjuicio de lo anterior, se puede afirmar que en general estos presentan pH básico. Por ejemplo, los relaves de sulfurados de El Teniente presentan altas concentraciones de molibdeno debido a las altas concentraciones de molibdenita, en condiciones oxidantes alcalinas. Si los relaves son ricos en pirita (FeS_2) y están en contacto con el aire o agua, su oxidación desarrolla ácido sulfúrico (Oyarzún, 2007). Vargas *et al* (2013), determinaron en un relave proveniente de procesos de flotación de cobre diversas especies mineralógicas, estas fueron malaquita, crisocola, clacopirita, calcosin, covelina, bornita, pirita,

magnetita, hematita, limonita, rutilo y ganga no metálica. En este mismo estudio, se determinó la presencia de los siguientes elementos químicos: oxígeno, silicio, aluminio, calcio, sodio, hierro, potasio, magnesio, carbono, cobre, titanio, azufre, bario, fósforo, estroncio, cloro, cromo, rubidio, zinc y germanio.

Los siguientes pasos de la flotación son la tostación, fusión de mata y afino. En el primero se realiza una oxidación parcial de los concentrados de sulfuro de cobre con aire y la eliminación parcial del sulfuro en forma de SO_2 . El producto de la tostación es una mezcla de sulfuros, sulfatos y óxidos (Hermida, 2007).

La fusión de mata permite formar dos fases líquidas inmiscibles: una fase líquida de sulfuro (mata) que contiene todo el cobre de la carga y una fase líquida de escoria sin cobre. La mata tiene un contenido en cobre de entre un 35 a un 65%. Posteriormente, mediante el uso de temperatura aproximada de 1.200°C y fundentes se puede obtener pureza entre 98,5 a 99,5% (cobre blíster). La gran desventaja de este método es la contaminación de la atmósfera con el gas SO_2 (Hermida, 2007).

En el último paso de la obtención de cobre mediante flotación, el cobre blíster se refina electroquímicamente para obtener cobre catódico de una gran pureza, superior al 99.99% (Hermida, 2007).

La lixiviación utiliza ácido sulfúrico y agua, el que solubiliza el cobre en su forma iónica (Cu^{2+}). El material se ordena en pilas el cual se riega con la solución antes nombrada (proceso de curado) mediante aspersores y goteros. Bajo la pila de lixiviación, debe existir una membrana impermeable, con un sistema de drenes que permiten recoger las soluciones que se infiltran. El riego se puede mantener entre 45 a 60 días. El material inicial puede ser reubicado en otros sectores realizando el mismo proceso hasta que ya no entregue más cobre. El material restante o ripio es transportado a botaderos, el que debe contar con una superficie del suelo impermeabilizada y drenes que recoja las soluciones producidas por eventos de lluvias (Cuadra, 2016).

La composición química y mineralógica del ripio de estériles dependerá de la mineralogía de las menas utilizadas. Si perjuicio de lo anterior, siempre se encontrará ácido sulfúrico, su concentración dependerá de los grados de recuperación que se hayan efectuado al material.

Posteriormente, la solución se mezcla con una solución de parafina y resina orgánica (SX). En esta etapa se capturan los iones de cobre en un complejo resina-cobre, mientras que la solución empobrecida se denomina refino se reutiliza en el proceso de lixiviación. El compuesto resina-cobre se trata en una solución electrolito rica en ácido, mejorando la concentración de cobre por litro (Cuadra, 2016).

Finalmente, se procede a la etapa de electroobtención (electrowin), donde se puede recuperar hasta el 99,99% del ion cobre. En esta etapa la solución sulfatada obtenida (CuSO_4), es llevada a estanques con placas metálicas, las cuales ordenadas en ánodos y cátodos generan un circuito por donde se hace circular electricidad de muy baja intensidad. En este proceso, el ion cobre migra al polo negativo. Después de 6 o 7 días, se obtienen cátodos de 99,99% de pureza (Cuadra, 2016).

4.1.4. Antecedentes del proyecto Delta

4.1.4.1. Antecedentes históricos de la Mina Panulcillo

El sector donde se enclava la mina Panulcillo, ha sido utilizado desde principios del siglo 19 para la extracción de cobre. Según antecedentes históricos recopilados, se determina que Panulcillo comienza explotaciones desde el año 1830, desde 1840 inicia actividades la fundición Panulcillo hasta el año 1918 (Araya, 2009). Posterior a esa fecha, existe actividad de las minas del sector en pequeña escala (piques).

La fundición se ubicó en el sector donde actualmente se encuentra un escorial, cercano al poblado de la Verdiona (Araya, 2009).

En el sector donde actualmente se encuentra actualmente el escorial de mina, se encontraba la antigua entrada de la mina Panulcillo, cercano a este se encontraba otro pique conocido como mina Robles. Se estima que estas minas se explotaron desde el año 1940 hasta el año 2006, con un total de extracción de 3.000 ton (Araya, 2009).

4.1.4.2. Hidrogeología

Según el estudio hidrogeológico presentado por ENAMI (Water Management Consultants, 2007), a nivel regional el sector se conoce como grupo Ovalle, el que incluye las cuencas Rincón de Sauce y Talhuén. El sector que comprende las cuencas

Rincón del Sauce y Talhuén, se ubica en una unidad denominada Media Montaña, correspondiente a los cordones que surgen a partir de la Cordillera Principal, ubicada hacia el este. En la zona, es posible observar algunas terrazas aluviales antiguas junto con depósitos fluviales actuales. En la zona de la quebrada Talhuén, se observa una gran cubierta sedimentaria heterogénea de origen coluvial-aluvial.

Las instalaciones de la Planta Delta se ubican sobre la cuenca Rincón del Sauce. Posteriormente, se une a la cuenca del Talhuén en el sector donde se ubican los pozos de aducción de aguas.

4.1.4.3. Litología

El estudio antes nombrado, determinó que el área la forman unidades de rocas volcánicas con intercalaciones de rocas sedimentarias marinas y continentales del Cretácico Inferior. Las unidades se encuentran intruídas por cuerpos graníticos de edad Cretácico Superior.

Los tipos litológicos presentes en el área son rocas estratificadas, estratos de Tamaya, estratos de reloj, formación arqueros, volcánicos y rocas intrusivas. De estos tipos, la composición estratigráfica más común es la andesita seguida por riolitos y ocoitas.

En cuanto a los depósitos sedimentarios recientes se definieron cuatro tipos, los cuales corresponden a rocas no consolidadas. Estos son Depósitos de terrazas del Cuaternario Antiguo Terciario Superior – Qt, Depósitos de terraza fluvial Cuaternario Reciente – Qfr, Depósitos fluviales actuales – Qfa y Depósitos aluviales y coluviales – Qac.

4.1.4.4. Unidades hidrogeológicas

El estudio Hidrogeológico (Water Management Consultants, 2007) define a las cuencas del Talhuén y rincón del Sauce como aquellas cercanas al Proyecto Delta, las que se describen a continuación.

4.1.4.4.1. Cuenca Talhuén

Para el sector de la cuenca Talhuén, se identificaron cuatro unidades hidrogeológicas principales:

- **Roca Fundamental**

Esta unidad presenta una permeabilidad secundaria, debido principalmente a su alto grado de fracturamiento y porosidad, permitiendo tanto el almacenamiento de agua en la parte alta de la cuenca y la recarga del acuífero de las unidades sedimentarias que conforman el relleno de la misma.

- **Depósitos Fluviales Recientes**

Lo constituyen sedimentos de granulometría gruesa a fina, dentro de una matriz arenosa-limosa, semi consolidada. Esta unidad se caracteriza por formar extensas terrazas en los flancos de la cuenca Talhuén de hasta 20 m de espesor. Estos rellenos se presentarían saturados, por debajo de los depósitos aluviales recientes.

- **Coluvios y Aluvios**

Consiste en depósitos de granulometría muy variada, desde bloques hasta arenas, en una matriz de grava arenosa poco consolidada. Esta unidad se desarrolla a lo largo de la quebrada, en las faldas de los cerros. Basándose en las características granulométricas, presentan una permeabilidad media a alta, constituyendo una zona de alimentación y de recarga a las unidades que se encuentran a menor altitud.

- **Depósitos Fluviales Actuales**

Consiste en grava gruesa a fina en una matriz arenosa-limosa. Su espesor varía a lo largo de la quebrada, disminuyendo de forma gradual aguas arriba. Conforman la unidad hidrogeológica sedimentaria permeable más relevante, ya que constituye un medio altamente capaz de almacenar agua para, posteriormente, transmitirla.

4.1.4.4.2. Cuenca Rincón del Sauce

Sobre esta cuenca es donde se encuentran la totalidad de instalaciones del proyecto Delta. Se reconocieron tres unidades hidrogeológicas principales:

- **Roca fundamental**

Corresponde a los estratos del Reloj, de carácter volcánico continental. Esta unidad se puede considerar como roca impermeable y no constituye acuífero. Solamente sirve como base para la depositación de potenciales sedimentos formadores de acuíferos.

- **Depósitos fluviales antiguos**

Corresponden a sedimentos de granulometría tipo grava gruesa a fina, en matriz arenosa-limosa semi consolidada. Esta unidad se extiende desde la Cuenca Talhuén hasta la confluencia de las cuencas Rincón del Sauce y Rincón Grande. Los sedimentos se encuentran parcialmente cubiertos por sedimentos coluviales-aluviales y constituirían una unidad hidrogeológicamente interesante debido a su permeabilidad y gran volumen asociado.

- **Depósitos fluviales actuales**

Compuesto por gravas gruesas en una matriz de arena limosa, cuyo espesor es variable a través de la quebrada, haciéndose menos denso aguas arriba. Conformar la unidad hidrogeológica sedimentaria permeable de mayor importancia, ya que constituye un medio de alta permeabilidad, con buenas porosidades interconectadas y buena transmisividad para el agua subterránea.

4.1.4.5. Balance hídrico

4.1.4.5.1. Procesos de recarga y descarga

La recarga al sistema ocurre principalmente durante los meses de invierno (mayo a agosto) producto de la infiltración en los depósitos sedimentarios no consolidados de la precipitación.

El estudio realizado por Water Management Consultants (2007) para el Proyecto Delta, utilizó porcentajes de infiltración probables mínimos y máximos entre el rango de 10 a 30% de la precipitación media anual. Por lo que, se estimó que el rango de recarga total

al acuífero es entre 3 y 21 l/s para la cuenca quebrada Rincón del Sauce y entre 16 y 102 l/s para la cuenca Quebrada Talhuén.

Considerando la ubicación, características topográficas y régimen hidrológico de ambas cuencas, se concluyó que el sistema funciona interconectado con una recarga para toda el área de estudio entre 19 l/s como mínimo considerando un año seco y el 10% de la precipitación como recarga al acuífero y 190 l/s como máximo considerando un año húmedo y el 30% de la precipitación como recarga.

4.1.4.5.2. Flujo de agua subterránea

Según las estimaciones realizadas en el estudio Hidrogeológico de Delta (Water Management Consultants, 2007), se estimó un flujo pasante para la cuenca Quebrada Rincón del Sauce de 103 l/s y, para la parte baja de esta cuenca, de 110 l/s. Del mismo modo, para la cuenca quebrada Talhuén el flujo pasante se estimó en 89.0 l/s (Tabla N° 4).

Tabla N° 4: Estimación del flujo pasante según la ecuación de flujo pasante de Darcy (K: velocidad; H: altura; T: transmisividad del acuífero).

Cuenca	Permeabilidad	Ancho (m ²)	K (m/s)	H (m)	T (m ² /s)	Gradiente	Q (l/s)
Cuenca Quebrada Rincón del Sauce Parte Alta	Min	500	1.0E-06	50	5.0E-05	3.5E-02	0.86
	Max		1.0E-03		5.0E-02	3.5E-02	862
	Permeabilidad estimada a partir de las pruebas de bombeo		1.2E-04		6.0E-03	3.5E-02	103
Cuenca Quebrada Rincón del Sauce Parte Baja	Min	1400	1.0E-06	170	1.7E-04	3.9E-03	0.92
	Max		1.2E-04		1.7E-01	3.9E-03	918
	Permeabilidad estimada a partir de las pruebas de bombeo		1.0E-03		2.0E-02	3.9E-03	110
Cuenca Quebrada Talhuén	Min	3000	1.0E-06	90	9.0E-05	2.7E-03	0.74
	Max		1.0E-03		9.0E-02	2.7E-03	740
	Permeabilidad estimada a partir de las pruebas de bombeo		1.2E-04		1.1E-02	2.7E-03	89

Fuente: Estudio Hidrogeológico de Delta. Water Management Consultants, 2007.

4.1.4.6. Sobre los procesos, materiales de entrada y residuos de producción de la Planta Delta

4.1.4.6.1. Mina Panulcillo

El proceso de extracción de minerales comienza con la apertura a los cuerpos mineralizados. La explotación se realiza mediante el método *Stoping-sub levely* consiste en la explotación de bloques a través de tajadas, las que son perforadas desde subniveles en forma ascendente y descendente.

El agua utilizada por la explotación, se decanta y recircula al proceso de flotación y/o perforación. Esta se drena a través de bombas eléctricas y conducidas por tuberías hacia un estanque decantador.

Los estériles generados se acumulan en un botadero, que consideró en su diseño condiciones de estabilidad física y química.

4.1.4.6.2. Proceso de flotación

El material utilizado o menas provienen, en el período en estudio, de la mina Panulcillo. Las especies mineralógicas se pueden observar en la tabla N° 5.

Tabla N° 5: Composición mineralógica 100% base mineral a muestras de cabeza de mina Panulcillo.

Especies	Símbolo	% en peso	Cu	Fe	S
Calcopirita	CuFeS ₂	3,42	1,18	1,04	1,2
Calcosina	Cu ₂ S	tz			
Covelina	CuS	tz			
Bornita	Cu ₃ FeS ₄	0,38	0,24	0,04	0,1
Galena	PbS	tz			
Blenda	ZnS	0,3			0,1
Rutilo	TiO ₂	tz			
Pirita	FeS ₂	0,57		0,26	0,3
Pirrotina	Fe _{0,8-1} S	tz			
Hematita	Fe ₂ O ₃	0,19		0,13	
Magnetita	Fe ₃ O ₄	4,04		2,92	
Limonita	Fe ₂ O ₃ *nH ₂ O	tz			
Ganga no metálica		91,11			
Total		100	1,42	4,4	1,69

Fuente: Guarachi Ingenieros LTDA. 2014.

Las especies de interés para la producción de cobre son Calcopirita, Bornita, Calcosita y Covelina.

Tal como fue descrito en el punto 4.1.3.1, el proceso continua con el chancado, molienda, flotación y remolienda, espesaje y filtrado de concentrado. Los reactivos utilizados en la flotación, que se identifican en el EIA (2007), son:

- Colectores: SF-323, SF-114, A-208.
- Espumantes: aceite de pino, DF-1012.
- Dispersante de ganga.
- Floculante.

Finalmente, el material de descarte se lleva a un proceso de espesaje y disposición de relave.

El relave que se genera en la Planta Delta es espesado, esto significa que su concentración de sólidos se encuentra entre 65 a 75%.

4.1.4.6.3. Proceso de lixiviación

El material utilizado para este proceso son óxidos, principalmente crisocola (CuSiO_3) Posterior al chancado, se realiza aglomeración con ácido sulfúrico concentrado y agua. Las etapas siguientes son lixiviación en pilas, extracción por solventes (SX), electrodeposición (electrowin/EW) y finalmente, lixiviación secundaria de material proveniente de la lix primaria.

Las materias primas e insumos utilizados en la planta de lixiviación se muestran en la tabla N° 6.

Tabla N° 6: Materias primas e insumos Planta lixiviación

Materias primas e insumos	Área Lix
Ácido sulfúrico	Lix
Reactivo extractante (Lix 9790 N o un equivalente)	SX
Diluyente	SX
Sulfato de cobalto	EW
Guartec	EW
PF-1000	EW

4.1.4.6.4. Residuos domésticos, Residuos Peligrosos, Residuos industriales y plantas de tratamiento de aguas servidas

Los residuos domésticos son acopiados en contenedores, los cuales son retirados de la Planta dos veces a la semana. Su disposición final es en vertederos o rellenos sanitarios autorizados por la autoridad competente.

Los RESPEL generados en el proceso de producción, son almacenados en un patio de RESPEL, el cual fue aprobado por la autoridad sanitaria. Estos residuos son retirados cada 6 meses.

La mayor acumulación de RESPEL, se refiere a aceites usados, los que son envasados en bins de 1.000 litros o tambores de 200 litros.

Los residuos industriales (reciclables o reutilizables) son acumulados en un patio de salvataje. Corresponde principalmente a madera y estructuras metálicas. Estos se retiran cada un año, aproximadamente.

En cuanto al tratamiento de aguas servidas, existen plantas de lodos activados. El agua resultante del tratamiento, se utiliza principalmente en el regadío de jardines. El agua tratada no utilizada, se retira en camiones aljibes, siendo llevada a disposición final en planta de tratamiento autorizadas.

4.1.4.7. Principales fuentes de contaminación de aguas subterráneas identificadas en el EIA

En el contexto del presente estudio, tomando en cuenta que según los datos entregados sobre las unidades hidrogeológicas recién descritas, se infiere que ambos acuíferos son de tipo no confinado, es decir, son permeables. Esto quiere decir que las capas litológicas son influenciadas por lo que ocurre en la superficie, implicando que el agua que cae al suelo en forma de precipitación, se infiltrará hacia capas más profundas acarreado con ello lo que esté disponible en la superficie en ese momento, ya sean los minerales presentes naturalmente como desechos de alguna actividad humana.

Dado lo anterior, las fuentes de contaminación de suelo deben ser identificadas a priori, en el proceso de elaboración del proyecto. Gracias a esta previsión, se podrán determinar las eventuales medidas de mitigación o corrección de procesos, a fin de evitar

contaminar las aguas subterráneas, que en el caso en estudio, son vulnerables debido a la constitución litológica del acuífero.

El EIA realizado por la empresa indica en el capítulo 5.6 “calificación de impactos ambientales”, numeral f) Recursos Hídricos subterráneos, que los impactos potenciales son el cambio en el nivel freático y la contaminación de las aguas durante las distintas etapas del Proyecto (tabla N° 7).

Tabla N° 7: Impactos en los Recursos Hídricos Subterráneos y Actividades Asociadas

Etapas	Impacto	Actividad asociada
Construcción	Cambio en el nivel freático	Captación de agua desde pozos
	Contaminación del agua	Carga y descarga de combustibles
Operación	Cambio en el nivel freático	Captación de agua desde pozos
	Contaminación del agua	Carga y descarga de combustibles
Cierre - abandono	Contaminación del agua	Desmantelamiento de estructuras

Fuente: EIA Delta, 2007.

En el EIA del proyecto, se asegura que en la operación normal no se generará contaminación de la disposición de residuos mineros. Respecto al potencial impacto de infiltración producto del depósito de relaves, “*se estima que éste será mínimo de acuerdo a las características de construcción,...*” *no obstante, y para prevenir la infiltración de aguas contaminadas en casos extremos, se construirá una zanja colectora interna y un canal perimetral, que podrán controlar y manejar las aguas lluvias. Del mismo modo, se realizó un análisis de laboratorio a muestras de estériles del botadero, el cual indica que no existe potencial de contaminación a corto ni largo plazo producto de la disposición de estériles.*”

No obstante lo anterior, se considera en dicho estudio que la contaminación de aguas podría provocarse “*...ante eventos de derrames o infiltraciones de soluciones que pudiesen llegar a contaminar las aguas subterráneas, referido principalmente a hidrocarburos, aceites y soluciones ácidas.*”. Dicha contaminación podría provocar alteraciones físico-químicas en la calidad de las aguas.

4.2. Comportamiento de todos los parámetros

Los resultados se expresan a través de gráficos que se informan en las secciones siguientes. De los 47 parámetros estudiados, 11 presentaron al menos una ocasión sobre norma. Lo anterior implica que el 77% de los parámetros estudiados no presentan valores sobre norma.

Los siguientes parámetros no presentaron ocasiones sobre la norma fueron los siguientes:

Fluoruro, Cromo, Cobre, Magnesio, Cinc, Nitrato, Nitrito, Razón nitrato+nitrito, Benceno, Tetracloroetano, Tolueno, Xileno, 2,4 D, DDT+DDD+DDE, Lindano, Metoxiclor, Pentaclorofenol, Monocloraminas, Bromodichlorometano, Dibromoclorometano, Tribromometano, Triclorometano, Trihalometanos, Amoniac, Cloruros, Sulfato, Compuestos Fenólicos, Color verdadero, Coliformes Totales, Cloro libre residual, Calcio, Potasio, Sodio, Alcalinidad, Conductividad, Dureza Teórica.

4.3. Criterio 1: parámetros sobre la norma

Una vez graficados, se comparó con los límites de norma. El resumen de resultados se puede observar en la tabla N° 8. Se encontraron 181 ocasiones en que se superó la Norma, siendo Hierro (Fe) el parámetro con el mayor número (88).

Tabla N° 8: Resumen de ocasiones sobre norma por pozo y parámetro.

Pozo	Fe	Mn	As	Se	Pb	Cd	Cn	Hg	pH	SDT	Turbiedad	Total
PC-1-EM	20	12	6	0	2	1	0	0	0	1		42
PC-1-PL	6	1	2	0	1	0	0	0	0	0		10
PC-2-PL	5	5	2	0	2	0	0	0	0	0		14
PC-2-DR	19	17	5	1	3	1	1	0	0	0		47
T2-26	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	11
T3-26	11	1	0	0	0	0	0	0	1	0	11	24
T4-26	20	3	0	0	0	0	0	1	0	0	9	33
	88	39	15	1	8	2	1	1	2	1	23	181

El detalle de resultados de los parámetros fuera de norma se puede revisar desde los puntos 4.3.1. al 4.3.11.

4.3.1. Hierro (Fe)

Hierro es el parámetro que más veces supera la norma, con 88 ocasiones (Tabla N°9). De estas, 38 ocurrieron en la denominada línea base de aguas, mientras que 50 ocasiones se produjeron en la etapa de operaciones.

En los gráficos N° 2 y N° 3 se puede observar el comportamiento del Fe durante todo el período de estudio. En estos se visualiza que constantemente este parámetro sobrepasa el límite normado para ambos tipos de pozo.

Tabla N° 9: Fechas en que Hierro superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Unidades	Limite Norma	jun-09	jul-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	feb-10	mar-10	abr-10	Total
PC-1-EM	mg/L Fe	0,3	9,64	0,676	0,359	0,454	0,539	0,714	0,134	0,32	0,218	7
PC-1-PL	mg/L Fe	0,3	0,305	0,092	0,047	0,078	0,037	0,031	0,105	0,002	0,025	1
PC-2-PL	mg/L Fe	0,3	2,58	0,882	0,279	0,475	0,171	0,079	0,118	0,002	0,055	3
PC-2-DR	mg/L Fe	0,3	12	1,46	4,31	1,4	1,06	0,915	0,54			7
T2-26	mg/L Fe	0,3		0,705	0,134	0,057	0,166	0,24		0,327	0,812	3
T3-26	mg/L Fe	0,3	0,82	0,179	4,87	0,046	0,165	1,58	0,026	0,059	1,33	4
T4-26	mg/L Fe	0,3			2,14	4,99			3,93	1,41	3,15	5
Pozo	Unidades	Limite Norma	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10	oct-10	nov-10	dic-10	ene-11	
PC-1-EM	mg/L Fe	0,3	0,936	0,147	0,071	0,279	0,043	0,071	0,007	0,03	0,331	2
PC-1-PL	mg/L Fe	0,3	0,016	0,04	0,076	0,063	0,241	0,11	0,315	0,032	0,128	1
PC-2-PL	mg/L Fe	0,3	0,058	0,002	0,037	0,062	0,041	0,114	0,017	0,097	0,097	0
PC-2-DR	mg/L Fe	0,3	0,927	0,575	0,013	0,01	0,238	0,316	0,027	0,085	0,145	3
T2-26	mg/L Fe	0,3		0,324	0,164	0,071	0,163	0,022	0,503	0,043	0,059	2
T3-26	mg/L Fe	0,3	4,53	3,66	1,42	0,042	0,026	0,058	0,013	0,039	6,57	4
T4-26	mg/L Fe	0,3	0,414	0,472	0,656	2,17	1,14	0,468	3,82	0,695	0,663	9
Pozo	Unidades	Limite Norma	feb-11	mar-11	may-11	jun-11	jul-11	sep-11	nov-11	dic-11	ene-12	
PC-1-EM	mg/L Fe	0,3	0,173	0,323	0,63	0,028	0,027	0,018	0,16	0,182	0,332	3
PC-1-PL	mg/L Fe	0,3	0,164	0,083	0,094	0,023	0,032	0,024	0,358	0,394	0,171	2
PC-2-PL	mg/L Fe	0,3	0,222	0,109	0,039	0,037	0,03	0,02	0,085	0,127	0,275	0
PC-2-DR	mg/L Fe	0,3	0,179	0,106	0,582	0,035	0,472	0,954	0,778	0,197	0,163	4
T2-26	mg/L Fe	0,3	0,175	0,348	0,935	0,132						2
T3-26	mg/L Fe	0,3	0,023	0,091	0,076	1,38				0,02		1
T4-26	mg/L Fe	0,3	1,32	0,796	1,1					0,534		4
Pozo	Unidades	Limite Norma	feb-12	mar-12	abr-12	jun-12	jul-12	nov-12	dic-12	ene-13	feb-13	
PC-1-EM	mg/L Fe	0,3	1,62	1,64	1,68			2,6	3,07	5,62	2,05	7
PC-1-PL	mg/L Fe	0,3	0,059	0,021	0,553		0,097	0,002	0,002	0,097	0,67	2
PC-2-PL	mg/L Fe	0,3	0,345	0,027	0,328		0,031	0,002	0,002	0,002	0,05	2
PC-2-DR	mg/L Fe	0,3	0,67								1,59	2
T2-26	mg/L Fe	0,3		0,048	0,094	0,033	0,033	0,002	0,133	0,018	0,02	0
T3-26	mg/L Fe	0,3		0,035	0,067	0,061	0,061	0,002	0,002	0,015	0,65	1
T4-26	mg/L Fe	0,3		0,201	0,27	0,404	0,404	0,021	0,002	0,048	0,14	2
Pozo	Unidades	Limite Norma	mar-13	abr-13	may-13							
PC-1-EM	mg/L Fe	0,3	0,15	0,29	0,66							1
PC-1-PL	mg/L Fe	0,3	0,05	0,1	0,03							0
PC-2-PL	mg/L Fe	0,3	0,13	0,06	0,03							0
PC-2-DR	mg/L Fe	0,3	2,15	2,54	0,66							3
T2-26	mg/L Fe	0,3	0,02	0,09	0,1							0
T3-26	mg/L Fe	0,3	0,31	0,14	0,1							1
T4-26	mg/L Fe	0,3	0,25	0,14	0,05							0
												88

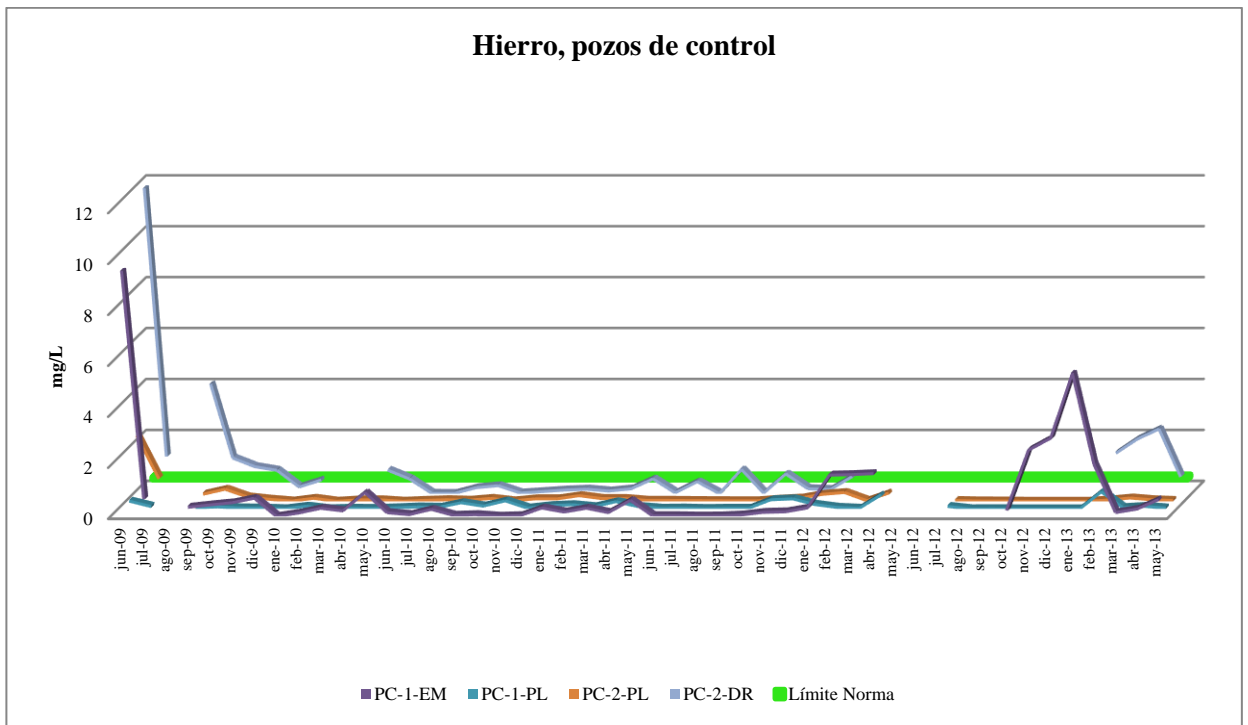


Gráfico N° 2: Comportamiento del Hierro en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,3 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

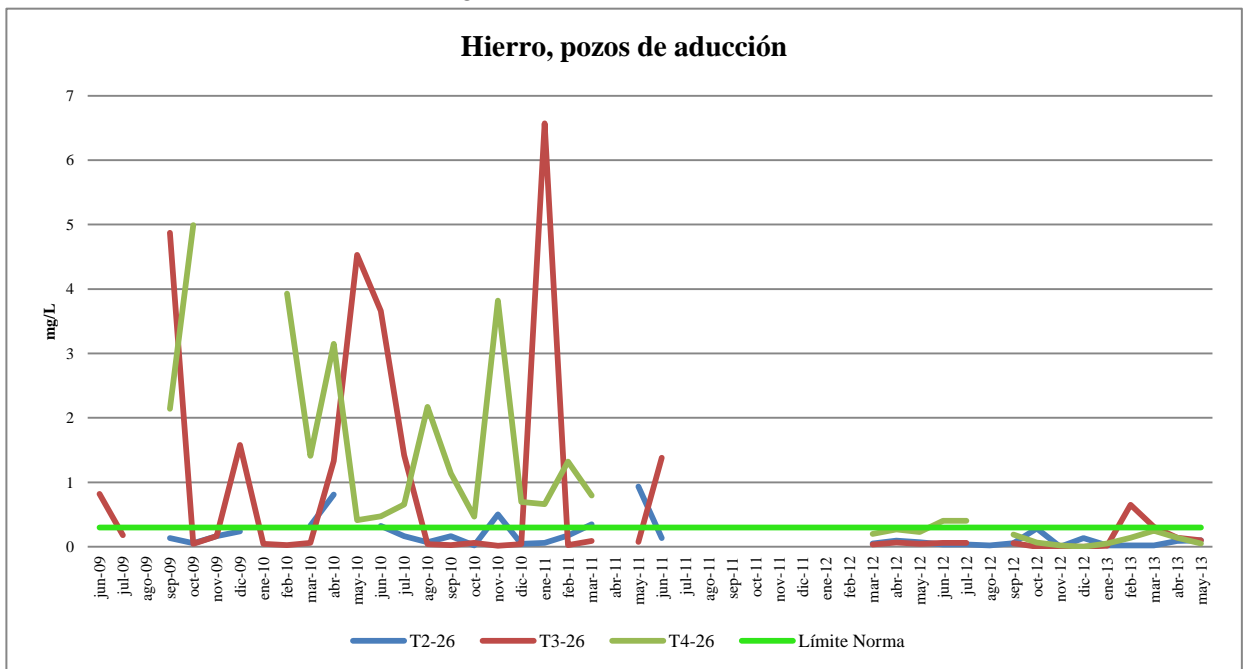


Gráfico N° 3: Comportamiento del Hierro en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,3 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.2. Manganeso (Mn)

Este es el segundo parámetro con más ocasiones de sobrepaso de norma (39), respecto del total analizado. La Norma indica un límite de 0,1 mg/L. al revisar la serie temporal de datos, el manganeso supera la norma en distintas ocasiones, principalmente en los pozos de control (gráficos N° 4 y N° 5). Cabe hacer notar que los peak de incrementos de Mn en los pozos de control PC-1-EM, PC-2-PL y PC-2-DR (tabla N° 10), se observan principalmente durante la denominada línea base, es decir, cuando el relave aún no comenzaba a operar (jun-2009 a jun-2010). Posteriormente, es en el pozo PC-2-DR donde se observan peaks significativos de manera discontinua, entre mayo a septiembre de 2011 y febrero a abril de 2012.

Se puede observar que los pozos de aducción T3-26 y T4-26, también presentan niveles sobre la norma en enero de 2010 y; en octubre/noviembre de 2009 y febrero de 2010, respectivamente.

Tabla N° 10: Fechas en que Manganeso superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Unidades	Límite Norma	jun-09	jul-09	sep-09	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10	feb-10	abr-10	may-10	jun-10	Total
PC-1-EM	mg/L Mn	0,1	4,22	2,06	1,4	0,921	0,996	0,649	0,089	0,118	0,182	0,296	0,013	9
PC-1-PL	mg/L Mn	0,1	0,061	0,001	0,003	0,003	0,003	0,038	0,001	0,001	0,001	0,015	0,001	0
PC-2-PL	mg/L Mn	0,1	0,669	0,104	0,001	0,122	0,262	0,096	0,546	0,03	0,023	0,032	0,002	5
PC-2-DR	mg/L Mn	0,1	4,6	1,94	1,92	1,47	1,63	1,37	0,636	0,871		1,03	0,496	10
T2-26	mg/L Mn	0,1		0,014	0,006	0,001	0,004	0,016			0,026		0,002	0
T3-26	mg/L Mn	0,1	0,042	0,007	0,041	0,003	0,001	0,043	1,3	0,001	0,05	0,079	0,024	1
T4-26	mg/L Mn	0,1			0,438	0,311				0,127	0,085	0,006	0,003	3
Pozo	Unidades	Límite Norma		oct-10	nov-10	may-11	jul-11	sep-11	dic-12	ene-13	feb-13	mar-13	abr-13	
PC-1-EM	mg/L Mn	0,1		0,002	0,004	0,057	0,006	0,001	0,12	0,31	0,103	0,032	0,077	3
PC-1-PL	mg/L Mn	0,1		0,01	0,636	0,008	0,003	0,002	0,004	0,001	0,024	0,012	0,012	1
PC-2-PL	mg/L Mn	0,1		0,004	0,008	0,005	0,004	0,001	0,00	0,00	0,012	0,012	0,012	0
PC-2-DR	mg/L Mn	0,1		0,642	0,007	0,748	0,444	0,274			1,165	0,226	0,2	7
T2-26	mg/L Mn	0,1		0,001	0,012	0,007			0,002	0,001	0,016	0,016	0,016	0
T3-26	mg/L Mn	0,1		0,001	0,003	0,005			0,002	0,002	0,056	0,031	0,016	0
T4-26	mg/L Mn	0,1		0,006	0,04	0,019			0,001	0,004	0,016	0,016	0,016	0
														39

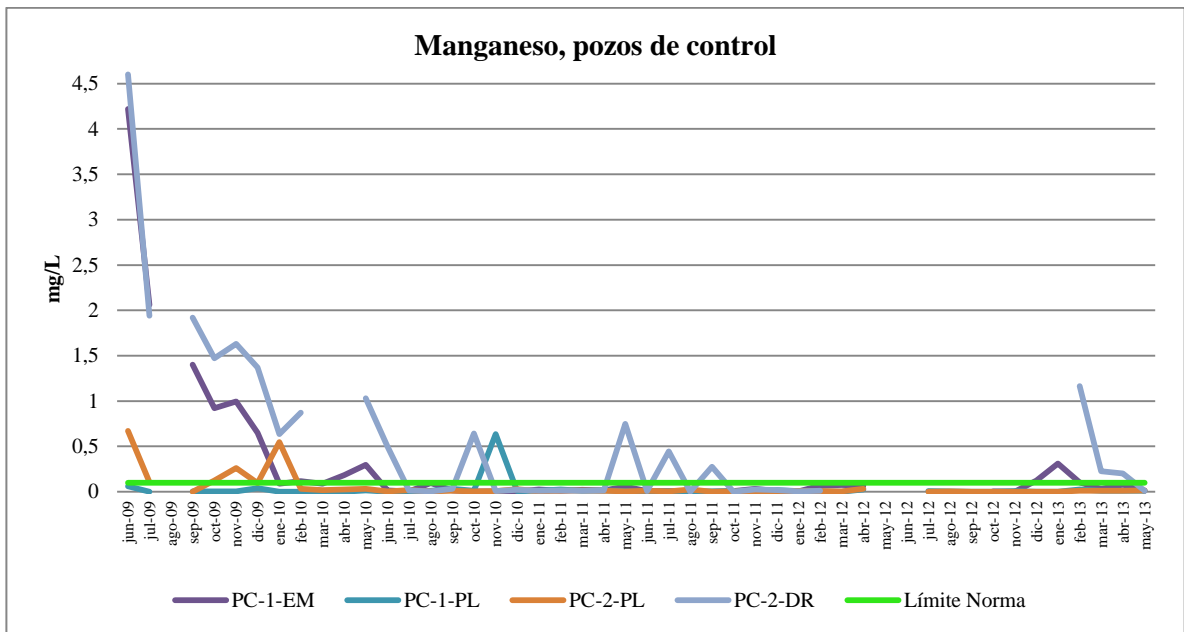


Gráfico N° 4: Comportamiento del Manganeso en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,1 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

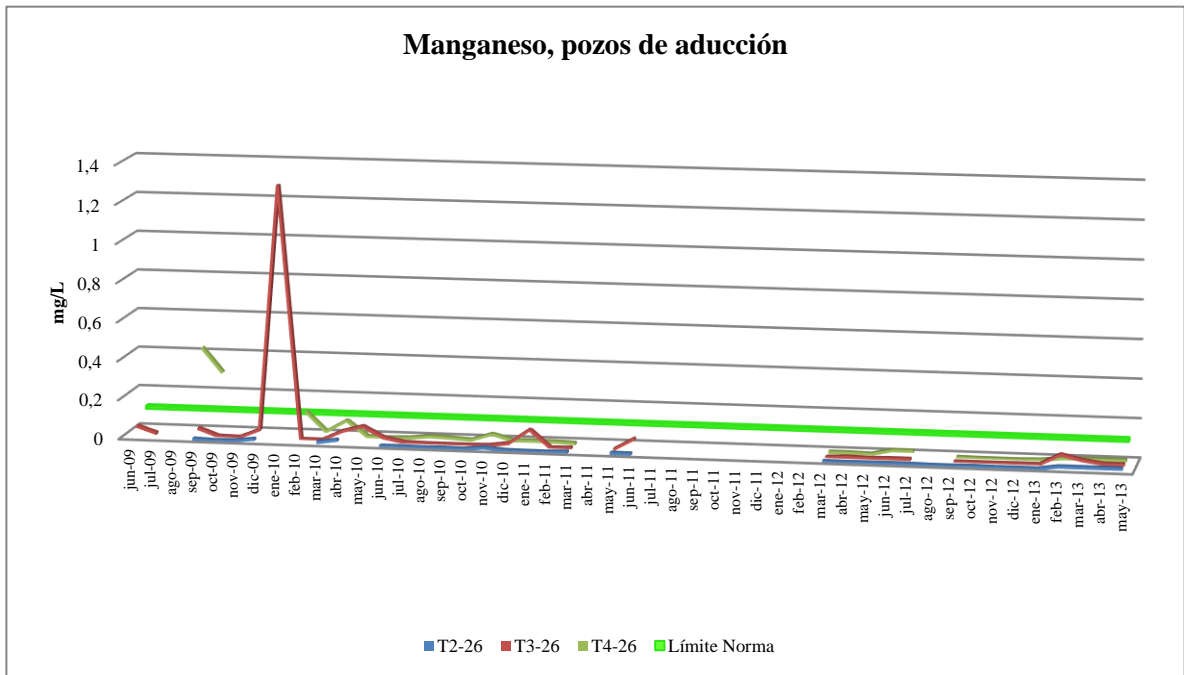


Gráfico N° 5: Comportamiento del Manganeso en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,1 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.3. Arsénico (As)

Según lo que se observa en la serie temporal de datos de los distintos pozos muestreados mensualmente, el límite de 0,01 mg/L es superado en distintas ocasiones principalmente

en los pozos de control (gráficos N° 6 y N° 7). Estos valores se dieron particularmente entre los meses de junio de 2009 a febrero de 2010. Luego, en noviembre de 2010; enero, febrero y octubre de 2012 se producen alzas en los pozos de control (Tabla N° 11). Cabe destacar que en enero de 2012, todos los pozos de control presentaron valores sobre la norma.

Finalmente, desde febrero a mayo de 2013 en los pozos de control los valores son menores a 0,01 mg/L. Lo anterior se produjo debido al cambio de laboratorio, en que el límite de detección utilizado fue 0,01 mg/L, ya que estos pozos se monitorean según la norma de agua de riego (NCh 1333).

Tabla N° 11: Fechas en que Arsénico superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Unidades	Limite Norma	jun-09	jul-09	sep-09	oct-09	feb-10	nov-10	ene-12	feb-12	oct-12	Total
PC-1-EM	mg/L As	0,01	0,012	0,013	0,006	0,011	0,007	0,002	0,016	0,02	0,012	6
PC-1-PL	mg/L As	0,01	0,001	0,002	0,005	0,004	0,001	0,013	0,02	0,002	0,002	2
PC-2-PL	mg/L As	0,01	0,001	0,013	0,005	0,003	0,001	0,002	0,018	0,001	0,002	2
PC-2-DR	mg/L As	0,01	0,01	0,009	0,011	0,013	0,016	0,001	0,015	0,02		5
T2-26	mg/L As	0,01		0,001	0,003	0,005		0,002			0,001	0
T3-26	mg/L As	0,01	0,006	0,002	0,004	0,003	0,001	0,002			0,001	0
T4-26	mg/L As	0,01			0,001	0,004	0,001	0,002			0,001	0
												15

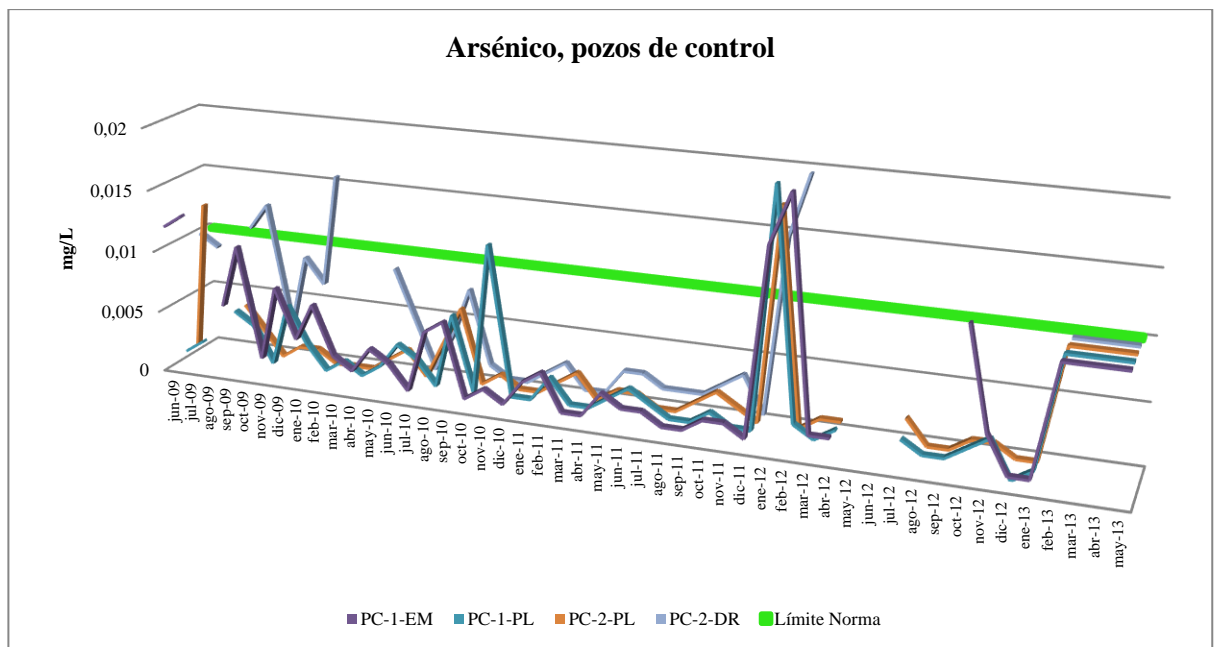


Gráfico N° 6: Comportamiento del Arsénico en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

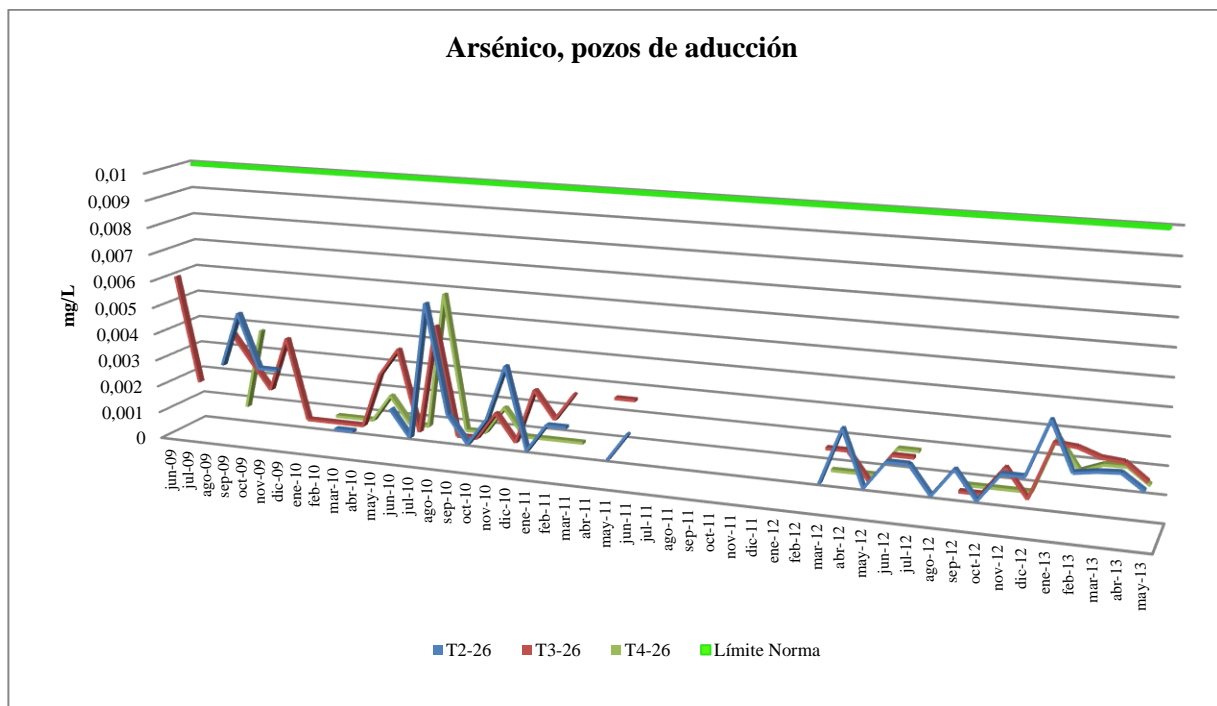


Gráfico N° 7: Comportamiento del Arsénico en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.4. Plomo (Pb)

Al revisar la serie de datos para este parámetro, se encontró que se superó la norma en el mes de junio de 2009 en todos pozos de control, período de línea base. Luego, en septiembre de 2009 en el pozo PC-2-DR, en octubre de 2009 en el pozo PC-2-PL, en enero de 2010 en el pozo PC-2-DR y en mayo de 2011 en el pozo PC-1-EM, se superó el valor normado (Tabla N° 12).

Posteriormente, no se observan alzas de Pb, tanto en pozos de aducción como de control (gráficos N°8 y N°9).

Tabla N° 12: Fechas en que Plomo superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Límite Norma	jun-09	sep-09	oct-09	ene-10	may-11	Total
PC-1-EM	Plomo	mg/L Pb	0,05	0,315	0,038	0,02	0,01	0,112	2
PC-1-PL	Plomo	mg/L Pb	0,05	0,083	0,01	0,01	0,01	0,038	1
PC-2-PL	Plomo	mg/L Pb	0,05	0,614	0,01	0,097	0,01	0,029	2
PC-2-DR	Plomo	mg/L Pb	0,05	0,266	0,069	0,01	0,1	0,022	3
T2-26	Plomo	mg/L Pb	0,05		0,01	0,01		0,01	0
T3-26	Plomo	mg/L Pb	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,049	0
T4-26	Plomo	mg/L Pb	0,05		0,01	0,01		0,023	0
									8

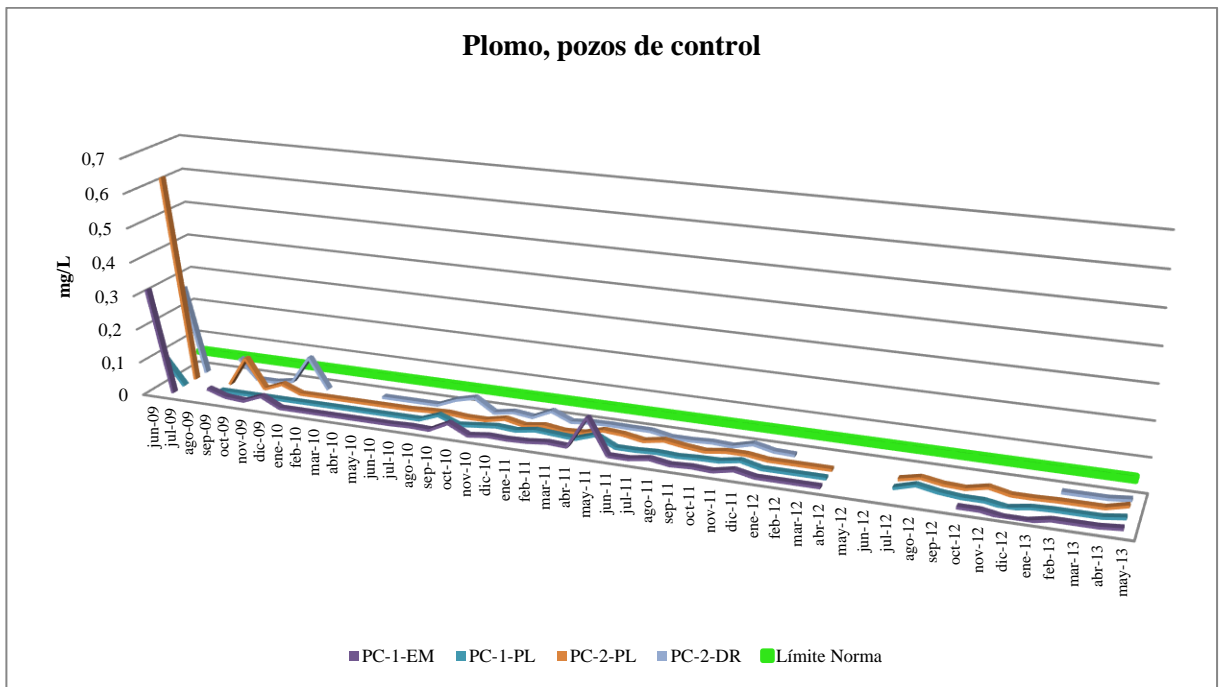


Gráfico N° 8: Comportamiento del Plomo en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

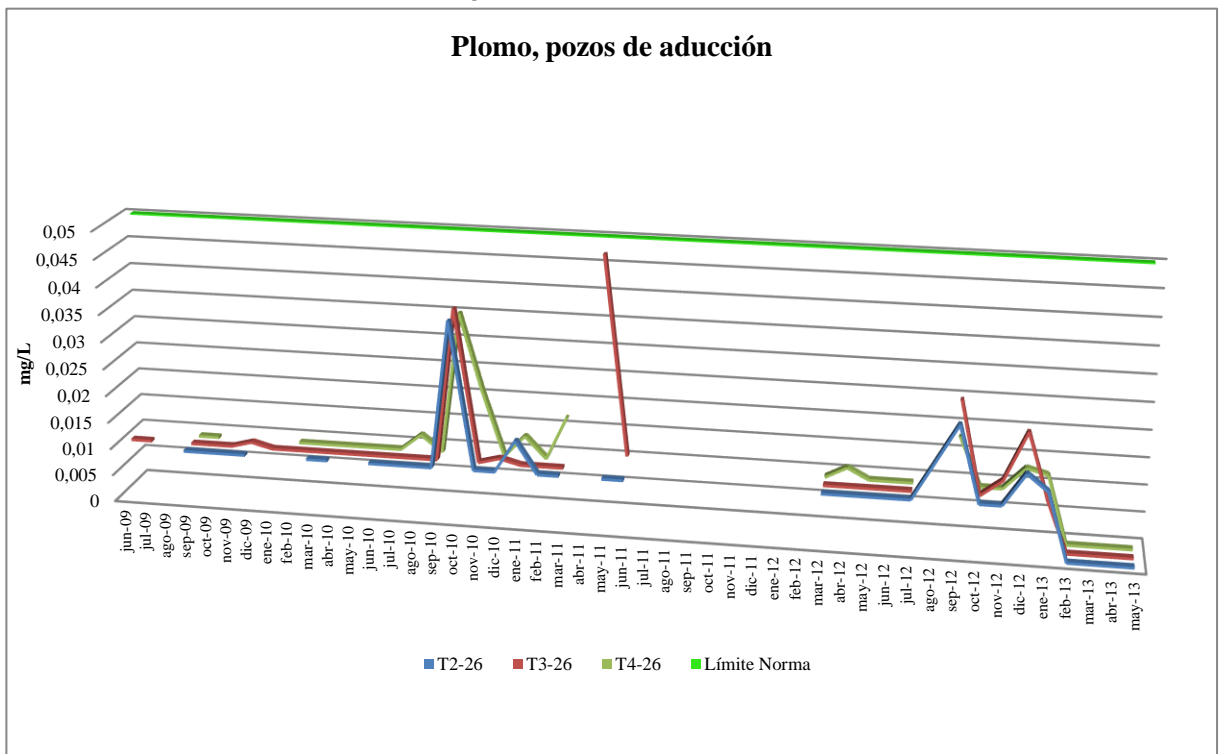


Gráfico N° 9: Comportamiento del Plomo en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.5. Cadmio (Cd)

Al revisar la serie temporal de datos (gráficos N° 10 y N° 11), se visualiza que los pozos PC-1-EM y PC-2-DR de control, sobrepasaron levemente el límite de norma, estipulado en 0,01 mg/L (Tabla N° 13). Ambos valores ocurren durante junio de 2009, período en el cual no operaba el relave de espesados, que se considera como línea base de la calidad de aguas.

Posteriormente, no se observan valores sobre la norma para todos los pozos.

Tabla N° 13: Fechas en que Cadmio superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Límite Norma	jun-09	Total
PC-1-EM	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,012	1
PC-1-PL	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,001	0
PC-2-PL	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,001	0
PC-2-DR	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,016	1
T2-26	Cadmio	mg/L Cd	0,01		0
T3-26	Cadmio	mg/L Cd	0,01	0,001	0
T4-26	Cadmio	mg/L Cd	0,01		0
					2

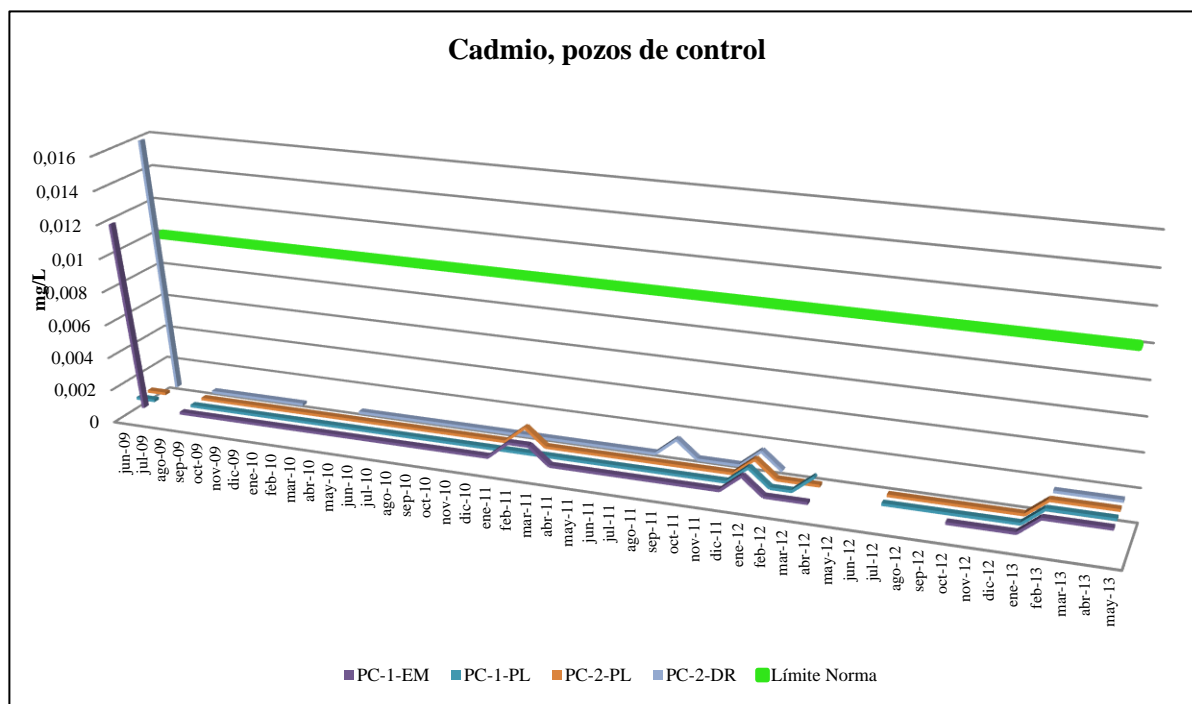


Gráfico N° 10: Comportamiento del Cadmio en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

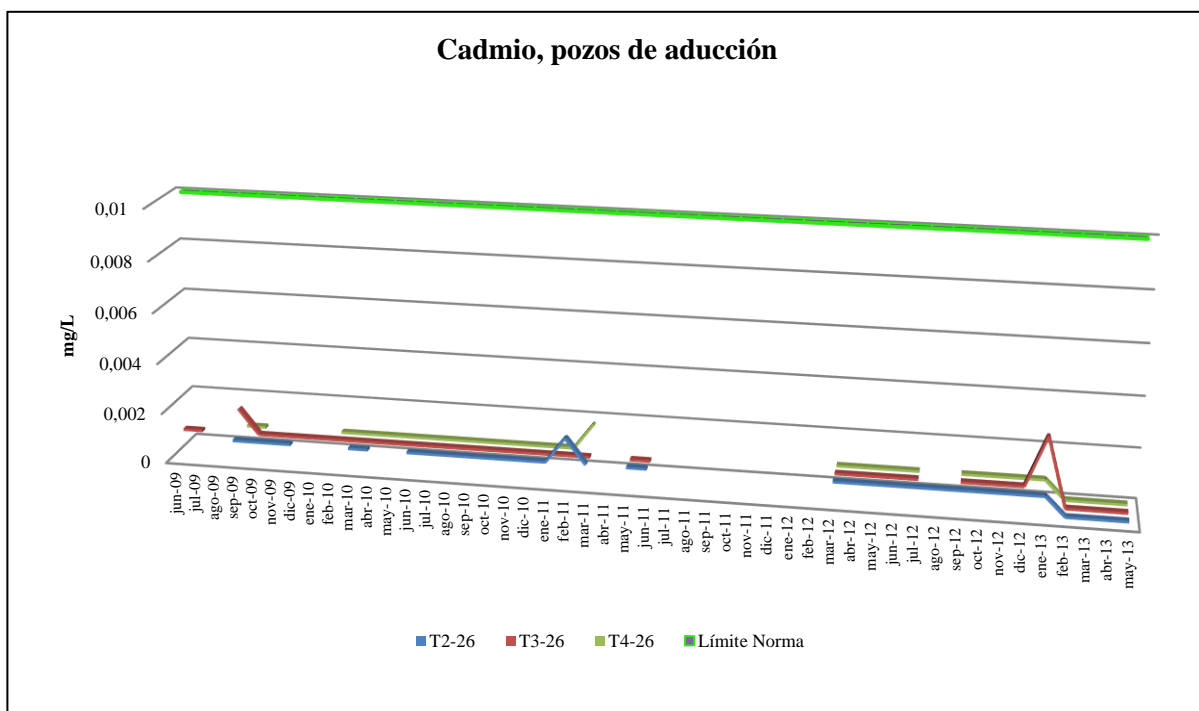


Gráfico N° 11: Comportamiento del Cadmio en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.6. Selenio (Se)

Para este parámetro, la Norma indica un límite de 0,01 mg/L. Al revisar la serie temporal de datos (gráfico N°12 y N°13), el Selenio supera la norma mayo de 2013 en el pozo de control PC-2-DR (Tabla N° 14).

En los pozos de aducción no se supera la norma en ningún mes.

Tabla N° 14: Fechas en que Selenio superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Limite Norma	may-13	Total
PC-1-EM	Selenio	mg/L Se	0,01	0,009	0
PC-1-PL	Selenio	mg/L Se	0,01	0,009	0
PC-2-PL	Selenio	mg/L Se	0,01	0,009	0
PC-2-DR	Selenio	mg/L Se	0,01	0,022	1
T2-26	Selenio	mg/L Se	0,01		0
T3-26	Selenio	mg/L Se	0,01		0
T4-26	Selenio	mg/L Se	0,01		0
					1

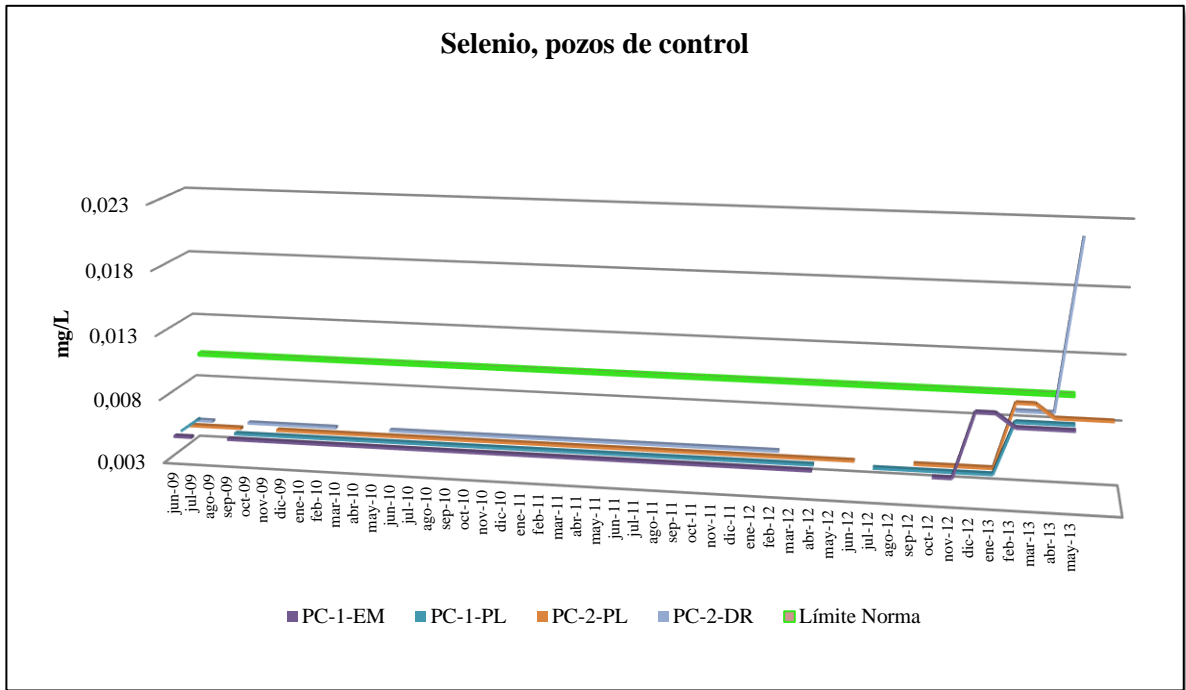


Gráfico N° 12: Comportamiento del Selenio en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

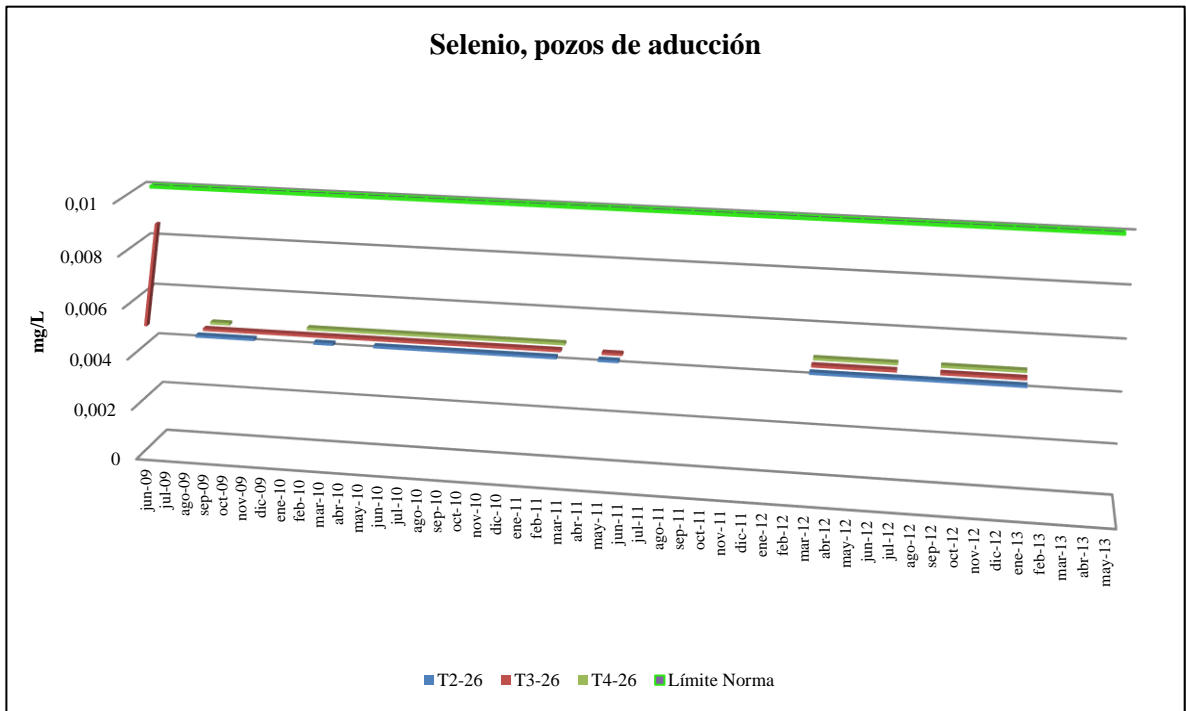


Gráfico N° 13: Comportamiento del Selenio en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,01 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.7. Cianuro total (CN)

Para este parámetro los niveles no deben superar los 0,05 mg/L. Se puede observar un peak puntual en el pozo de control PC-2-DR, en el mes de octubre de 2011 (Tabla N° 15). En el resto de los monitoreos el comportamiento del CN es bajo la norma con valores bajo los 0,02 mg/L mes (Ver gráfico N°14 y N°15).

Tabla N° 15: Fechas en que Cianuro Total superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Limite Norma	oct-11	Total
PC-1-EM	Cianuro Total	mg/L CN	0,05	0,02	0
PC-1-PL	Cianuro Total	mg/L CN	0,05	0,04	0
PC-2-PL	Cianuro Total	mg/L CN	0,05	0,02	0
PC-2-DR	Cianuro Total	mg/L CN	0,05	0,08	1
T2-26	Cianuro Total	mg/L CN	0,05		0
T3-26	Cianuro Total	mg/L CN	0,05		0
T4-26	Cianuro Total	mg/L CN	0,05		0
					1

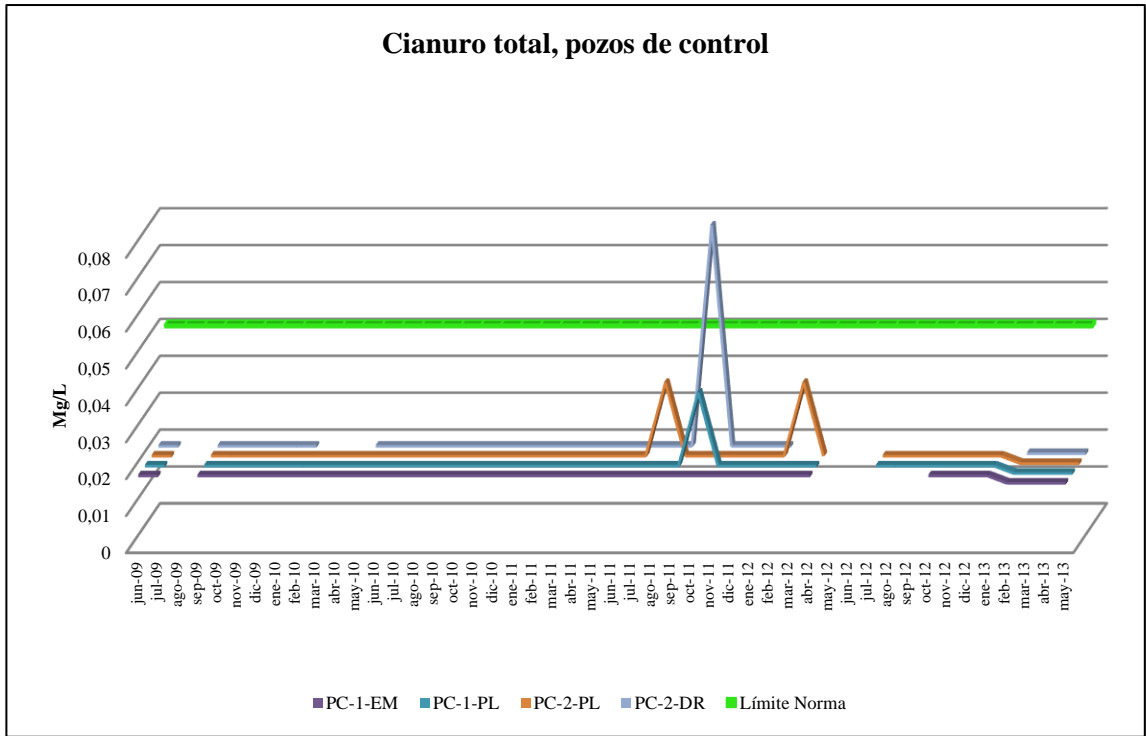


Gráfico N° 14: Comportamiento del Cianuro total en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

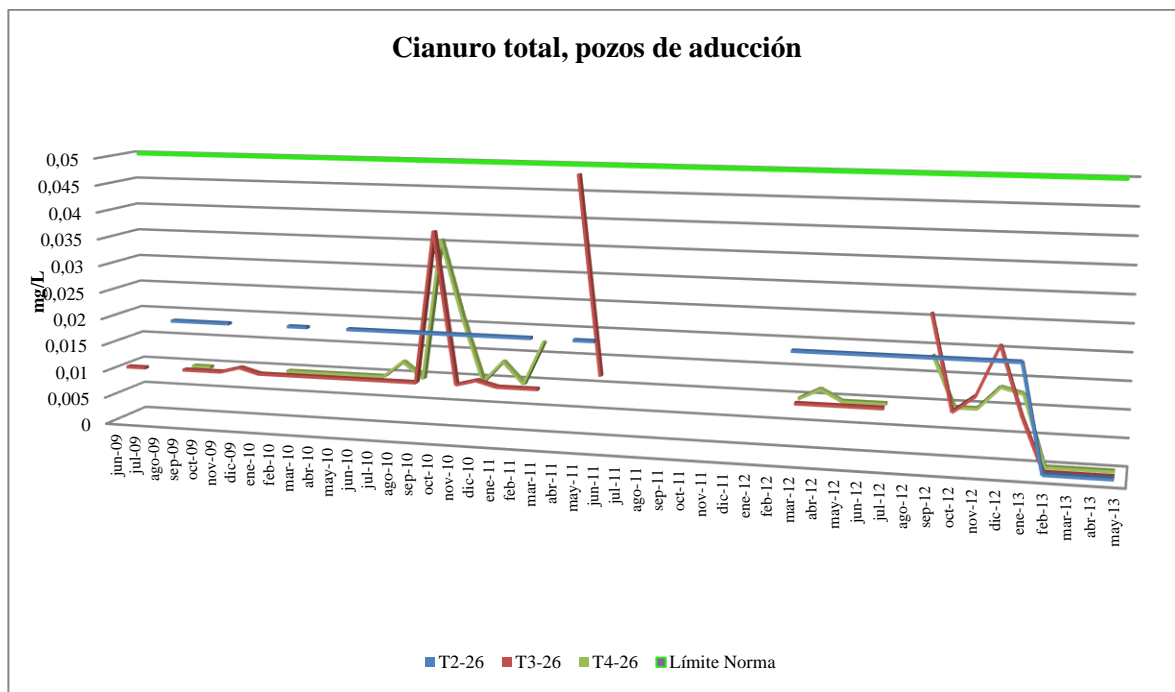


Gráfico N° 15: Comportamiento del Cianuro total en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,05 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.8. Mercurio (Hg)

Para este parámetro, solo existe una medición donde se supera levemente la norma en el pozo de aducción T4-26, en febrero de 2010 (Tabla N° 16). El resto de las mediciones se comporta debajo del límite de 0,001 mg/L, inclusive, a partir de febrero de 2013 al cambiar al proveedor de servicios de análisis de aguas y, por ende, su metodología de análisis, los valores bajan aún más (gráficos N°16 y 17).

Tabla N° 16: Fechas en que Mercurio superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Limite Norma	feb-10	Total
PC-1-EM	Mercurio	mg/L Hg	0,001	0,001	0
PC-1-PL	Mercurio	mg/L Hg	0,001	0,001	0
PC-2-PL	Mercurio	mg/L Hg	0,001	0,001	0
PC-2-DR	Mercurio	mg/L Hg	0,001	0,001	0
T2-26	Mercurio	mg/L Hg	0,001		0
T3-26	Mercurio	mg/L Hg	0,001	0,001	0
T4-26	Mercurio	mg/L Hg	0,001	0,004	1
					1

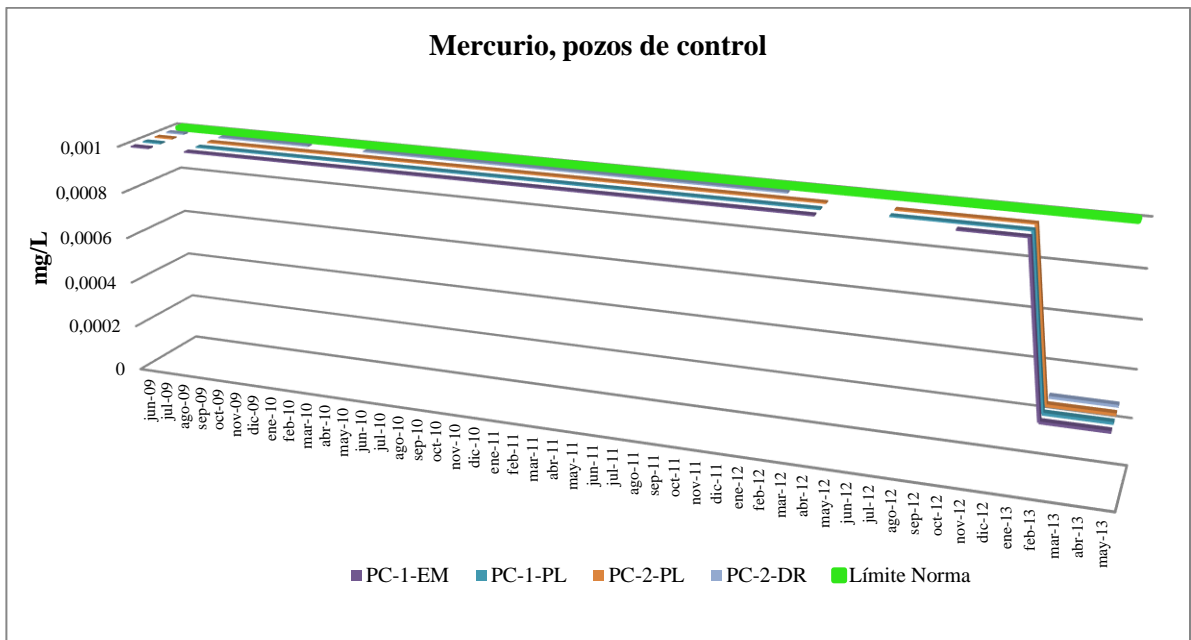


Gráfico N° 16: Comportamiento del Mercurio en los pozos de control, respecto del límite normativo (0,001 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

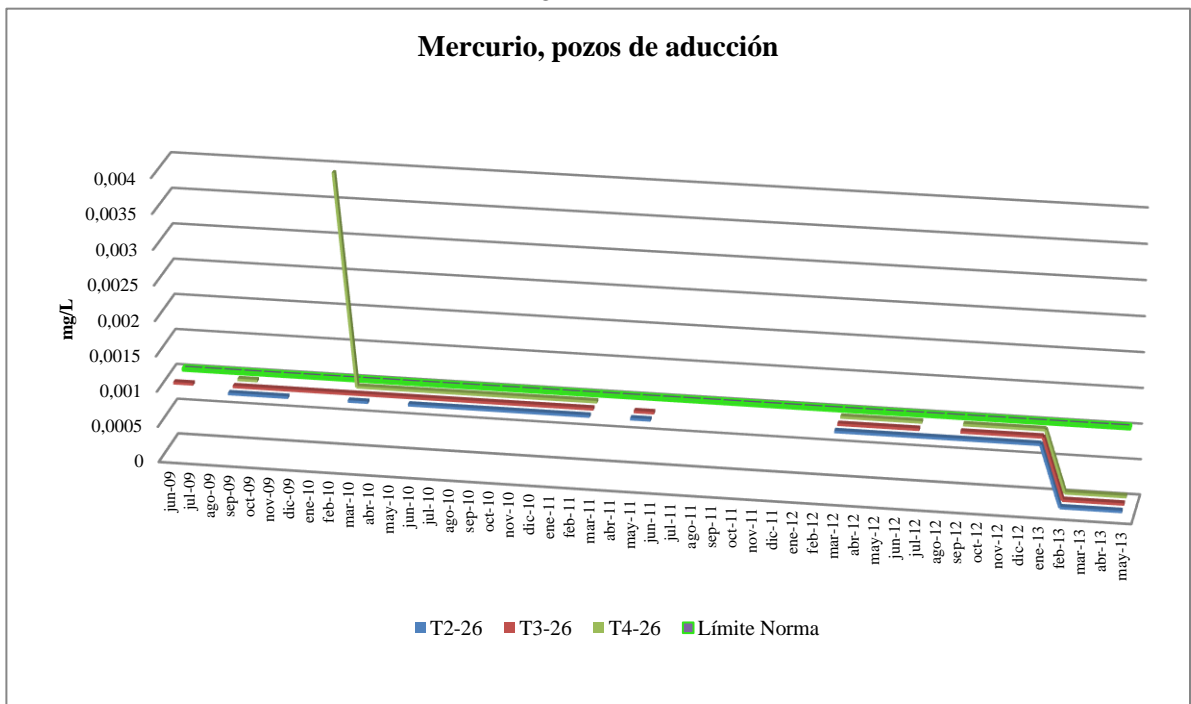


Gráfico N° 17: Comportamiento del Mercurio en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (0,001 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.9. pH

En general, el pH de aguas subterráneas de control y aducción, se observan como de tendencia neutra, levemente básica (gráficos N°18 y N°19). Los valores de pH son sobrepasados levemente en dos pozos de aducción (T2-26: 8,57; T3-26: 8,52) el mes de marzo de 2010 (Tabla N° 17).

El pH presenta una fluctuación entre meses de medición, con valores entre 6,5 a 8,57.

Tabla N° 17: Fechas en que pH superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Limite Norma	mar-10	Total
PC-1-EM	pH	unidad	6,5-8,5	7,53	0
PC-1-PL	pH	unidad	6,5-8,5	7,5	0
PC-2-PL	pH	unidad	6,5-8,5	7,48	0
PC-2-DR	pH	unidad	6,5-8,5		0
T2-26	pH	unidad	6,5-8,5	8,57	1
T3-26	pH	unidad	6,5-8,5	8,52	1
T4-26	pH	unidad	6,5-8,5	8,22	0
					2

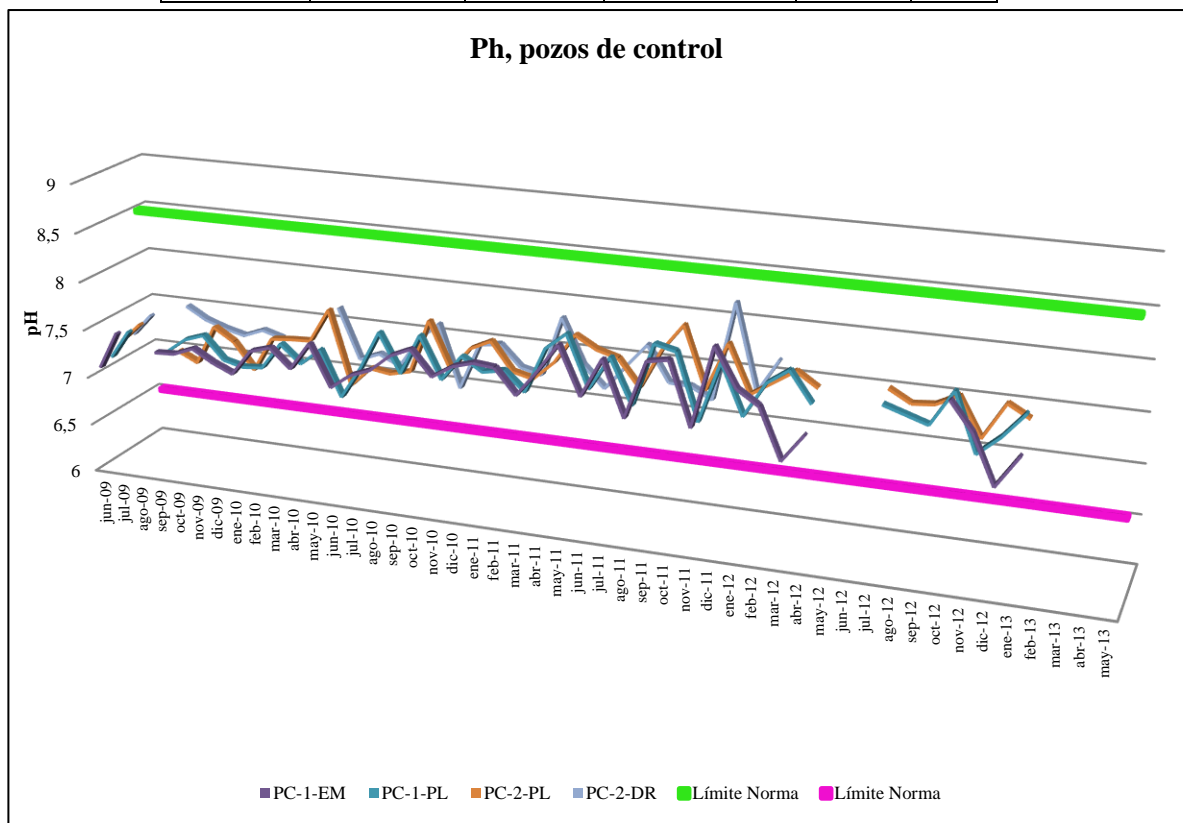


Gráfico N° 18: Comportamiento del pH en los pozos de control, respecto del límite normativo (6,5 – 8,5), NCh 409/1 of. 2005.

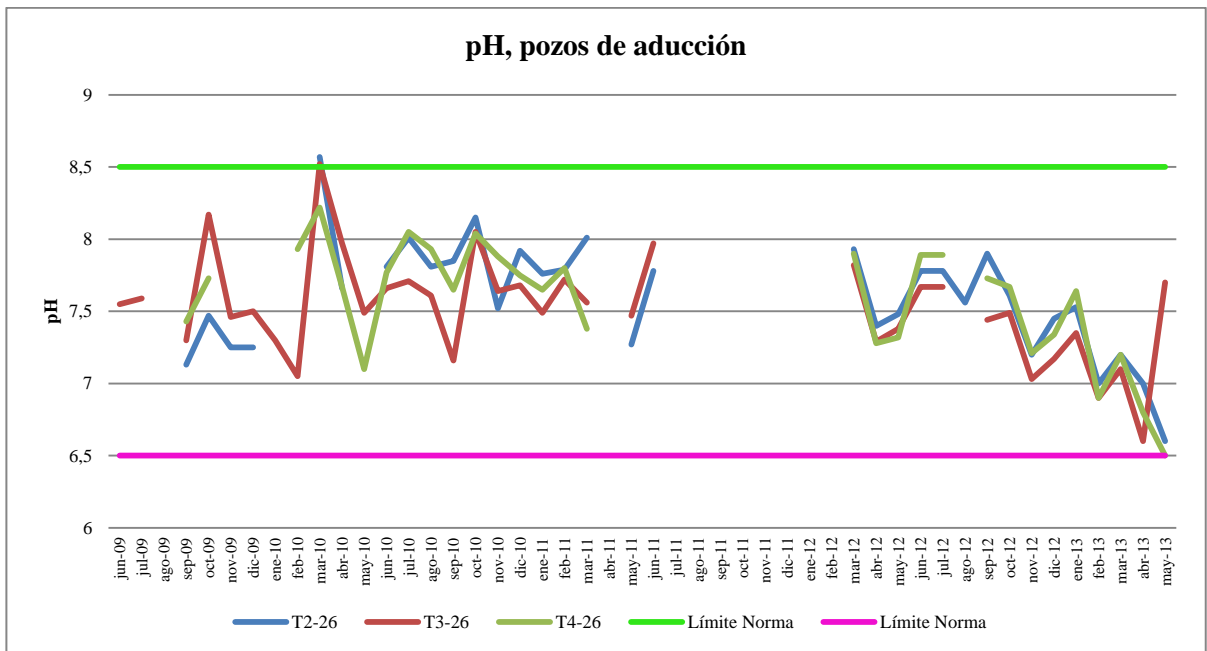


Gráfico N° 19: Comportamiento del pH en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (6,5 – 8,5), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.10. Sólidos disueltos totales (SDT)

Este parámetro fue sobrepasado en una sola ocasión en el pozo de control PC-1-EM, en octubre de 2012 (tabla N° 18), es decir, durante el período en que la planta ya operaba (gráficos N°20 y N° 21). El límite normado es 1.500 mg/L.

Tabla N° 18: Fecha en que los Sólidos disueltos totales (SDT) superaron la NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Límite Norma	oct-12	Total
PC-1-EM	SDT	mg/L	1.500	1.612	1
PC-1-PL	SDT	mg/L	1.500	922	0
PC-2-PL	SDT	mg/L	1.500	592	0
PC-2-DR	SDT	mg/L	1.500		
T2-26	SDT	mg/L	1.500	606	0
T3-26	SDT	mg/L	1.500	644	0
T4-26	SDT	mg/L	1.500	748	0
					1

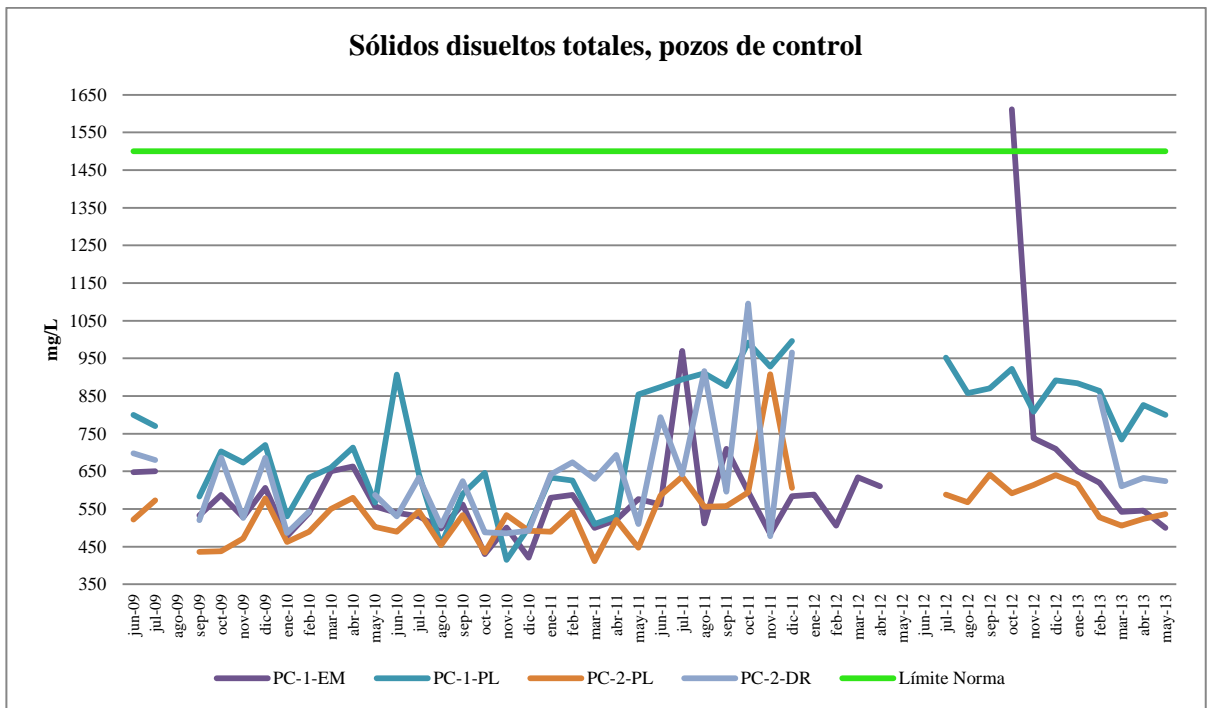


Gráfico N° 20: Comportamiento de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en los pozos de control, respecto del límite normativo (1.500 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

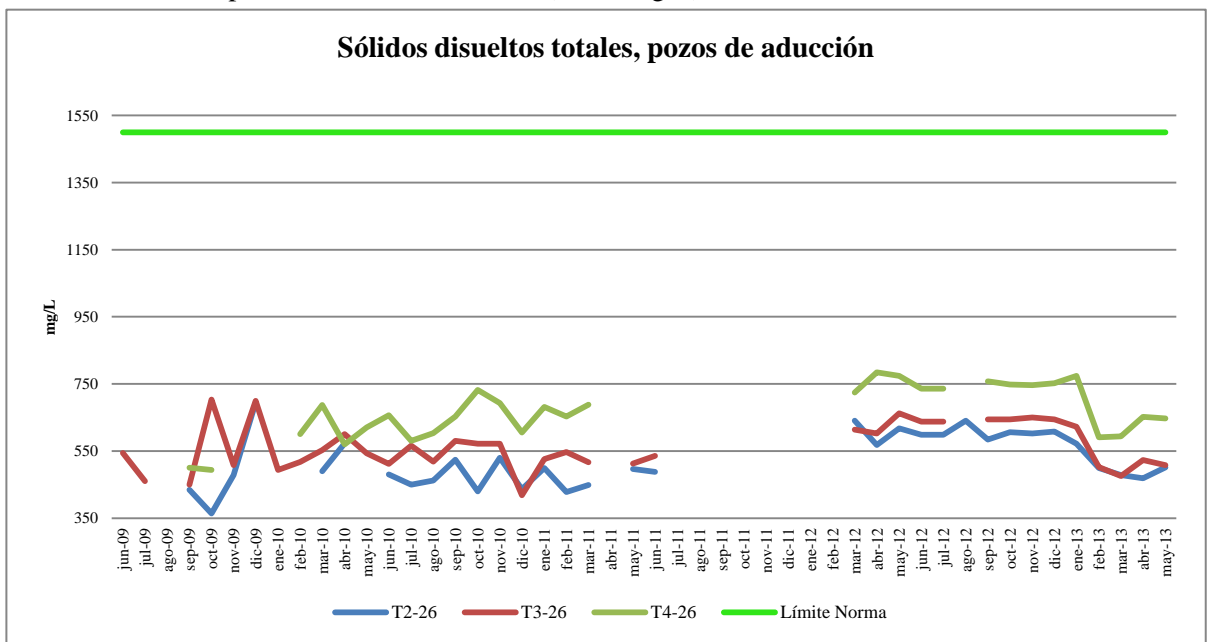


Gráfico N° 21: Comportamiento de Sólidos Disueltos Totales (SDT) en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (1.500 mg/L), NCh 409/1 of. 2005.

4.3.11. Turbiedad

Para este parámetro, la norma indica debe ser menor o igual a 2 UNT. Al observar la serie temporal de datos, en los tres pozos de aducción se superó 23 veces la norma (gráfico N° 22). Este parámetro no se midió en los pozos de control ya que no se incluye en la norma de agua de riego (NCh 1333).

Según lo que se observa en la tabla N° 19, durante la denominada Línea Base de aguas (junio de 2009 a junio de 2010) se encontraron 13 ocasiones en que se superó la norma. Mientras que durante el período de operaciones, se superó la norma en 10 ocasiones.

Tabla N° 19 : Fechas en que Turbiedad superó NCh 409/1. Of2005.

Pozo	Parámetro	Unidades	Limite Norma	jun-09	jul-09	sep-09	oct-09	dic-09	May-10	jun-10	jul-10	Total
T2-26	Turbiedad	UNT	<=2		2,4	4,44	1,75	0,81		3,39	0,5	3
T3-26	Turbiedad	UNT	<=2	4,6	2,1	5,77	0,79	3,09	17,7	9,76	3,25	7
T4-26	Turbiedad	UNT	<=2			4,98	26		2,4	11,9	1,78	4
				sep-10	oct-10	nov-10	ene-11	feb-11	jun-11	feb-13	mar-13	
T2-26	Turbiedad	UNT	<=2	1,44	0,5	1,94	0,5	0,5	0,69	0,3	0,35	0
T3-26	Turbiedad	UNT	<=2	0,5	0,51	1,11	9,53	0,5	2,44	4,9	2,4	4
T4-26	Turbiedad	UNT	<=2	6,75	2,16	2,77	2,44	2,47		0,7	1,4	5
												23

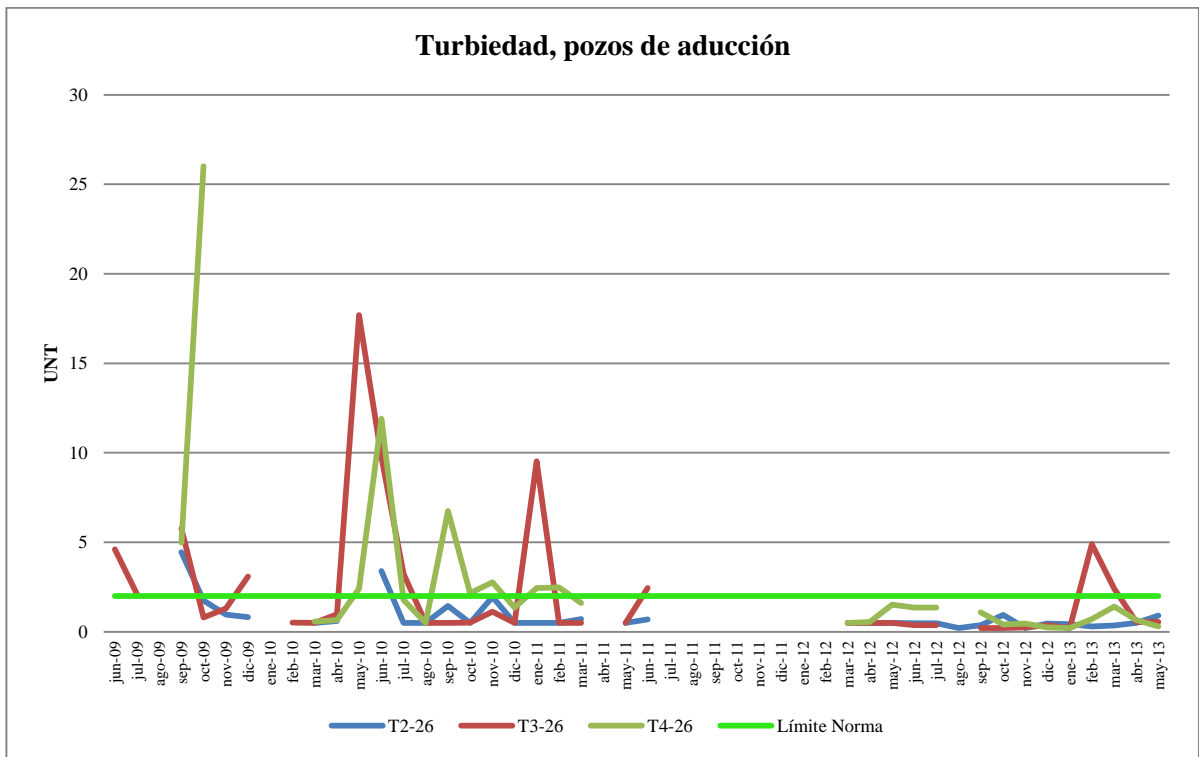


Gráfico N° 22: Comportamiento de la Turbiedad en los pozos de aducción, respecto del límite normativo (≤ 2 UNT), NCh 409/1 of. 2005.

4.4. Criterio 2: total de ocasiones sobre norma por tipo de pozo

Según lo que se observa en la Tabla N° 20, los dos parámetros con mayor número de ocasiones sobre la norma fueron Hierro y Manganeseo, con 88 y 39 veces, respectivamente.

En el caso de Mn, 35 ocasiones fueron detectadas en los Pozos de Control. Referente a Fe, si bien las ocasiones se desarrollan de manera regular durante gran parte del período en estudio para ambos tipos de pozos, los de control presentan una mayor cantidad de ocasiones sobre la norma. Lo anterior, sucede debido a que para este tipo de pozos se monitorea uno más y tienen un mayor porcentaje de monitoreos realizados.

Tabla N° 20: Resumen de ocasiones totales en que cada parámetro superó la NCh 409/1. Of2005, para los pozos de Control y Aducción de la Planta Delta.

Parámetro	Pozos Control	Pozos Aducción	Total
Hierro	50	38	88
Manganeso	35	4	39
Arsénico	15	0	15
Plomo	8	0	8
Cadmio	2	0	2
Selenio	1	0	1
Cianuro	1	0	1
Mercurio	0	1	1
pH	0	2	2
SDT	1	0	1
Turbiedad	0	23	23
Total	113	68	181

Cabe hacer notar que los parámetros Mercurio, Selenio, Cianuro y Sólidos Disueltos Totales sobrepasaron la norma en solo una ocasión durante el período de estudio.

4.5. Criterio 3: total de ocasiones sobre norma por pozo

Referente a los dos pozos que más obtuvieron mayor cantidad de ocasiones sobre norma, se encontró al pozo PC-2-DR con 47 eventos, seguido por el pozo PC-1-EM con 42 eventos. El pozo de aducción T4-26 aparece más abajo con 33 eventos. Mientras que el pozo con menor cantidad de ocasiones, fue el PC-1-PL, con 10 eventos (Gráfico N° 23).

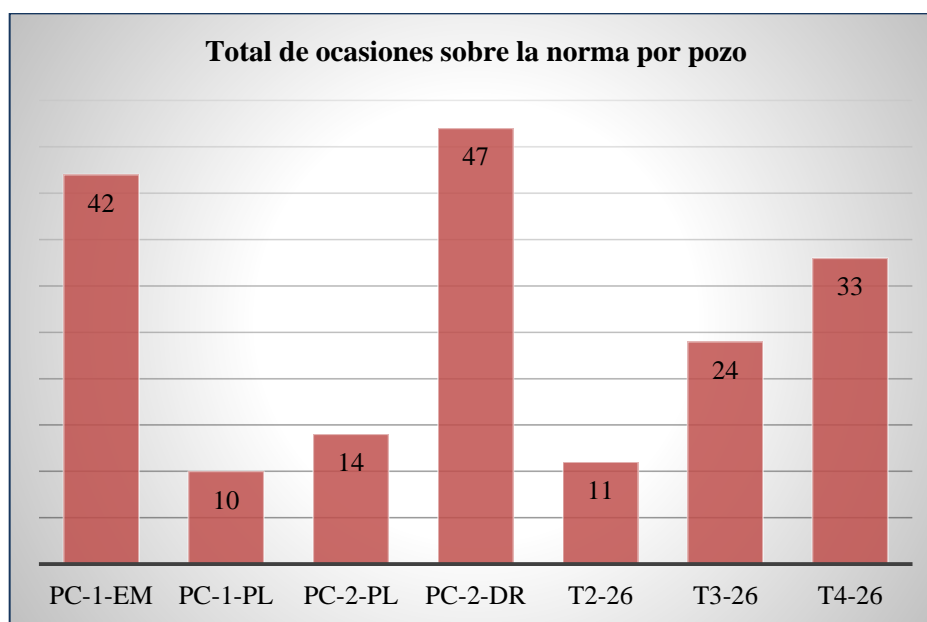


Gráfico N° 23: Total de ocasiones sobre norma por pozo.

4.6. Criterio 4: total de ocasiones sobre norma por mes

Al revisar el total de alzas sobre norma por mes (gráfico N° 24), se puede inferir que la mayoría de estas alzas se produjeron entre junio de 2009 a junio de 2010, con 98 ocasiones. Posteriormente, desde julio de 2010 a mayo de 2013, disminuyen los episodios de alzas sobre norma con 83 eventos. Por otra parte, no se puede observar estacionalidad de ocasiones en su distribución total, durante el período en estudio.

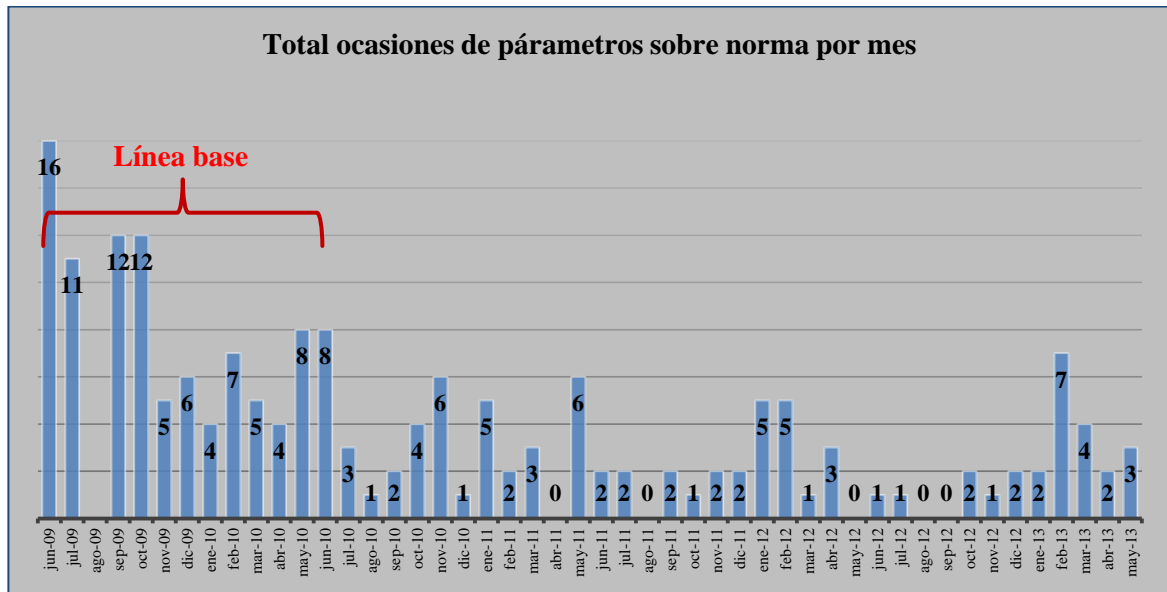


Gráfico N° 24: Serie temporal mensual de número de ocasiones sobre norma por total de parámetros. El mes de agosto de 2009 no se realizó tomas de muestras de ningún pozo.

Lo anterior implica que el 54,1% del total de ocasiones sobre la norma ocurrieron durante el denominado período de línea base en un período de 13 meses, mientras que el restante 45,9% ocurrió en el período de operaciones de la Planta, en un período de 35 meses.

4.7. Criterio 5: comparación de ocasiones sobre norma por pozo según datos de línea base y operación

Al disgregar por período de monitoreo, se observa que durante la denominada línea base los dos pozos con mayores ocasiones sobre norma fueron el PC-2-DR y PC-1-EM, con 26 y 22 ocasiones respectivamente (gráfico N° 25).

Durante el período de operaciones, los dos pozos con mayores ocasiones sobre norma fueron el PC-2-DR y PC-1-EM con 21 y 20 eventos cada uno.

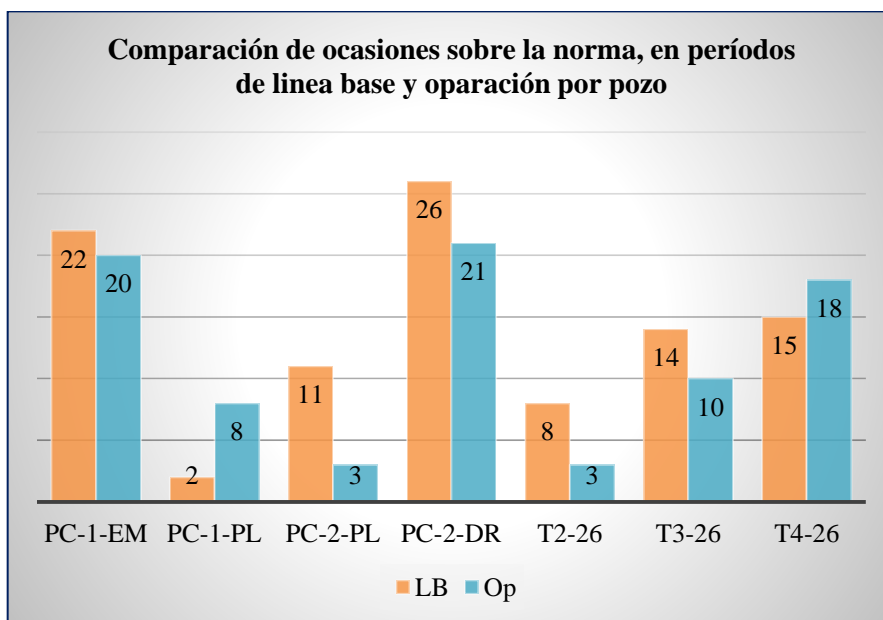


Gráfico N° 25: Número de ocasiones sobre norma por pozo según período de línea base (LB) y operaciones (Op).

Al revisar el número de ocasiones sobre la norma entre los períodos de la denominada línea base de monitoreos y la de operación (gráfico N° 26), para Mn, Cd, Hg, Pb, pH, y Turbiedad se encontró que hubo un mayor número de eventos en el período de línea base, es decir, 6 de 11 parámetros. Para Se, Cn, As, Fe y SDT se encontró mayor número de ocasiones sobre norma en el período de operaciones, es decir, 5 de 11 parámetros. En el caso de Fe, según lo observado este parámetro presenta una distribución de ocasiones sobre norma con cierta regularidad para ambos tipos de pozos.

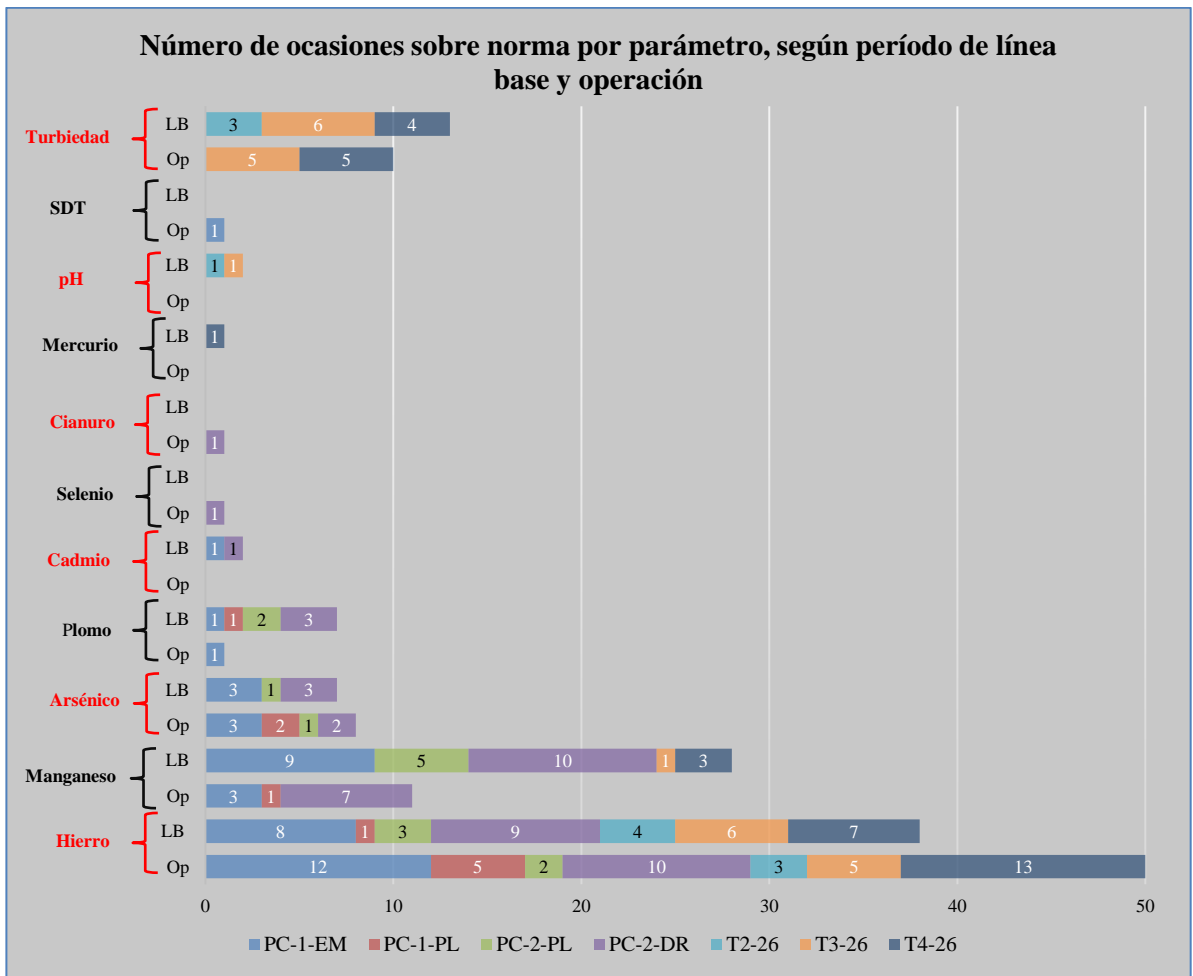


Gráfico N° 26: Número de ocasiones sobre norma por pozo y parámetro, según período de línea base (LB) y operaciones (Op).

5. DISCUSIÓN

El presente trabajo de tesis posee como objetivo general evaluar el efecto de la actividad minera de la Planta Delta sobre los parámetros de calidad de aguas de los pozos de aducción y control. Para lograr dicha evaluación se definieron distintos objetivos específicos como la revisión bibliográfica de antecedentes ambientales y productivos, el análisis general del comportamiento de parámetros según la NCh 409/1. Of2005 y la aplicación de criterios de identificación y evaluación de efectos sobre la calidad del agua subterránea.

Para la presente discusión de resultados, se analizan, relacionan y evalúan los antecedentes bibliográficos con los criterios recién nombrados.

De la revisión de antecedentes ambientales y productivos relacionados a la temática en estudio, se verificaron dos aspectos de importancia. El primero se refiere a la vulnerabilidad del acuífero que se encuentra en la Quebrada Rincón del Sauce, el que es potencialmente vulnerable debido a su permeabilidad, porosidad y ser de tipo no confinado, según lo que indica el estudio hidrogeológico presentado por la empresa en el proceso de EIA (Water Management Consultants, 2007), es decir, que las capas litológicas son influenciadas por lo que ocurre en la superficie, esto implica que el agua que cae al suelo en forma de precipitación, se infiltrará hacia capas más profundas acarreado con ello lo que esté disponible en la superficie. Este aspecto es ampliamente descrito en el acápite de resultados.

El segundo resultado de importancia se refiere a los antecedentes históricos de actividades productivas en la zona donde se emplaza la Planta Delta. Según esta revisión, se constató que desde inicios del siglo XIX ha existido actividad minera cuprífera. Esta situación indicaría que la denominada línea base de aguas utilizada en el presente estudio podría presentar una calidad alterada, debido a que los acopios masivos históricos de escorias y posible drenaje de mina de minas abandonadas podrían haber afectado la calidad natural de aguas. En definitiva, la comparación desarrollada en el presente estudio, se realizó a una situación de aguas, posiblemente, alteradas por actividades mineras históricas sin control de impactos medio ambientales (período de

Línea Base) y una situación con control de impactos medio ambientales (período de operación).

Al analizar el comportamiento de los parámetros de calidad de aguas de todos los 47 parámetros estudiados, de acuerdo a la NCh 409/1. Of2005, se encontró que 11 presentaron al menos una ocasión sobre norma. Lo anterior implica que el 77% de los parámetros estudiados se encuentran dentro de los niveles normados.

5.1. Criterio 1: Selección de parámetros fuera de norma

Hierro fue el parámetro con el mayor número de ocasiones, con 88 eventos sobre la norma. Esta situación se pudo observar tanto en pozos de control como en los pozos de aducción, con 50 y 38 ocasiones respectivamente, durante el período total en estudio. Dada la cantidad de ocasiones sobre la norma y el comportamiento, se infiere que el hierro es un metal que es aportado naturalmente por el suelo a las aguas subterráneas. Esto se corrobora por Arumí y Oyarzún (2006), en que determinan que Fe es un parámetro que habitualmente excede la norma de agua potable proveniente de aguas subterráneas de la Región de Coquimbo, siendo su mayor riesgo las incrustaciones que provoca en los sistemas de riego. A su vez, Sancha (2005) determinó en un estudio relacionado a efluentes de riego con aguas provenientes de napas, entre otras fuentes, que entre las regiones de Coquimbo a la de Los Lagos la alta concentración de hierro se debe a un origen natural.

Manganeso es el segundo parámetro con la mayor cantidad de ocasiones en que se sobrepasó la norma, con 39 veces. Las variaciones de este elemento en los pozos analizados, ocurren al inicio de los muestreos y en los meses finales, principalmente en el pozo de control PC-2-DR. Este pozo está ubicado al final del relave de espesados, por lo que en primera instancia se tendería a hacer interrelacionar el efecto del relave sobre este parámetro. El potencial efecto del desarrollo de la actividad del proyecto pudo exponer los compuestos de Mn liberando su fase gaseosa y generando partículas, las que podrían haber precipitado hacia aguas subterráneas. Sin embargo, no se puede aseverar ya que no se tiene información acerca de la composición mineralógica del suelo de elementos no aprovechables, que conforman gran parte del relave de espesados.

Además, se pudo constatar que el pozo PC-1-EM, obtuvo la segunda cantidad de ocasiones sobre norma (12). Este pozo se ubica bajo la mina y botadero de estériles. Como en el caso anterior, el efecto del estéril o de mina no puede ser afirmado, pero se transforma en una alerta respecto de los posteriores estudios que se deban realizar a esas instalaciones, en que la caracterización química del suelo es fundamental para determinar si este aporte es de índole natural o antrópica.

No obstante lo anterior, según Altamirano (2013) Mn puede estar presente en el agua subterránea de manera natural, con valores entre 10 a 150mg/L. Particularmente, en el Norte Chico chileno, existen altas concentraciones de Mn de origen natural y antrópico (Sancha, 2005; Arumí y Oyarzún, 2006). Si bien pudiera existir una contaminación natural de este parámetro, no se puede aseverar debido al desconocimiento del aporte del suelo, además, a pesar de la discontinuidad de los datos, en general este parámetro se comporta con niveles bajo la norma, en especial en los pozos de aducción. Por lo tanto, se puede concluir que de existir contaminación de este parámetro por actividades mineras anteriores al proyecto Delta, este produce un control sobre el Mn bajando la cantidad de ocasiones sobre la norma durante el período de operaciones.

El principal problema que genera el Mn es su oxidación, causa mal sabor y mancha instalaciones sanitarias. Las aguas industriales con contenidos superiores a 0,2 mg/L, son rechazadas debido a su precipitación (Altamirano, 2013).

El **Arsénico** es un metaloide ampliamente distribuido en la corteza terrestre, generalmente se encuentra combinado con otros elementos como oxígeno, cloro y azufre, como forma inorgánica, o con carbono e hidrógeno, como forma orgánica (ATSDR, 2005). Se puede incorporar al suelo, el polvo, el agua, las partículas en el aire y los alimentos (University of Arizona, 2017).

La presencia de As puede aumentar debido a actividades humanas como la minería del cobre, la plata y el oro (University of Arizona, 2017). En los procesos de extracción o fundición, el As puede entrar al agua a través de escorrentía superficial o a través del suelo (ATSDR, 2005). Una vez libre en el medio ambiente, el As puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por arcillas o materia orgánica. Sus formas solubles son altamente tóxicas (Higueras *et al*, 2007).

Al comparar el comportamiento de pozos de aducción y de control, se puede visualizar que es en los pozos de control donde se producen los niveles altos de este elemento, principalmente, entre los meses de enero y febrero de 2012. Mientras que, en los pozos de aducción el comportamiento del As es inferior a la norma durante el período analizado. Debido a la discontinuidad de datos, no es posible comparar el peak antes nombrado con los pozos de aducción.

En general, los peaks son puntuales y no marcan alguna tendencia de alza. Durante el período de línea base, se observan alzas temporales, que continúan, durante los primeros meses de operación de la Planta. Posteriormente, se observa estabilidad en los pozos de control hasta enero de 2012. En este caso, también se podrían dilucidar respuestas si se tuvieran datos referentes a la composición de los suelos, de esta manera conocer si estas alzas puntuales podrían explicarse por contaminación natural.

Por otra parte, dado que el arsénico es una acompañante seguro del proceso de obtención de cobre, se hace necesario realizar análisis mineralógico y dinámico de relave, que permitan dilucidar de manera precisa si en la interacción del relave con el agua, oxígeno y bacterias naturales, se desarrolla un medio tal que permita la liberación de As al suelo y, posteriormente, al agua.

Finalmente, se debe determinar en qué forma se encuentra presente el As en el agua, ya que de ser disponible orgánicamente a seres vivos es potencialmente nocivo para la salud de las personas. Lo anterior, podría implicar la necesidad de realizar cambios en la purificación de aguas para consumo humano de la Planta Delta.

Para el caso del **Plomo**, se pudo observar que la mayoría de las ocasiones fuera de norma fueron durante el período de línea base (junio a octubre de 2009) en los pozos de control. El plomo es un metal pesado, de color gris-azulado común en la corteza terrestre. Generalmente se encuentra combinado con otros dos o más elementos formando compuestos de plomo. Niveles altos de Pb están directamente relacionados a actividades humanas, principalmente en la minería del plomo, plaguicidas, pinturas, armamento, baterías de autos, entre otros. Una vez que el Pb se libera al ambiente, puede disolverse en agua. Al agua subterránea puede llegar a través de percolación en ambientes ácidos (ATSDR, 2007).

Según la composición mineralógica del material de la Mina Panulcillo, se encuentra presente la Galena (sulfuro de plomo, PbS). Esta es la forma más común en que se puede encontrar naturalmente (Higueras *et al*, 2007). Dado que las alzas ocurrieron principalmente en el período de Línea Base y que parte de la composición mineralógica de la parte alta de la cuenca del Rincón del Sauce contiene galena, se podría inferir un proceso de contaminación natural desde las minas en abandono y antiguos botaderos de estériles ubicados en dicha cuenca, los que posteriormente fueron desapareciendo paulatinamente en el tiempo una vez que se fueron instalando los sistemas de control de impacto ambiental.

Para **Cadmio**, los valores sobre norma ocurren durante junio de 2009 en dos pozos de control, período en el cual no operaba el relave de espesados, que se considera como línea base de la calidad de aguas. El Cd es considerado uno de los metales pesados que son un subproducto contaminante de la minería, a través de relaves o drenaje de minas (SAG, 2005; Maksaev, 2001). No obstante lo anterior, en un estudio realizado en la zona norte del valle del Aconcagua, el Cd se encontró bajo los niveles de detección (Maksaev, 2001). Estos datos podrían explicar el comportamiento de este metal, en que para el resto de las mediciones se encuentra muy debajo del límite de 0,001 mg/L, inclusive, a partir de febrero de 2013 al cambiar al proveedor de servicios de análisis de aguas y, por ende, su metodología de análisis, los valores de detección cambian.

El **Selenio**, está ampliamente distribuido en la corteza terrestre (ATSDR, 2003). A través de la erosión natural de las rocas, este se puede encontrar presente en las aguas superficiales o subterráneas (Foster *et al*, 2002). Puede estar combinado con sulfuro, pirita, plata, cobre o níquel (ATSDR, 2003). En general, las aguas superficiales presentan menores niveles de concentración de Se que las aguas subterráneas (Gomes *et al*, 2008).

Por acción antrópica, la liberación de Se al medio ambiente está ligada a la agricultura y la minería del cobre, como subproducto de la refinación Electrowin y a la extracción de pirita (Gomes *et al*, 2008). Cabe recordar que el Se, ante un aumento de concentraciones en el agua, en personas, los efectos tóxicos de la exposición prolongada se pueden manifestar en las uñas, el cabello y el hígado.

Los resultados obtenidos, indican que es en el pozo de control PC-2-DR donde ocurre la única alza de concentración de Se, en la parte final de los monitoreos. Al igual que en el caso del Mn, al desconocer la composición mineralógica y la interacción de los minerales con el agua en especial del material de mina y de la ganga no metálica, no se puede asegurar fidedignamente que esta alza provenga de la actividad de la Planta Delta. No obstante lo anterior, según la literatura expuesta en el párrafo anterior, existe evidencia que liga a la minería del cobre con el aumento de Se en el agua. Debido a que dentro de las especies mineralógicas de interés se encuentra la piritita en un bajo porcentaje, podría existir una influencia en esta alza.

Para el **Cianuro**, en general su comportamiento es bajo la norma (0,05 mg/L), siendo solo un valor sobre el límite (0,05 mg/L). Debido a que este parámetro se relaciona al uso de pesticidas en la agricultura y la manufactura de acero (ATSDR, 2006), este único valor sobre la norma podría deberse a una contaminación externa en la toma de muestras.

En el caso del **Mercurio**, sólo se observa un valor sobre la norma en febrero de 2010 (T4-26), el que se podría relacionar a un error en toma de muestras. Posteriormente los valores son muy bajos, situación que no ha de extrañar pues este elemento es relacionado, principalmente, a la extracción y procesos metalúrgicos de oro. En Delta, se elabora cobre concentrado y en cátodos en los años analizados en el presente estudio.

El **pH** se ve fuertemente influenciado por las características hidrogeológicas de la cuenca, es decir, el tipo de suelo que debe atravesar el agua y las características que la roca entrega al acuífero. Por ejemplo, un suelo de naturaleza caliza, con presencia de CaCO_3 , genera aguas con pH de rango 7 a 7,5 (Moreno *et al*, 2001). En este sentido, dada la velocidad de avance del flujo de la cuenca Rincón del Sauce, debido a su composición hidrogeológica, que presenta características de acuífero no consolidado, pueden conllevar a una relación directa de contaminación de las aguas subterráneas debido a la porosidad del suelo y por otra parte, la velocidad de avance de la columna de agua.

Si bien la velocidad de permeabilidad teórica es de $1,2E-03$ m/s, se debe conocer la capacidad de saturación del suelo y su caracterización. Estas variables, podrían ayudar a explicar la variación natural de pH en el agua subterránea.

No obstante lo anterior, se conoce que parte importante del material de cabecera aprovechable que proviene de la mina Panulcillo es calcopirita y calcosina, se desconoce la composición de la ganga no metálica (99,11% del total). Este dato pudiere no ser representativo de la cuenca, pero ayudaría a comprender efectos puntuales en los pozos de control de la mina y del relave.

Por otra parte, la actividad minera generalmente se asocia a una baja de pH en el agua, lo que podría implicar drenaje ácido de mina o de relave. En el caso analizado, en el período de línea base las aguas se comportan de manera neutra a básica por la fuerte presencia de cationes, como se puede observar en el diagrama de Stiff de ese período de la figura N° 4. Lo anterior explicaría el comportamiento del pH, el que varía entre 7 a 8,57 desde junio de 2009 a enero de 2013.

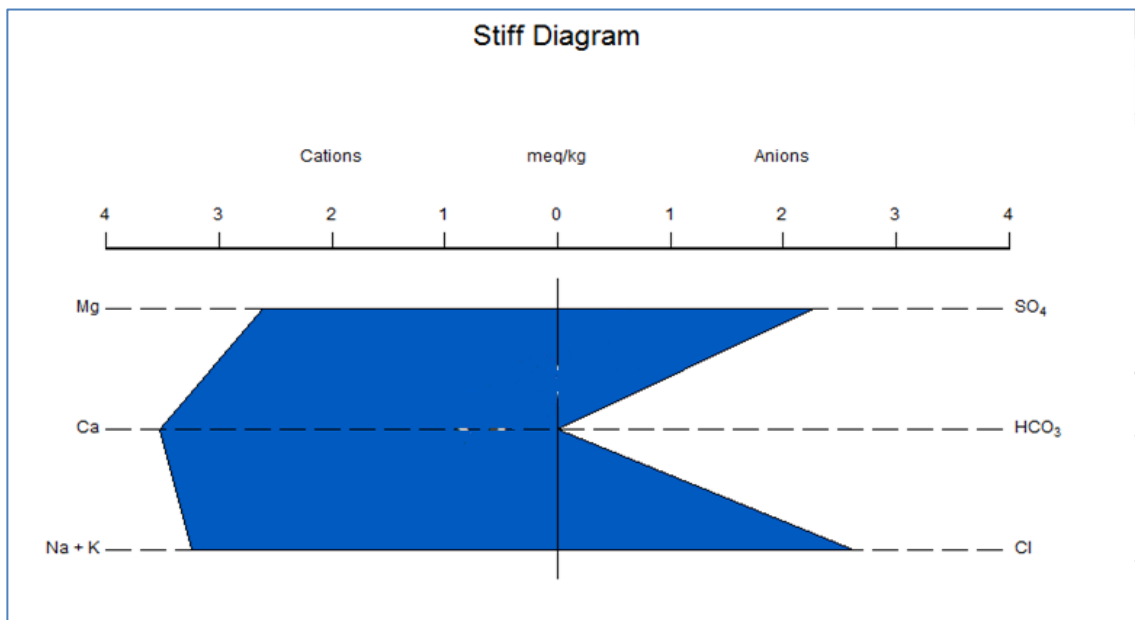


Figura N° 4: Caracterización iónica (diagrama de Stiff) de aguas subterráneas cuenca Rincón del Sauce de línea base de monitoreos.

El pH en los últimos 4 meses de monitoreo desciende en los pozos de aducción sin sobrepasar el límite mínimo, podría haber sido afectado por DAM o DAR para

determinar si existe efecto de acidificación se deben aplicar pruebas dinámicas de relave o mina con distintas muestras en un tiempo prolongado.

Los **Sólidos disueltos Totales** se definen como la suma de todos los minerales, metales, y sales disueltos en el agua, siendo un buen indicador de la calidad del agua. Altos valores de este parámetro proporciona al agua una apariencia turbia y disminuye el sabor de ésta (Sigler y Bauder, 2012). En aguas subterráneas su valor depende de la composición mineralógica de las capas del suelo (Rocha, 2009). En cuanto a las consecuencias que pueden ocurrir de altos valores de SDT en el agua se refieren a los usos industriales, ya que está unido a la dureza del agua la que puede provocar que tuberías se tapen por la acumulación de sales en las paredes internas de las tuberías.

Al visualizar y analizar la variabilidad de los valores de los SDT en los pozos de control y de aducción, existe una gran variabilidad en sus valores, los que se encuentran entre los 350 a 1.100 mg/L. Si bien en el pozo de control PC-1-E, en octubre de 2012, se produce esta única lectura sobre la norma, posterior a ella este valor baja considerablemente hasta mayo de 2013. La utilización de calcio en el proceso de obtención de cobre para alcalinizar pH, podría provocar alteraciones en este parámetro, pero este pozo se ubica geográficamente anterior a la línea de flotación, razón por la cual no se pueden relacionar efectos.

Al no conocer los valores de niveles freáticos, no se pueden realizar mayores interacciones con la baja del volumen de agua y el aumento de concentración de sales.

La **turbidez** es un parámetro que se entiende como la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. En este sentido a mayor turbidez, menor calidad de agua (Jiménez y Colmenares, 2009).

Este parámetro es considerado un buen indicador de calidad de aguas, como indicativo de contaminación (LGM, 2010). En este sentido, las aguas subterráneas debido a factores de filtración, no presencia de oxígeno y estabilidad de temperatura es común que la turbidez sea baja o nula, excepto en suelos cársticos (Degremont, 1991). En este último caso, debido a su condición de rápida circulación y percolación de agua, puede existir un aumento de bacterias, subiendo los niveles de turbidez. Además, esta condición también puede asociarse a fuertes bombeos (Carrasco, 1988). Dados los

antecedentes anteriores, este parámetro podría ser de baja utilidad para analizar la contaminación del acuífero, debido al tipo de actividad productiva y el tipo de uso en el cual se enmarca el estudio.

Finalmente, si bien el estudio hidrogeológico (Water Management Consultants, 2007) determina que la cuenca del Rincón del Sauce y del Talhuén, son vulnerables debido a su permeabilidad, porosidad y ser de tipo no confinado, se esperaba poder visualizar aumentos en algunos parámetros en los meses posteriores a las lluvias, las que históricamente se concentran entre mayo y agosto. En este sentido, según la velocidad máxima de avance de flujo, entregada en el estudio hidrogeológico, por cada kilómetro recorrido pasan 9,6 días. Lo anterior implica que, desde el pozo ubicado en el Estéril de mina al pozo T3, el flujo se demora 48 días en recorrer la distancia de 5 km, es decir, un mes y medio. Según lo precedente, se podría deducir que después de dos meses de ocurrido un peak en el pozo de control de estériles de mina, podría haberse encontrado alguna influencia sobre la calidad de aguas de los pozos de succión, situación que no se pudo observar.

La inferencia anterior, es a base de una ecuación lineal, que no toma en cuenta la capacidad de disolución del acuífero; el que está representado por el volumen, el caudal de avance y la cantidad natural de elementos químicos que este posea. Además, se debe tomar en cuenta que las muestras son puntuales, una vez al mes se colectan unos 5 litros de agua por pozo, lo que representa un mínimo porcentaje de la real cantidad de agua que pasa por el acuífero en ese momento (110 L/s según el estudio hidrogeológico).

Por otra parte, en general no se observaron variaciones estacionales, por lo que no se pueden aseverar causas relacionadas a pluviometría estacional, la que se concentra entre los meses de mayo a agosto, en el aumento de concentraciones medidas a través del período estudiado.

5.2. Criterio 2: Total de ocasiones sobre norma por tipo de pozo

Al analizar los resultados referentes al número de ocasiones sobre norma por pozo, se puede concluir que los pozos de control han sido los que más ocasiones sobre norma han presentado en el período bajo estudio (113). Si bien este resultado pudiere estar

influenciado por la cantidad de veces en que se monitorearon los distintos pozos, en que los pozos de control se monitorearon el 85% y que los pozos de aducción un 71% (Tabla N° 1), se puede inferir que la tendencia de comportamiento en los pozos de aducción para los parámetros como Mn, As, Pb, Cd, Se, Cn y Hg es en general, bajo el límite establecido por la norma de agua potable. En este sentido, este resultado permite observar una predominancia de contaminación química de importancia para la salud en el sector donde se emplazan los pozos de control.

Lo anterior, indicaría que existe un efecto de las actividades de Mina y Depósito de Relaves en los parámetros sobre norma. Esto se debería a una mayor probabilidad de contaminación de suelos por las actividades productivas que se realizan en él. Aun cuando hay un descenso del número de ocasiones sobre la norma en el período de operaciones en los pozos de control en relación al período de monitoreo (35 meses), se mantiene con un mayor número de ocasiones particularmente en los pozos PC-1-EM y PC-2-DR.

5.3. Criterio 3: Total de ocasiones sobre norma por pozo.

Para este criterio, es en los pozos de control donde ocurrieron la mayor cantidad de ocasiones sobre norma. En este sentido, el hecho de que los pozos de control PC-1-EM (42) y PC-2-DR (47), de estéril de mina y de relave, respectivamente, podría indicar una relación directa entre la alteración de la calidad de agua y el número de ocasiones sobre norma de los parámetros con las actividades que se realizan en la cercanía de estos pozos.

Lo anterior, se produce a pesar que el porcentaje de monitoreos realizados al Pozo PC-2-DR es menor que el del pozo PC-1-EM, con un 72% y 82% respectivamente.

5.4. Criterio 4: Total de ocasiones sobre norma por mes

Al revisar los resultados provenientes del criterio 4, se encontró que la mayor cantidad de ocasiones sobre la norma ocurrieron durante el denominado período de línea base, con un 54,1%, en un período de 13 meses. Mientras que el restante 45,9% ocurrió en el período de operaciones de la Planta, en un período de 35 meses.

Lo anterior podría indicar que una vez la puesta en marcha de la operación de las actividades de mina, de línea de chancado, de flotación, lixiviación y del relave de espesados junto a la puesta en marcha de los sistemas de control de impactos medio ambientales permitieron llevar a la baja la cantidad de ocasiones sobre norma.

Si bien durante el período de construcción del Complejo Delta pudiera haberse afectado las mediciones de parámetros en aguas subterráneas, se debe tomar en consideración que cualquiera haya sido la contaminación provocada por estas actividades, el suelo hace de amortiguador de posibles fuentes contaminantes y, además, deben existir flujos de agua superficiales considerables que permitan la filtración de estos hasta llegar al acuífero. Lo anterior, implica que desde el período de inicio de obras y la detección de parámetros sobre la norma deberían pasar algunos meses. En este sentido, la mayor cantidad de parámetros sobre norma se detectaron durante los 5 primeros meses de la construcción del Complejo, lo que indicaría que las aguas subterráneas ya pudieran haber contenido la presencia de estos parámetros fuera de norma.

5.5. Criterio 5: Comparación de ocasiones sobre norma por pozo según datos de línea base y operación

Continuando el análisis y discusión, con el criterio 5 se corrobora el hecho de que la mayor cantidad de ocasiones sobre norma ocurrieron en el período de línea base. Destaca en este análisis, el pozo de control PC-2-DR (ubicado bajo el relave) como el pozo que obtuvo la mayor cantidad de eventos sobre norma (47), tanto en línea base como en operaciones, aun cuando este pozo presenta uno de los menores porcentajes de monitoreos durante la denominada Línea Base y Operación con un 77% y 67%, respectivamente.

Cabe recordar que el sector de Panulcillo desde principios del siglo 19 ha tenido actividad minera discontinua, hasta la aparición de la Planta Delta el año 2009. Entonces, las medidas de control de impacto ambiental, pueden haber ejercido una barrera de contención a los procesos de contaminación que ya existían en la zona.

Al considerar en el análisis la variable del período de monitoreo, se encontró que la mayor cantidad de ocasiones sobre norma se produjo durante la Línea Base. Los pozos

de control concentran la mayor cantidad de ocasiones durante la Línea Base observándose un descenso en la cantidad de ocasiones en el período de operaciones, siendo los pozos PC-2-DR y PC-1-EM donde se concentra la mayor atención respecto de la posible influencia de las actividades productivas sobre las ocasiones sobre norma.

Por otra parte, si se considera el análisis solo en los parámetros de tipo químico (Tipo II), se encuentra que 112 ocasiones sobre la norma ocurrieron en los pozos de control y 43 en los pozos de aducción. Durante el período de operación, la mayoría de los excesos sobre norma ocurrieron los pozos PC-2-DR y PC-1-EM, con 21 y 19 veces respectivamente. Sin embargo, tomando en cuenta que el porcentaje de monitoreos durante el período de operación del pozo PC-2-DR es de 67% y del pozo PC-1-EM es de un 92%, podría indicar la posibilidad de que el pozo PC-2-DR presente un mayor potencial de eventos sobre norma no medidos. Lo anterior, coloca al relave de espesados con un mayor potencial de contaminación de las aguas subterráneas en relación al estéril de minas.

Hierro y Manganeseo se muestran como los parámetros con mayor número de ocasiones sobre norma en las etapas de tiempo estudiadas. En este sentido, debido a la continuidad de ocasiones sobre la norma en los distintos pozos en los períodos de monitoreos, se puede concluir que el exceso de hierro en el agua proviene del aporte natural del suelo. En tanto que Manganeseo no se podría considerar como aporte natural debido a que hay una mayor cantidad de ocasiones sobre norma en los pozos de control (PC-1-EM y PC-2-DR), durante el período de 13 meses de Línea Base. Posteriormente, Mn presenta una disminución en la cantidad de ocasiones sobre la norma, a pesar de que aumenta a 35 los meses de monitoreo.

Los parámetros Fe y Mn son seguidos por Arsénico y Plomo en cuanto a la cantidad de ocasiones sobre la norma, con 15 y 8, respectivamente. A excepción de Hierro, en la mayoría de los parámetros se observa un descenso en la cantidad de ocasiones sobre norma a partir de la mitad de la construcción del Complejo Delta (línea base), descendiendo aún más una vez que comienza la operación de actividades y de controles de impactos medio ambientales. Dado la discusión anterior, la evaluación del efecto de las actividades mineras de la Planta Delta sobre los parámetros de agua se puede

considerar como positiva al bajar la cantidad de parámetros sobre la norma en el período estudiado.

Por otra parte, tomando en cuenta que por compromiso ambiental de la RCA 32/2008, la Planta Delta debe efectuar obligatoriamente muestreos con la Norma de riego 1333 y que voluntariamente monitorea los pozos de aducción con la Norma de agua potable 409/1.Of2005, es que se hace necesario preguntarse la utilidad de utilizar dichas Normas para verificar el estado de las aguas subterráneas. En primera instancia, al no existir una Norma específica para aguas subterráneas, se trata de asimilar mediante los tipos y metodologías de análisis al contexto del uso que tendrán estas aguas, siendo el objetivo el monitoreo de aguas subterráneas en el contexto de poder vigilar su calidad de manera histórica.

En el caso en estudio, el agua tiene fines productivos, de uso de potabilización, regado de caminos y en menor medida de riego de áreas verdes. Además, ENAMI no es la única usuaria del agua subterránea ya que a lo largo de la cuenca subterránea existen actividades agrícolas y de uso domiciliario los que podrían verse afectados por potenciales contaminantes según lo definido en las Normas de agua existentes en nuestro país.

En este sentido, dado que el uso del agua incluye el de consumo humano en la Planta Delta y potencialmente posterior a ella, es que se debiera ocupar la norma de mayor exigencia con el fin de proteger la salud de las personas. A su vez, los parámetros a realizarles seguimiento debieran ser los que puedan estar relacionados a la actividad minera en cuestión y sus pasivos ambientales, es decir, aquellos que se han mostrado en el presente estudio, a los que se podrían sumar otros parámetros de años posteriores a mayo de 2013.

Finalmente, a manera general respecto de la generación de normas de aguas subterráneas, debido al potencial uso de agua para consumo humano, es que se debieran aplicar los métodos y límites permisibles de la norma 409/1. Of 2005. La cantidad de parámetros a medir debiera incluir en sus criterios de selección el uso potencial y la calidad base de las aguas, de tal manera de realizar seguimiento con el objetivo de detectar oportunamente la contaminación de las mismas.

6. RECOMENDACIONES

El análisis del presente estudio, se basa en los compromisos ambientales generados a partir de la Resolución de Calificación Ambiental N° 32 del año 2008 y las decisiones voluntarias del proyecto Delta. Se pudo observar que los compromisos estipulados en la RCA, fueron acordes a los conocimientos que se tenían a la fecha de evaluación. En este sentido, con el objetivo de minimizar impactos sobre los acuíferos, es que la actualización constante de conocimientos relativos a los aspectos ambientales se hace relevante como herramienta de gestión ambiental, contexto en que se enmarca el presente estudio.

Según la discusión generada a partir de los resultados, se entregan recomendaciones de los análisis y estudios que debiesen incorporarse a la gestión ambiental de recursos hídricos. Estos se describen a continuación:

- Realizar análisis mineralógico y químico del perfil estratificado de suelo que permita dilucidar el aporte natural de características químicas al agua subterránea, en los puntos donde se realizan las actividades productivas, es decir, el área de influencia del proyecto Delta. Con la información disponible en estudio hidrogeológico del 2007, se conoce la litología de las cuencas en términos generales, en que la base estratigráfica de la cuenca del Rincón del Sauce está compuesta de rocas volcánicas andesíticas, con intercalaciones traquíticas y riolíticas. En esta descripción no se alude a la composición química primaria de las capas del suelo. Con esta información se podría inferir cómo contribuye naturalmente el suelo a las variaciones de pH obtenidas en el presente estudio, como otros parámetros que superaron la norma.
- Análisis mineralógico de relave.
- Determinar si en el relave se produce DAR a través de pruebas geoquímicas dinámicas, las que se utilizan para predecir el potencial neto de neutralización y la tasa de generación de ácido de residuos mineros, además de la calidad de los lixiviados generados en función del tiempo (Peña y Menéndez, 2016).
- Determinar la posible interacción del drenaje de mina en el perfil de suelo afectado en su extensión.

- Realizar medición de niveles freáticos y precipitación durante la toma de muestras. Estas dos variables se podrán relacionar con los parámetros sobre norma obtenidos, de esta manera se podrán obtener indicadores de estacionalidad y que tan vulnerable es la cuenca debido a su permeabilidad. Por ejemplo, ante eventos de lluvias se podría determinar cómo éste afecta el nivel freático, de este modo ante un alza o baja del caudal del acuífero se podría relacionar a variaciones de parámetros de calidad de aguas.
- Determinar el nivel de permeabilidad y saturación de los suelos afectados directamente por la actividad de la Planta. La permeabilidad permitiría conocer la velocidad en que un flujo de agua contaminada atraviese la capa del suelo hasta llegar al acuífero. Por otra parte, conocer la capacidad de amortiguación permitirá determinar cuánto tiempo se demorará el suelo hasta desprenderse de los contaminantes hasta entregarlos al acuífero. Finalmente, esta información podría generar la planificación de acciones tendientes a evitar la saturación del suelo con contaminantes.
- Realizar monitoreos de los pozos de control según la norma de agua potable, NCh 409/1. Of2005. Evitar discontinuidad de monitoreos. Disminuir la cantidad de parámetros a los que históricamente han rebasado los límites permisibles y realizarles seguimiento. Aumentar la cantidad de monitoreos mensuales.
- En cuanto a la superación de norma por parte de Arsénico, se debe determinar en qué forma se encuentra presente. Si está de manera biodisponible, se deben realizar las adecuaciones necesarias en el tratamiento de purificación de las aguas destinadas a consumo humano, por los efectos nocivos a la salud.

7. CONCLUSIONES

- De la revisión bibliográfica de antecedentes ambientales se concluye que el acuífero el Rincón del Sauce, donde se encuentran la totalidad de instalaciones del proyecto Delta, es potencialmente vulnerable debido a su permeabilidad, porosidad y ser de tipo no confinado.
- Los antecedentes históricos del sector indican que desde inicios del siglo XIX ha existido actividad minera cuprífera, lo que indica la dificultad de conocer una Línea Base de aguas subterráneas que permita conocer la real calidad de aguas no intervenidas por actividades humanas. Por lo tanto, la comparación desarrollada en el presente estudio, se realizó a una situación de aguas, posiblemente, alteradas por actividades mineras sin control de impactos medioambientales y una situación con control de impactos medioambientales.
- De los 47 parámetros estudiados según la NCh 409/1. Of2005, se puede concluir que 11 presentaron al menos una ocasión sobre norma. Esto significa que el 77% de los parámetros estudiados no presentaron valores sobre norma.
- No fue posible identificar variaciones estacionales debido a la dispersión y discontinuidad de datos.
- Los parámetros sobre de norma identificados fueron Hierro, Manganeso, Plomo, Arsénico, Selenio, Cianuro, Cadmio, Mercurio, pH, Sólidos Disueltos Totales y Turbiedad.
- Hierro es el parámetro con mayor número de ocasiones sobre norma, con 88 eventos. Lo sigue Manganeso, con 39 eventos.
- Al considerar solo los parámetros de tipo químico (Tipo II), se encontró que 112 ocasiones sobre la norma ocurrieron en los pozos de control y 43 en los pozos de aducción.
- En cuanto al número de ocasiones sobre norma por pozo, se puede concluir que los pozos de control PC-2-DR y PC-1-EM han sido los que más ocasiones sobre norma han presentado en el período bajo estudio, con 47 y 42 eventos cada uno.
- Se concluye que la mayoría de las alzas sobre la norma cuantificadas se produjeron durante la línea base de aguas, entre junio de 2009 a junio de 2010,

con 98 ocasiones. Posteriormente durante el período de operación, desde julio de 2010 a mayo de 2013, disminuyen considerablemente los episodios de alzas sobre norma con 83 eventos.

- Durante el período de línea base los pozos con mayores ocasiones sobre norma fueron el PC-2-DR alcanzó 26 ocasiones sobre norma, seguido por el pozo PC-1-EM con 22 ocasiones. Durante el período de operaciones, los pozos con mayores ocasiones sobre norma fueron el PC-2-DR y PC-1-EM con 21 y 20 eventos cada uno.
- Para Mn, Cd, Hg, Pb, pH, y Turbiedad se encontró que hubo un mayor número de eventos en el período de línea base. Para Se, Cn, As, Fe y SDT se encontró mayor número de ocasiones sobre norma en el período de operaciones. En el caso de Fe, según lo observado este parámetro presenta una distribución de ocasiones sobre norma con cierta regularidad para ambos tipos de pozos. Lo anterior implica que este parámetro proviene de un aporte natural del suelo a las aguas subterráneas.
- De la evaluación del efecto de la actividad minera de la Planta Delta sobre los parámetros estudiados, se puede concluir que existe un efecto positivo sobre la calidad de aguas, debido a que la mayor cantidad de alteraciones se produjo durante el período de línea base. Una vez puesta en marcha la operación de las actividades de mina, de línea de chancado, de flotación, de lixiviación y del relave de espesados junto a la puesta en marcha de los sistemas de control de impactos medio ambientales permitieron llevar a la baja la cantidad de ocasiones sobre norma. Si bien estos resultados indican un resultado positivo, con el objetivo de consolidarlos se hace necesario complementarlos con estudios de análisis mineralógico y químico del perfil de suelo que permita dilucidar el aporte natural de características químicas al agua subterránea, análisis mineralógico de relave, determinación de DAR, medición de niveles freáticos y precipitación durante la toma de muestras en todos los pozos, entre otros descritos en las recomendaciones.

- Los resultados y análisis realizados a los parámetros fuera de norma y la vulnerabilidad del acuífero, indican que se debe continuar el seguimiento en los años posteriores, dando especial énfasis a aquellos que presentaron valores preocupantes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- **Altamirano, L., 2013.** AGUA. Documento en línea <<http://www.elaguapotable.com/AGUAredquimica.htm>> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Arumí, J. y Oyarzún, R. 2006.** Las aguas subterráneas en Chile. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 37-45. Documento en línea <<https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/131375>> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Araya, G. 2009.** Compañía Minera de Panulcillo (su historia). Ovalle. 158 p.
- **ATSDR, 2000.** Resumen de salud pública. Manganeso. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. Documento en línea <www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html> [consulta: 01 de abril de 2017].
- **ATSDR, 2003.** Resumen de salud pública. Selenio. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. Documento en línea <www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html> [consulta: 01 de abril de 2017].
- **ATSDR, 2005.** Reseña Toxicológica del Arsénico (versión para comentario público) (en inglés). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. Documento en línea <www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html> [consulta: 01 de abril de 2017].
- **ATSDR, 2006.** Resumen de salud pública. Cianuro. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. Documento en línea <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs8.pdf> [consulta: 27 de julio de 2017].
- **ATSDR, 2007.** Resumen de salud pública. Plomo. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. Documento en línea <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.pdf> [consulta: 01 de abril de 2017].

- **Auge, M. 2006.** Agua Subterránea Deterioro de Calidad y Reserva. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas. Cátedra de Hidrogeología. Documento en línea < http://www.filo.uba.ar/contenidos/investigacion/institutos/geo_bkp/gaye/archivos_pdf/AguaSubterraneaDeteriorodeCalidadyReserva.pdf> [consulta: 10 marzo 2015].
- **Banco Mundial. 2011.** CHILE. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe. 92 p. Documento en línea < http://www.dga.cl/eventos/Diagnostico%20gestion%20de%20recursos%20hidricos%20en%20Chile_Banco%20Mundial.pdf> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Cabrera, A.; Pacheco, J.; Coronado, V. 1997.** Presencia de Organismos Coliformes Fecales en el Agua Subterránea de una Granja Porcícola en el Estado de Yucatán. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Descentralización en la gestión ambiental. México. Documento en línea < <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico11/as-13.pdf>> [consulta: 01 de abril de 2017].
- **CADE-IDEPE, 2004.** Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Santiago. 376 p. Documento en línea < <http://www.sinia.cl/1292/w3-article-31018.html>> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Carbajal, M. y Favela, C. 2008.** Evaluación de la viabilidad de Procesar un Mineral Cuprífero sin Triturar por el Método de Lixiviación. Tesis Ingeniero en Ciencias. Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora. Unidad Académica Hermosillo. Hermosillo, Sonora, México. Documento en línea < <http://www.bidi.uson.mx/TesisIndice.aspx?tesis=19666>> [consulta: 12 abril de 2016].
- **Carrasco, A. 1988.** Hidrogeología del Campo de Nijar y Acuíferos “Marginales” (Almería). TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos

Costeros Almuñécar (Granada, España). 1988. Documento en línea <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro38/pdf/lib38/in_06.pdf> [consulta: 05 de abril de 2017].

- **Carrillo, A. 2002.** Hidrogeoquímica Ambiental. Notas del curso-taller corto, Puerto Vallarta, Jal. Centro de GeoCiencias-UNAM, Campus Juriquilla, Querétaro. Documento en línea <www.geociencias.unam.mx/~ambiente/presentacion.ppt> [consulta: 24 de febrero de 2015].
- **CEPAL-OCDE, 2005.** Evaluaciones de desempeño ambiental. Capítulo 3, Gestión del agua. Documento en línea <www.repositorio.cepal.org/bitstream/11362/1288/1/S0500003_es.pdf> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Collazo, M. y Montaña, X. 2012.** Manual de agua subterránea. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Proyecto Producción Responsable. Primera edición, agosto de 2012. Montevideo, Uruguay. 121 p. Documento en línea <www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/direccion...de.../manual-de-agua-subterranea> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), 2007.** Estrategia nacional de gestión integrada de cuencas hidrográficas. Santiago, Chile. Documento en línea <<http://www2.inia.cl/medios/intihuasi/documentos/SeminarioAguas/SofiaVergara.pdf>> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Consejo de la Minería Ambiental de la Columbia Británica (CMACB), 2006.** Drenaje Ácido de la Minería. Minería y Contaminación de Agua en la Columbia Británica, Canadá. Documento en línea <http://www.miningwatch.ca/files/amd_esp.pdf> [consulta: 10 marzo 2015].
- **Consejo de Producción Limpia (CPL). 2002.** Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera. Acuerdo marco de producción limpia gran minería. Buenas prácticas y gestión ambiental. Consejo Minero. Subsecretaría de Economía, Gobierno de Chile. Documento en línea <

<http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/DocumentosRelacionados/Guia-Metodologica-Drenaje-Acido-Industria-Minera.pdf>> [consulta: 10 marzo 2015].

- **Cortes, M. 2009.** Calidad de aguas cuenca Elqui. Mesa Regional del Agua-Coquimbo. 6^{ta} Reunión Grupo de Cuenca Chile. La Serena. Chile. 16 y 17 de noviembre de 2009. Documento en línea <<https://www.yumpu.com/es/document/view/35510575/calidad-de-aguas-cuenca-elqui-cazalac>> [consulta: 10 marzo 2015].
- **Cuadra, P. 2016.** Lixiviación en pilas, extracción por solvente y electroobtención: una cadena de tecnología moderna. Codelco Central. Documento en línea <https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/escolares_lixiviacion.asp>. [consulta: 12 abril de 2016].
- **Degremont, G. 1991.** Water Treatment Handbook. Intercept Ltd; 6th Revised edition edition (Aug. 1991). 1.596 pg.
- **DGA. 1999.** Política nacional de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas, Dirección general de Aguas (DGA). Santiago, Chile, 63 p.
- **Donado, L. 1999.** Hidrogeoquímica. Documento en línea <http://www.h2ogeo.upc.es/ldonado/Publications/Donado_1999a.pdf> [consulta: 24 de febrero de 2015].
- **ENAMI. 2007.** Evaluación Proyecto Ambiental Proyecto Delta.
- **ENAMI. 2010.** Declaración Proyecto Ambiental Ampliación de Proceso Molienda Flotación Delta.
- **ENAMI. 2012.** Declaración Proyecto Ambiental Proyecto Optimización y Regularización de Procesos- Planta Delta.
- **Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW). 2010.** Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros. 132 p. Documento en línea <<http://www.elaw.org>> [consulta: 06 marzo 2015].
- **EPA, 1990.** Guía Para La Protección De Las Aguas Subterráneas. United States Environmental Protection Agency. EPA 440/6-90-004. Documento en línea

<http://water.epa.gov/infrastructure/drinkingwater/sourcewater/protection/upload/2005_05_18_ogwdw_sourcewater_pubs_guide_citguidegwpsp_1990.pdf>
[consulta: 04 enero 2015].

- **Fagundo, J. y González, P. 2005.** Hidrogeoquímica. Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT), Ministerio de Salud Pública, La Habana, Cuba. Documento en línea. <<http://www.fagundojr.com/documentos/Hidrogeoquimica.pdf>> [consulta: 24 de febrero de 2015].
- **Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. 2002.** Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Segunda edición. Banco Mundial. Washington, D.C. 128 p. Documento en línea <<http://documents.worldbank.org/curated/en/229001468205159997/pdf/25071PUB01Spanish10BOX0334116B01PUBLIC1.pdf>> [consulta: 26 de marzo de 2013].
- **Gomes, A.; Keiko, E.; Barboza, M.; Faustino, M. 2008.** Selênio em águas subterrâneas da Região Noroeste do Estado de São Paulo. FAPESP projeto N° 0306419-1, SABESP. Documento en línea <<https://www.ipen.br/biblioteca/2008/eventos/13465.pdf>> [consulta: 05 de abril de 2017].
- **Heisig, M. 2010.** Monitoreo del recurso hídrico. Apuntes de clases. Cátedra de monitoreos ambientales. Magister en Gestión Ambiental. Universidad Católica del Norte.
- **Hermida, R. 2007.** Proceso de obtención de cobre. Documento en línea <<https://es.scribd.com/doc/51188605/Proceso-de-obtencion-del-cobre>> [consulta: 12 abril de 2016].
- **Hernández, S. 2014.** Recursos hídricos en la minería del cobre. En: Seminario “El uso sostenible del agua en la minería: los desafíos actuales y futuros”. IFT ENERGY 2014. 22 al 24 de julio de 2014. Antofagasta. Documento en línea <<http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2014/07/Presentaci%C3%B3n->

Agua-IFT-Energ%C3%ADa-y-Agua-Antofagasta.pdf. > [consulta: 20 noviembre 2014].

- **Higueras, P.; Oyarzun, R.; Maturana, H. 2007.** Minería y toxicología. Curso de Minería y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, EUP Almadén. Universidad de Castilla-La Mancha. España. Documento en línea <
https://previa.uclm.es/users/higueras/MAM/Mineria_Toxicidad4.htm#Fuentes>
[consulta: 01 de abril de 2017].
- **Jiménez J. y Colmenares S., 2009.** Medición de Parámetros Físico Químicos y Biológicos del Agua Subterránea en la Zona de Bucaramanga. Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Bucaramanga. Documento en línea <
<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1977/2/130018.pdf>>
[consulta: 05 de abril de 2017].
- **Kovalevsky, V.; Kruseman, G.; Rushton, K. 2004.** Groundwater studies. An international guide for hydrogeological investigations. IHP-VI, Series On Groundwater N° 3. UNESCO. 423 p. Documento en línea <
<http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001344/134432e.pdf>> [consulta: 26 septiembre 2013].
- **Lenntech, 2013.** Lenntech Water Treatment. Historia del tratamiento de agua potable. Documento en línea <
<http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-tratamiento-agua-potable.htm>> [consulta: 16 septiembre 2013].
- **LGM, 2010.** Medición de Turbidez en la Calidad del Agua. La Guía MetAs. Boletín N° 100, enero de 2010. México. Documento en línea <
<http://www.metas.com.mx/guiametas/la-guia-metas-10-01-turbidez.pdf>>
[consulta: 05 de abril de 2017].
- **Lillo, J. 2007.** Técnicas Hidrogeoquímicas. Master Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos. Universidad Rey Juan Carlos. España.

Documento en línea
<http://www.escet.urjc.es/~jlillo/Tecnicas_Hidrogeoquimicas.pdf> [consulta: 26 septiembre 2013].

- **Maksaev, V. 2001.** Impacto ambiental de la actividad minera. Apuntes del curso GL54A, Metalogénesis. Departamento de Geología. Facultad de ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Documento en línea <<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/IMPACTO%20AMBIENTAL%20DE%20LA%20ACTIVIDAD%20MINERA.pdf>> [consulta: 26 mayo 2017].
- **MINEO. 2000.** Part 2: Potential environmental and social impacts of mining. Unión Económica Europea. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Francia. Documento en línea <<http://www2.brgm.fr/mineo/UserNeed/IMPACTS.pdf>> [consulta: 05 marzo 2015].
- **Montes, J. 2011.** Recursos Hidrogeológicos. Documento en línea <<http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wp-content/uploads/2011/07/recursos.pdf>> [consulta: 24 de febrero de 2015].
- **Moreno, L.; Liquiñano, M.; Rubio, J.; Murillo, J. 2001.** Eliminación de aguas residuales urbanas mediante infiltración directa sobre el terreno. Impacto sobre el sistema solución del suelo-agua subterránea. Documento en línea <<http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfayc4/elimin.pdf>>. [consulta: 01 abril de 2017].
- **Orrego, J. 2002.** El Estado de las Aguas Terrestres en Chile: Cursos y Aguas Subterráneas. Fundación Terram. Documento en línea <<http://www.terram.cl/images/storiesrppublicos12%281%29.pdf>> [consulta: 27 noviembre 2014].
- **Oyarzún J. y Oyarzún, R. 2011.** Minería sostenible: principios y prácticas. Ediciones GEMM - Aula2pontonet. Documento en línea <http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html> [consulta: 06 marzo 2015].

- **Oyarzún, J. 2007.** Minería y Contaminación del Agua: ¿Cuándo es Necesario Preocuparse? Minería y Medioambiente. <http://www.aulados.net/Temas_ambientales/Aguas_contaminacion_Chile/Contaminacion_aguas_Chile.htm> [consulta: 12 abril de 2016].
- **Peña, E. y Menendez, J. 2016.** Estudio de las colas de tratamiento de oro de la explotación minera en Ponce Enríquez (Ecuador) desde una perspectiva ambiental. Dyna rev.fac.nac.minas [online]. 2016, vol.83, n.195 [cited 2017-04-20], pp.237-245. Documento en línea. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532016000100030&lng=en&nrm=iso>. ISSN 0012-7353. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n195.51745>.
- **Rocha, E. 2009.** Parámetros y características de las aguas naturales. Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. México. Documento en línea <
- **Rodríguez-Pacheco, R.; Fabregat, S. y Candela, L. 2000.** La contaminación de las aguas subterráneas por Residuos mineros. Ejemplo del aluvial del río Moa, Holguín (Cuba). I Congreso de mundial integrado de aguas subterráneas. 31/07-04/08/2000. Fortaleza, Ceará, Brasil. Resumos. Documento en línea <<http://aguassubterraneeas.abas.org/asubterraneeas/article/view/23033/15160>> [consulta: 26 septiembre 2013].
- **Salazar, C. 2003.** Situación de los recursos hídricos en Chile. Centro del Tercer Mundo para Manejo de Agua, A. C. Fundación Nippon. 109 p. Documento en línea <<http://www.thirdworldcentre.org/publi.html>> [consulta: 04 marzo 2015].
- **Sancha, A. 2005.** Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Informe final. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. 254 p. Documento en línea <http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_a_gricolas/pdf_aguas/informe_final.pdf> [consulta: 26 septiembre 2013].

- **Sánchez, J. y Enríquez, S. 1996.** Impacto Ambiental De La Pequeña Y Mediana Minería En Chile. Departamento de Economía de la Universidad de Chile. 81 p. Documento en línea < <http://cdam.minam.gob.pe/publielectro/impacto%20ambiental/Ambientemineriac hile.pdf>> [consulta: 08 abril de 2016].
- **Sigler, A. y Bauder J. 2012.** Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales. Programa de Extensión en Calidad del Agua. Departamento de Recursos de la Tierra y Ciencias Ambientales. Universidad Estatal de Montana. Documento en línea < http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS%202012-11-15-SP.pdf> [consulta: 25 mayo de 2017].
- **Septoff, A. 2005.** Hardrock mining: Acid mine drainage. Earthworks Fact Sheet. Documento en línea < www.earthworksaction.org/files/publications/FS_AMD.pdf> [consulta: 05 marzo 2015].
- **Servicio Agrícola Ganadero (SAG). 2005.** Metales Pesados. Documento en línea < http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_a gricolas/pdf_suelos/5_metales_pesados_suelo.pdf> [consulta: 05 mayo 2017].
- **UACH, 2009.** Parámetros y Características de las Aguas Naturales. Programa de la Materia de Ingeniería Sanitaria. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chihuahua. Documento en línea < <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/parametros1.pdf>> [consulta: 25 de mayo de 2017].
- **Universidad de Chile. 2013.** Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile 2012. Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas. 589p. Documento en línea < <http://www.uchile.cl/publicaciones/97817/informe-pais-estado-del-medio-ambiente-en-chile-2012>> [consulta: 06 marzo 2015].
- **University of Arizona, 2017.** Antecedentes sobre el Arsénico. Dean Carter Binational Center for Health Sciences. Documento en línea

<<http://binational.pharmacy.arizona.edu/content/antecedentes-sobre-el-ars%C3%A9nico>>. [consulta: 01 abril de 2017].

- **Vargas, C.; Arancibia, A. y Navarro, P. 2013.** Caracterización y estudio de la lixiviación ácida de relaves antiguos provenientes de procesos de flotación de minerales sulfurados de cobre. [en línea] REMETALLICA, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, Año 31, N° 19, mayo 2013. Documento en línea. <http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/3_-_caracterizacion_y_estudio_de_la_lixiviacion_acida_de_relaves_antiguos_provenientes_del_proceso_de_flotacion_demineralessulfuradosde_cobre_-_c_vargas_a_arancibia_p_navarro.pdf> [consulta: 12 abril de 2016].
- **Water Management Consultants. 2007.** Estudio Hidrogeológico del Proyecto Delta. Preparado para Montgomery Watson Harza. Anexo 16, Adenda 1, Estudio De Impacto Ambiental “Proyecto Delta”. 57 p.

9. ANEXOS

Anexo 1: evolución de la normativa relacionada a la calidad de aguas y al agua potable en Chile.

Cuerpo Legal	Institución	Fecha Publicación	Nombre	Descripción de la(s) Regulación(es) a Controlar
Calidad del Agua				
D.F. L. N° 725	Ministerio de Justicia	31-01-1968	Código Sanitario. Título "De la Higiene y Seguridad del Ambiente", Párrafo "De las Aguas y sus Usos Sanitarios" Artículos 70,71, 72, 73 y 74.	
D.S. N° 867	Ministerio de Obras Públicas	05-07-1978	Declara Norma Chilena Oficial 1.333 Establece Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos. Modificada por D.S. N° 105 de 1987 del Ministerio de Obras Públicas.	Aplica uso agua: consumo humano, bebida animal, riego, recreación y estética, vida acuática.
D.S. N° 105	Ministerio de Obras Públicas	22-05-1987	Deja sin efecto Decreto N° 51 de 1987 y Sustituye Párrafo Final del Punto 6.1.2 de la NCh 1333 Of. 78 Declara oficial Norma NCH 333 Of.38. Req. Calidad agua.	Se autoriza al Ministerio de Obras Públicas para dar valores mayores o menores de los límites máximos de la Tabla 1. NCh 1333 Of78.
D.S. N° 501	Ministerio de Obras Públicas	08-02-1996	Declara Normas Oficiales de la República de Chile las que indica, referentes a la calidad del agua.	Diseño programas de muestreos técnicos y preservación y manejo de las muestras.
Res. N° 1.145	Ministerio de Obras Públicas	24-06-1997	Requisitos para laboratorios de Aguas del Área Sanitaria y Dispone Plazos de Cumplimiento.	Establece los requisitos exigidos por la Superintendencia de Servicios Sanitarios, de los laboratorios que analizan parámetros NCh 409/84, NCh 2280/96, RILES-Descargas a sistemas públicos de recolección de aguas servidas y norma técnica relativa a descargas de RILES directos aguas

				superficiales y subterráneas.
D.S. N° 84	Ministerio de Obras Públicas	19-02-1998	Declara Norma Oficial de la República de Chile.	La NCh. 411/6 Calidad del Agua - Muestreo – Parte 6°: Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua.
Agua Potable				
D.F.L. N° 725	Ministerio de Justicia	31-01-1968	Código Sanitario. Art. 71 y 72.	
D.S. N° 735	Ministerio de Salud	19-12-1969	Reglamento de los Servicios de Agua Destinados al Consumo Humano. Establece Norma de Calidad para el Agua Potable de Consumo Humano.	El Servicio de Salud correspondiente debe aprobar y autorizar todo proyecto de construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra de provisión o purificación de agua para el consumo humano. Todo servicio de agua potable debe tener proceso de tratamiento.
D.S. N° 301	Ministerio de Salud	18-08-1975	Aprueba Reglamento Orgánico M. Salud. Servicio Abastecimiento de aguas de alcantarillado en campings o campamentos de turismo.	Establece la organización, funcionamiento, atribuciones, unidades del Ministerio de Salud.
D.S. N° 267 (Derogado)	Ministerio de la Vivienda y Urbanismo	11-12-1980	Aprueba Reglamento de Instalaciones Domiciliarias Agua Potable y Alcantarillado. Fue derogado por el D.S. N° 50, publicado con fecha 28 de enero de 2003, del Ministerio de Obras Públicas	Regula diseño, construcción y puesta en servicio instalaciones domiciliarias agua potable y alcantarillado en todo el territorio nacional. Todo inmueble debe contar con dichos servicios. Los desagües de residuos industriales o redes públicas de alcantarillado se rigen por otras normas.
D.S. N° 70	Ministerio de Obras Públicas	06-03-1981	Aprueba Manual de Normas Técnicas para la Realización de las Instalaciones de Agua Potable y	Manual Conforme al D.S. N° 267 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

(Derogado)			su Alcantarillado. Fue derogado por el D.S. N° 50, publicado con fecha 28/01/03, del MOP.	
D.S. N° 11	Ministerio de Salud	03-03-1984	Aprueba Norma Oficial Chilena de Calidad de Agua Potable- NCh 409.	Normas aplicable al agua abastecida por un Servicio de agua potable. Establece procedimiento de inspección y muestreo. Ministerio de Salud puede dictar excepciones.
D.F.L. N° 382	Ministerio de Obras Públicas	21-06-1989	Ley General de Servicios Sanitarios.	Regula sistema de producción y distribución del agua potable y recolección y disposición de aguas servidas. Concesiones.
D.S. N° 5.058	Ministerio de Obras Públicas	16-12-2000	Declara Normas Oficiales de la República.	NCh777/1.Of2000 Agua potable – Fuentes de abastecimiento y obras de captación – Parte 1: Terminología, clasificación y requisitos generales. NCh777/2.Of2000 Agua potable – Fuentes de abastecimiento y obras de captación – Parte 2: Captación de aguas subterráneas. NCh2472.Of2000 Aguas residuales – Planta elevadora, Especificaciones generales. NCh2485.Of2000 Instalaciones domiciliarias de agua potable – diseño, cálculo y requisitos de las redes interiores. NCh2556.Of2000 Tubos de propileno copolímero random para la conducción de agua fría y caliente bajo presión. Se anula la NCh777.Of71 Agua potable – Fuentes de abastecimiento y obras de captación, Terminología clasificación y requisitos generales, declarada Norma Chilena Oficial por decreto N° 996 de fecha 8 de noviembre de 1971, del Ministerio de Obras Públicas.

Anexo 2: Parámetros establecidos en la NCh 409/1. Of2005.

Tipo	Elemento	Expresado como elementos totales	Unidades	Límite máximo
I	Escherichia Coli	-	-	Ausencia
	Turbiedad	-	UNT	4
II	Cobre	Cu	mg/L	2
	Cromo total	Cr	mg/L	0,05
	Fluoruro	F	mg/L	1,5
	Hierro	Fe	mg/L	0,3
	Manganeso	Mn	mg/L	0,1
	Magnesio	Mg	mg/L	125
	Selenio	Se	mg/L	0,01
	Zinc	Zn	mg/L	3
	Arsénico	As	mg/L	0,01
	Cadmio	Cd	mg/L	0,01
	Cianuro	CN	mg/L	0,05
	Mercurio	Hg	mg/L	0,001
	Nitrato	NO3	mg/L	50
	Nitrito	NO2	mg/L	3
	Razón nitrato + nitrito	2)	mg/L	1
	Plomo	Pb	mg/L	0,05
	Tetracloroetano	-	µg/L	40
	Benceno	-	µg/L	10
	Tolueno	-	µg/L	700
	Xilenos	-	µg/L	500
	Monocloroamina	-	mg/L	3
	Dibromoclorometano	-	mg/L	0,1
	Bromodichlorometano	-	mg/L	0,06
Tribromometano	-	mg/L	0,1	
Triclorometano	-	mg/L	0,2	
Trihalometanos *)	-	mg/L	1	
III	Estroncio 90	-	Bq/L	0,37
	Radio 226	-	Bq/L	0,11

	Actividad base total (excluyendo Sr-90, Ra-226 y otros emisores alfa)	-	Bq/L	37
	Actividad beta total (incluyendo Sr-90, corregida para el K-40 y otros radioemisores naturales)	-	Bq/L	1,9
	Actividad alfa total (incluyendo Ra-226 y otros emisores alfa)	-	Bq/L	0,55
IV	Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20
	Olor	-	-	inodora
	Sabor	-	-	insípida
	Amoníaco	NH3	mg/L	1,5
	Cloruro	Cl	mg/L	400
	pH	-	-	6,5 < pH < 8,5
	Sulfato	-	mg/L	500
	Sólidos disueltos totales	-	mg/L	1500
V	Cloro libre residual	-	mg/L	2