

UCH-FC  
Q - AMBIENTAL  
F. 363  
C. 1



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS -ESCUELA DE PREGRADO

**“Estudio sobre abatimiento de sílice como ácido orto silícico y mejora de la recuperación en planta de ósmosis inversa”**

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

**QUÍMICO AMBIENTAL**

**TAMARA PATRICIA FERNÁNDEZ TAPIA**

Director de Seminario de Título: Mariela Orellana C.

Profesor Patrocinante: Dr. Antonio Galdámez S.

Octubre de 2016  
Santiago – Chile





## INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

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

**TAMARA PATRICIA FERNÁNDEZ TAPIA**

**“ESTUDIO SOBRE ABATIMIENTO DE ÁCIDO SÍLICE Y MEJORA DE LA RECUPERACIÓN EN PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA”**

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

### **COMISIÓN DE EVALUACIÓN**

*Mariela Orellana*  
**Director Seminario de Título**

---

*Dr. Antonio Galdámez S.*  
**Profesor Patrocinante**

---

*Dra. Isel Cortes*  
**Presidenta**

---

*Dr. Paul Jara*  
**Corrector**

---

Santiago de Chile, Octubre 2016

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
AGRADECIMIENTOS .....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Antecedentes Generales .....	1
1.2 Oxido de silicio .....	2
1.2.1 Polimerización de la sílice en solución acuosa: .....	3
1.2.2 Dinámica de la sílice en el ambiente.....	4
1.3 División Ministro Hales .....	7
1.3.1 Ubicación .....	9
1.3.2 Ósmosis inversa .....	10
1.4 Otras tecnologías para la desalinización .....	12
1.5 Objetivos .....	13
1.5.1 Objetivo General .....	13
1.5.2 Objetivos Específicos.....	13
II. MATERIALES Y METODOS .....	14
2.1. Materiales .....	14
2.1.1. Equipos e instrumentos .....	14
2.1.2. Reactivos y soluciones .....	15
2.2. Métodos.....	16
2.2.1. Comportamiento de sílice a diferentes pHs .....	16
2.2.2. Ensayo de abatimiento de sílice con cal.....	16
2.2.3. Ensayo de abatimiento de sílice con aluminato de sodio.....	17
2.2.4. Ensayo de abatimiento de sílice con cloruro de magnesio.....	17
2.2.5. Ensayo de abatimiento de sílice con cloruro de magnesio y floculante aniónico Clarisol 4010. ....	18
2.3. Medición de sílice en agua.....	19
2.4. Análisis de muestra de agua del río San Pedro de Inacaliri. ....	19
2.4.1. Determinación de pH por método electrométrico.....	19

2.4.2.	Determinación de alcalinidad por método titulación potenciométrica. ....	19
2.4.3.	Determinación de cloruros por método argentométrico.....	20
2.4.4.	Determinación de sulfato por método gravimétrico.....	21
2.4.5.	Determinación de nitrato por método electrodo específico. ....	21
3.1.	Parámetros fisicoquímicos del agua del río San Pedro de Inacaliri .....	22
3.2.	Comportamiento de la sílice a distintos valores de pH .....	23
3.3	Ensayos de abatimiento.....	23
3.3.1	Ensayo abatimiento utilizando cal .....	23
3.3.2	Ensayo abatimiento utilizando aluminato de sodio.....	25
3.3.3	Ensayo abatimiento utilizando cloruro de magnesio .....	27
3.3.4	Ensayo abatimiento utilizando cloruro de magnesio y floculante .....	28
3.4	Evaluación de costos para cada ensayo.....	29
3.4.1.	Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice utilizando cal: ....	29
3.4.2	Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice con aluminato de sodio: .....	31
3.4.3	Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice utilizando cloruro de magnesio .....	32
3.4.4	Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice utilizando Cloruro de magnesio y Clarisol 40120.....	34
V.	CONCLUSIONES .....	40
VI.	REFERENCIAS .....	42
VII.	ANEXOS .....	44
	ANEXO 1 .....	44
	ANEXO 2 .....	46
	ANEXO 4.....	50
	ANEXO 5 .....	51
	ANEXO 6 .....	52
	ANEXO 7 .....	54
	ANEXO 8 .....	56
	ANEXO 9 .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Dosificación de cloruro de magnesio a cada muestra según pH.....1 9	
<b>Tabla 2:</b> Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua del río San Pedro de Inacaliri .....23	
<b>Tabla 3:</b> Concentraciones de magnesio en solución, puntos de pH y ácido orto silícico en ensayo de abatimiento utilizando cloruro de magnesio.....34	
<b>Tabla 4:</b> Cantidad de productos químicos utilizados en un mes con su valor mensual.....35	
<b>Tabla 5:</b> Puntos de pH, concentración de magnesio y ácido orto silícico para ensayo utilizando $MgCl_2$ y Clarisol 4010 en el abatimiento de la sílice.....36	
<b>Tabla 6:</b> Cantidad de productos químicos utilizados mensualmente con su respectivo valor .....37	

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estructura del cuarzo.....	3
<b>Figura 2:</b> Reacción de polimerización del ácido orto silícico.....	3
<b>Figura 3:</b> Reacción de hidrólisis de un feldespato de tipo plagioclasas.....	5
<b>Figura 4:</b> Ciclo biogeoquímico del silicio.....	6
<b>Figura 5:</b> Diagrama de procesos planta concentradora.....	8
<b>Figura 6:</b> Diagrama de procesos planta tostación.....	8
<b>Figura 7:</b> Hoya hidrográfica del Río Loa.....	9
<b>Figura 8:</b> Ubicación geográfica DMH.....	10
<b>Figura 9:</b> Figuras comparativas de los procesos de ósmosis y ósmosis inversa.....	11
<b>Figura 10:</b> Concentración de sílice total, ácido orto silícico y sílice coloidal en agua a distintos pHs .....	23
<b>Figura 11:</b> Distintos puntos de pH medidos y su correspondiente concentración de sílice; coloidal, disuelta como ácido orto silícico y total .....	24
<b>Figura 12:</b> Porcentaje de abatimiento de sílice disuelta en cada punto de pH en método de abatimiento con cal.....	24
<b>Figura 13:</b> Comportamiento de sílice total, coloidal y disuelta (SiOH) <sub>4</sub> en distintos puntos de pH para abatimiento con aluminato de sodio.....	25
<b>Figura 14:</b> Porcentaje de abatimiento de la sílice disuelta en cada punto de pH para ensayo de abatimiento con aluminato de sodio.....	25
<b>Figura 15:</b> Ensayo de abatimiento de sílice utilizando aluminato de sodio, valores de pH 3 a 8.....	26
<b>Figura 16:</b> Ensayo de abatimiento de sílice utilizando aluminato de sodio, valores de pH 9 a 12.....	26

<b>Figura 17:</b> Sílice disuelta ( $\text{Si(OH)}_4$ ) presente en muestras de agua del río San Pedro de Inacaliri con concentraciones variables de $\text{Mg}^{2+}$ en solución y distintos puntos de pH.....	27
<b>Figura 18:</b> Porcentaje de abatimiento de sílice disuelta en distintos puntos de pH con concentraciones variables de magnesio en solución.....	27
<b>Figura 19:</b> Concentración de ácido orto silícico en muestras de agua con distintas concentraciones de magnesio y puntos de pH para ensayo de abatimiento utilizando cloruro de magnesio y floculante. ....	28
<b>Figura 20:</b> Porcentaje de abatimiento de sílice disuelta en distintos puntos de pH con concentraciones variables de magnesio en solución. Ensayo de abatimiento utilizando cloruro de magnesio y floculante.....	29
<b>Figura 21:</b> Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con Cal y capacidad de trabajo al 50%.....	30
<b>Figura 22:</b> Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con Cal y capacidad de trabajo al 65%.....	30
<b>Figura 23:</b> Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con aluminato de sodio y capacidad de trabajo de 50%.....	31
<b>Figura 24:</b> Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con aluminato de sodio y capacidad de trabajo al 70%.....	32
<b>Figura 25:</b> Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y capacidad de trabajo de 50%.....	33
<b>Figura 26:</b> Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y capacidad de trabajo de 65%.....	34

**Figura 27:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y floculante aniónico Clarisol a una capacidad de trabajo de 50%.....35

**Figura 28:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y floculante aniónico Clarisol y capacidad de trabajo de 65%.....36



## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primera instancia a mis padres, por su apoyo incondicional durante todo este proceso, por creer en mí y darme todas las herramientas para poder lograr mis metas. A mi hermana Catalina, por su preocupación y apoyo.

A la gente de Aguasin, Oscar Molina y Mariela Orellana, por creer en mí y darme la oportunidad de ser parte de un gran proyecto y desarrollar mis primeros pasos en el mundo profesional. En especial, a Alejandra Marín, por guiarme, compartir sus conocimientos y enseñarme aspectos del tratamiento de aguas y riles. A todos con los que compartí en el área de Productos Químicos. Al Laboratorio de Aguasin, en especial a Yasna, quien me acogió desde el primer día, respondiendo siempre cualquier tipo de inquietud. A Jessica y Yessenia, sin duda un grupo de trabajo muy ameno.

A la profesora Isel Cortés, por su paciencia y exigencia en la revisión de mi trabajo, y también a la profesora Cecilia Labbé por su paciencia y preocupación.

A mis queridas amigas de la U, Naty y Dany, muchas gracias por su amistad y apoyo, por su preocupación para que terminara la tesis y por darme ánimo en momentos difíciles. Las quiero mucho, gracias por ser tan *partners* y estar siempre dispuestas a ayudarme sin importar la hora ni el día.

Y, finalmente, a mi amor Camilo, gracias por entregarme tu amor incondicional, por apoyarme, contenerme y siempre darme ánimo. Te amo.

## RESUMEN

Chile posee uno de los desiertos más áridos del mundo y, a la vez, uno de los más ricos en minerales. La actividad minera necesita una gran cantidad de agua para realizar la extracción y procesamiento de los minerales, sin embargo la escasez de agua en la zona norte limita estos procesos mineros, por lo cual se hace necesario el uso eficiente del recurso hídrico de la zona para que la utilización de aguas en esta actividad no afecte el desarrollo de ecosistemas, la agricultura y a las distintas comunidades que viven en la zona.

Este Seminario de Título se refiere a un estudio evaluativo de distintas técnicas para abatir sílice disuelto (ácido orto silícico) en el agua del río San Pedro de Inacaliri. Aguas que son utilizadas por la mina División Ministro Hales (DMH), perteneciente a CODELCO en sus procesos mineros.

Las características fisicoquímicas del agua del río San Pedro de Inacaliri hacen necesario el uso de una planta de ósmosis inversa por el gran contenido de sales disueltas en el agua. La utilización de ósmosis inversa se ve limitada porque las membranas se ensucian recurrentemente con incrustaciones, específicamente de sílice, es por esto que se hace necesario realizar un pre-tratamiento de agua antes de que pase por la ósmosis inversa.

Entre las actividades realizadas se cuenta la elaboración de 4 ensayos distintos para abatir sílice, utilizando: cal, soda, aluminato de sodio y cloruro de magnesio, la comparación de eficacia de abatimiento de sílice de cada uno de ellos y su respectiva evaluación económica. Los resultados obtenidos fueron analizados utilizando una simulación con el software Advisor 3.0, lo cual permitió estimar la capacidad de trabajo de la ósmosis inversa a distintas concentraciones de sílice en el agua.

Finalmente, el ensayo utilizando aluminato de sodio es el más efectivo en abatimiento de sílice, disminuyendo en un 70% la sílice disuelta. Sin embargo, al utilizar una mayor cantidad de insumos, sube el costo del ensayo. Por otra parte, el ensayo utilizando cal es el más sencillo y logra abatir la sílice en un 50%, lo que disminuye el caudal de agua utilizada en  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ .

## ABSTRACT

Chile has one of the driest deserts in the world and, at the same time, one of the richest in minerals. Mining requires a lot of water for extraction and processing of the minerals, yet water shortage in the north, limits these mining processes, so the efficient use of water resources in the area is necessary for this activity does not affect the development of ecosystems, agriculture and the various communities living in the area.

This Seminar Title refers to an evaluation study of different techniques to reduce dissolved silica (ortho silicic acid) in the water of San Pedro River. Waters that are used by the Division Ministro Hales (DMH), belonging to CODELCO mine in their mining processes.

The physicochemical characteristics of the water from the San Pedro River necessitate the use of a reverse osmosis plant for the high content of dissolved salts in water. The use of reverse osmosis membranes is limited because it overlay with dirt, specifically silica dirt, which is why it is necessary to conduct a pre-treatment of water before passing through reverse osmosis.

Activities take in the development of four different trials to reduce amount silica using: lime, soda, sodium aluminate and magnesium chloride, comparing decreasing silica efficacy of each of them and their respective economic assessment. The results were analyzed using a simulation with the Advisor 3.0 software, which allowed estimating the work capacity of the reverse at various concentrations of silica in water osmosis.

Finally, the essay using sodium aluminate is the most effective in the reduction of silica, decreasing by 70% dissolved silica. However, to use a larger amount of inputs; raises the cost of the trial. Moreover, the essay using cal is the simplest and does reduce 50% silica, dropping the water flow used 60 m<sup>3</sup>/h.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes Generales

En el norte de Chile, el agua es un recurso muy escaso ya que en dicha zona se encuentra uno de los desiertos más áridos del planeta, el desierto de Atacama. Pero a la vez es el más rico en recursos minerales metálicos como: el cobre, plata, oro y no metálicos: boro y litio, entre otros. Debido a esto es necesario disponer de agua para la aplicación de los procesos mineros que permiten la explotación de dichos minerales.

La escasez de agua es un gran problema para la minería, pues dificulta el proceso de obtención del mineral y hace necesario el uso eficiente del recurso hídrico de la zona, para que no afecte el desarrollo de ecosistemas, la agricultura y a las comunidades que viven en esa zona.

En las regiones del norte, la escasez de agua se ha traducido en un aumento de la competencia entre los principales usuarios de agua: minería, agricultura de riego intensivo y suministro de agua potable (OCDE/CEPAL, 2005).

Es por esto que la División Ministro Hales (DMH), mina perteneciente a CODELCO se preocupa por una utilización eficaz y sustentable del recurso hídrico. CODELCO explota fuentes propias de agua, en su gran mayoría correspondientes a derechos de agua de larga data. En el caso de la DMH utilizan agua del río San Pedro de Inacaliri, la cual presenta diversas sales y grandes concentraciones de óxido de silicio o sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en forma acuosa como ácido orto silícico, compuesto que produce incrustaciones en calderas y tuberías.

Por la gran cantidad de sales disueltas en el agua del río fue necesario implementar una planta de ósmosis inversa en la DMH, pero el alto contenido de ácido orto silicio en el agua produjo problemas de incrustaciones en las membranas de la planta de ósmosis inversa.

Finalmente fue necesario realizar un pre-tratamiento para abatir la mayor cantidad de ácido orto silícico en el agua antes de que esta pase por la ósmosis

inversa para poder maximizar el reciclaje y disminuir el consumo del recurso hídrico de la zona norte proyectando un desarrollo minero de manera eficiente y responsable.

## 1.2 Oxido de silicio

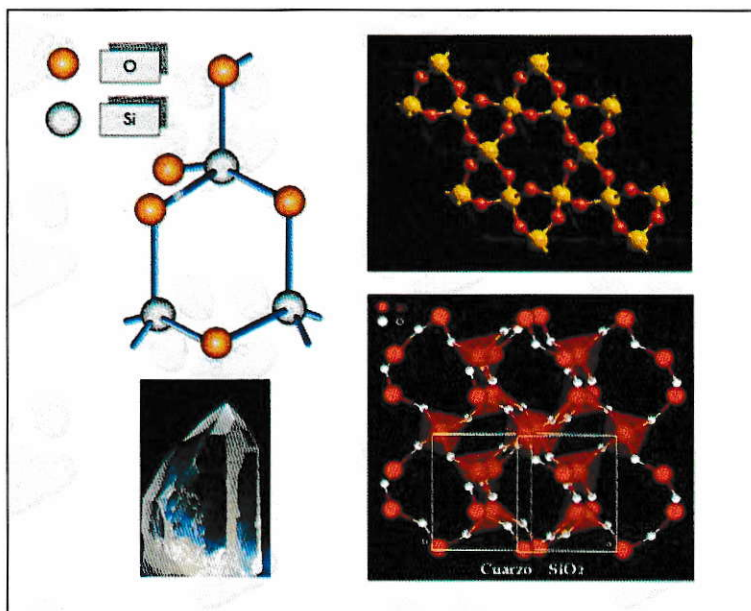
El silicio es un elemento químico perteneciente al grupo de los semimetales o metaloides con numero atómico 14, es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (27%), después del oxígeno. Aunque nunca se encuentra como elemento libre, sino solo en compuestos que contienen enlaces oxígeno-silicio (Rayner-Canham, G.,2000) . El silicio tiene un aspecto sólido cristalino de color gris, con aspecto metálico, pero no puede ser clasificado como metálico debido a su baja conductividad eléctrica.

El dióxido de silicio (iv) llamado comúnmente como sílice es un compuesto de silicio y oxígeno con fórmula química  $\text{SiO}_2$  que se encuentra en varias formas cristalográficas:

- a) Estado cristalino: 1- Macrocristalino: cuarzo, tridimita, cristobalita.  
2- Criptocristalino: calcedonia.
- b) **Estado amorfo:** Sin estructura definida, aquí se encuentra la sílice gel, con contenido de agua de 20 a 30%; sílice gelatinosa, que aparece en solución como agregado; sílice coloidal, que se encuentra disuelta en el agua con partículas de dimensiones entre  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$  mm. ; ópalo, forma natural más común con menos de 12% de agua y sílice vítrea, preparada con su enfriamiento de sílice fundida.
- c) **Estado acuoso:** El ácido orto silícico es la forma principal en soluciones saturadas con pH menor de 9.

En las formas de sílice, cuarzo, tridimita y cristobalita, el átomo de silicio se encuentra en el centro de un tetraedro regular con los átomos de oxígeno en los vértices, estando dispuestos en formas diferentes en las distintas modificaciones.

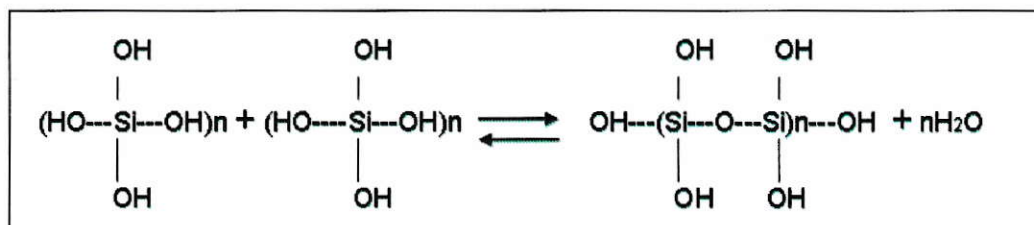
Todas las formas de sílice tienen en común que cada átomo de oxígeno está compartido por dos átomos de silicio por lo cual todo el cristal es una macromolécula. (Melgar,C.& Torres, K., 2008).



**Figura 1:** Estructura del cuarzo. (Referencia [www.100ciaquimica.net](http://www.100ciaquimica.net))

### 1.2.1 Polimerización de la sílice en solución acuosa:

La sílice disuelta o ácido orto silícico se polimeriza lentamente a una suspensión coloidal como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 2:** Reacción de polimerización del ácido orto silícico en agua. (Melgar, C. & Torres, K., 2008).

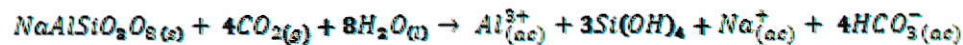
En la polimerización se forman dímeros, trímeros, tetrámeros y polímeros de bajo peso molecular (oligómeros) los cuales aumentan de tamaño hasta formar micelas terminando el proceso al formar coloides que dependiendo de su abundancia y estabilidad pueden o no flocular y formar un precipitado de sílice por medio de un proceso de nucleación homogénea. Este proceso depende de factores como la

temperatura, pH, tensión superficial, radio de la partícula, concentración de sílice reactiva y salinidad.

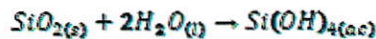
La máxima velocidad de polimerización ocurre entre un pH 6-9 y la mínima velocidad a un pH 2.

El contenido de sílice en aguas naturales varía comúnmente entre un rango de 1 a 30 mg/L, aunque no son raras concentraciones de 100 mg/L e incluso 1000 mg/L en algunas aguas salobres y piélagos. (Melgar,C.& Torres, K., 2008).

Sílice disuelta en agua existe en forma hidratada como ácido orto silícico,  $\text{Si(OH)}_4$  y ácido meta silícico  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ . La existencia de ácido orto silícico en el agua natural puede ser debido a la disolución de las rocas silíceas y minerales como la albita:



Otro medio de generación de ácido orto silícico en agua es por disolución de cuarzo y sílice amorfo (Al-Mutaz I. 2002):

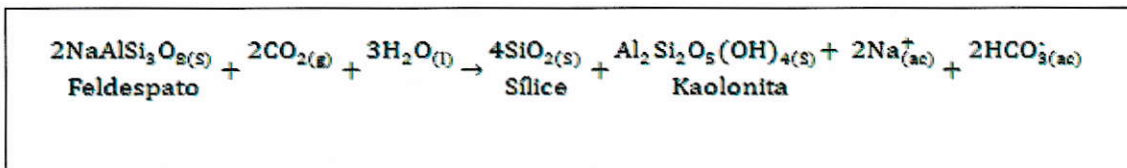


El estudio de sílice en el agua industrial es muy importante, nos permite evitar incrustaciones indeseadas, formación de depósitos duros de sílice en los tubos de las calderas y las incrustaciones en las tuberías de agua potable lo que provocaría el deterioro de las mismas.

### 1.2.2 Dinámica de la sílice en el ambiente

El ciclo biogeoquímico del silicio es relativamente sencillo, cuando se le compara con los ciclos de nitrógeno, fósforo o hierro. Básicamente se conocen sólo dos fuentes primarias de silicio en los ambientes acuáticos: (1) el aporte de sílice y silicatos proveniente de los sedimentos y (2) el aporte aloctono (exógeno) de sílice y silicatos. El aporte de los sedimentos se deriva de la meteorización de depósitos minerales (feldespatos), y de la liberación de sílice y silicatos de sedimentos anóxicos en cuerpos de agua eutróficos (material absorbido a arcillas).

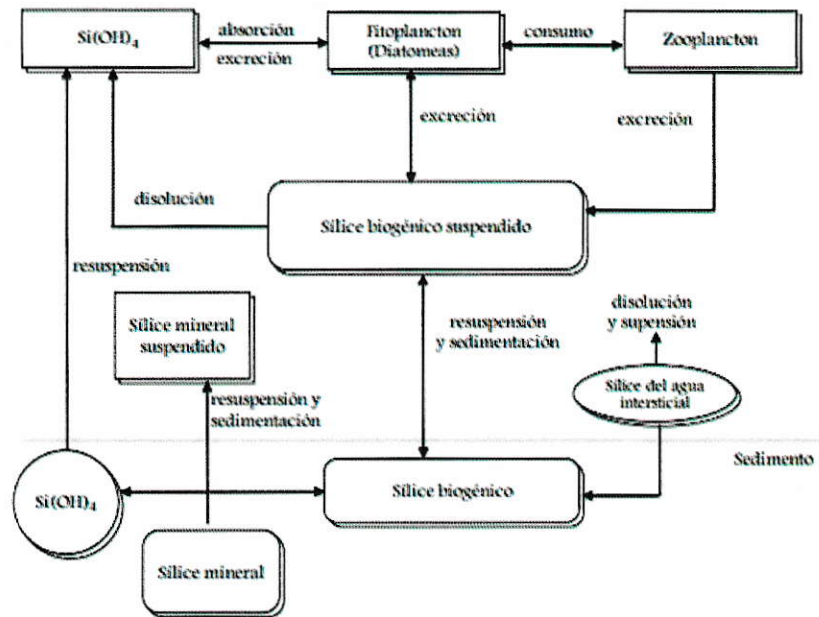
Las rocas que contienen silicio componen cerca de 70% de la corteza terrestre, siendo así la principal fuente de silicio para los cuerpos de agua superficiales y las aguas subterráneas. La lluvia, los manantiales y los lixiviados de suelos contienen una alta concentración de CO<sub>2</sub>. Este último, mineraliza las rocas silíceas liberando sílice (SiO<sub>2</sub>) de acuerdo con la siguiente reacción: (Massol, 2010)



**Figura 3:** Reacción de hidrólisis de un feldespato de tipo plagioclasas. (<http://www.uprm.edu/biology/profs/massol>)

El silicio disuelto en el agua (Si(OH)<sub>4</sub>) tiene una concentración variable y normalmente se halla en exceso con respecto a otros nutrientes. Se encuentra tanto en forma soluble como ácido orto silícico, mientras que en suspensión se encuentra en un amplio espectro de formas silíceas, muchas de las cuales pueden haber sido producto de la erosión de las rocas en tierra y luego transportadas por los ríos o por el viento, incluyendo cuarzo, feldespatos y minerales arcillosos.





**Figura 4:** Ciclo biogeoquímico del silicio. (Referencia [www.tdx.cat](http://www.tdx.cat))

La importancia biológica del silicio se encuentra limitada a determinados grupos de organismos, como las plantas herbáceas, algunos moluscos, las esponjas o diversos organismos unicelulares. Incluso, en alguno de ellos, como en las diatomeas, es uno de los elementos más abundantes. En general, sus funciones son de tipo estructural, llegando a formar estructuras bastante complejas.

La forma principal en los exoesqueletos de diatomeas, radiolarios o silicoflagelados, es el  $\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$  amorfo. En la mayoría de los animales superiores, sin embargo, solo se necesitan trazas de silicio, aunque en el hombre hay tanto silicio como magnesio, y se encuentra implicado en la formación de huesos y cartílagos, contribuyendo también a la fortaleza del colágeno. (Castillo, F. 2005)

En la fase soluble, el silicio se encuentra en forma de ácido orto silícico dando lugar a silicatos, estos promueven la; a) Creación de gradientes de nutrientes minerales desde el suelo a los tejidos de la planta, b) Incide en la acumulación y movilización de reservas de carbohidratos y c) producción de fitoquímicos. Para que esto ocurra, es ideal que la concentración de ácido orto silícico en la solución del

suelo sea permanentemente mayor a los 70 ug/L. Con esta concentración se promueve el flujo de sílice a los diferentes tejidos de la planta. (Horna, R. 2007)

### **1.3 División Ministro Hales**

CODELCO Chile ha creado la División “Mina Ministro Hales” (DMH), cuyo propósito es producir 550 kTon anuales de concentrado, equivalentes a una producción anual de 170 kTon de cobre fino.

DMH está conformada por un área mina que tiene un movimiento total de materiales de 400 kTon/día, de los cuales 50 KTon/día corresponden a mineral de sulfuros que es tratados en un chancador primario para posteriormente pasar a una planta concentradora. Los concentrados producidos en esta planta concentradora, son almacenados en un domo de 30.000 ton de capacidad desde donde se envía el 100% de esta producción a la planta de tostación, para la reducción de arsénico obteniéndose 440 kTon/año de calcina. El complejo de Tostación considera además del equipo Tostador una planta de ácido y otra de tratamientos de efluentes para la recuperación de los residuos sólidos y líquidos resultantes del proceso. Desde estas instalaciones se despacha calcina (Concentrado de alta calidad), hasta las instalaciones de Chuquicamata para ser alimentado el Horno Flash y/o el Convertidor Teniente 2 (CT2), y también se despacha concentrado para hacer la mezcla de concentrados provenientes desde las Plantas de Radomiro Tomic (RT) y Chuquicamata, para finalmente alimentar los hornos de la fundición de concentrado.

Según indica el EIA de CODELCO “el Tranque Talabre es el depósito definido para la disposición final de relaves generados en el proceso productivo de la actual planta concentradora de cobre de la División Chuquicamata, de la planta de la División Ministro Hales y de la futura planta de la División Radomiro Tomic” (Barros, A. 2013).

A continuación se muestran algunos diagramas que explican el proceso DMH y permiten dimensionar las operaciones unitarias consideradas y puntos de traspaso/transferencia y transporte de material.

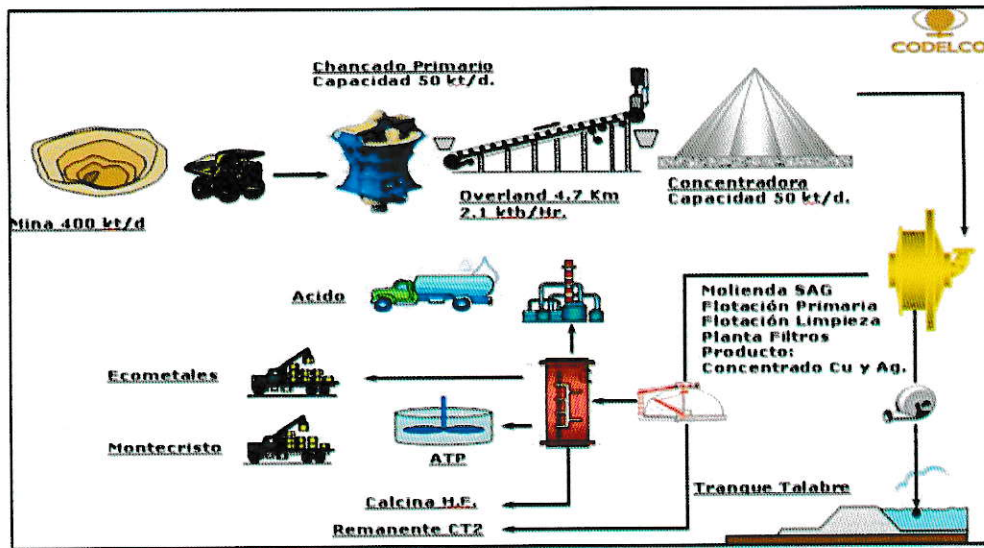


Figura 5: Diagrama de procesos planta concentradora (Referencias: bases técnicas División Ministro Hales).

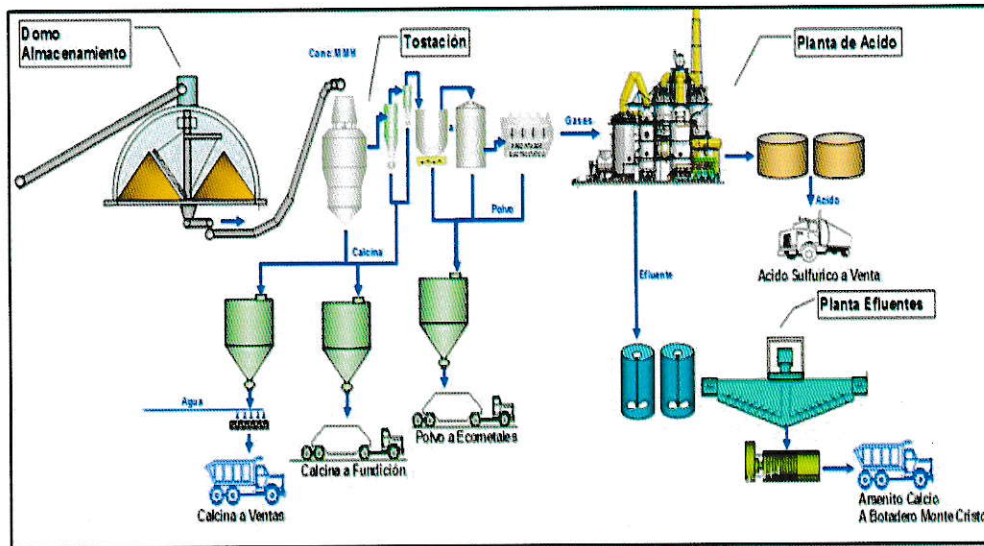
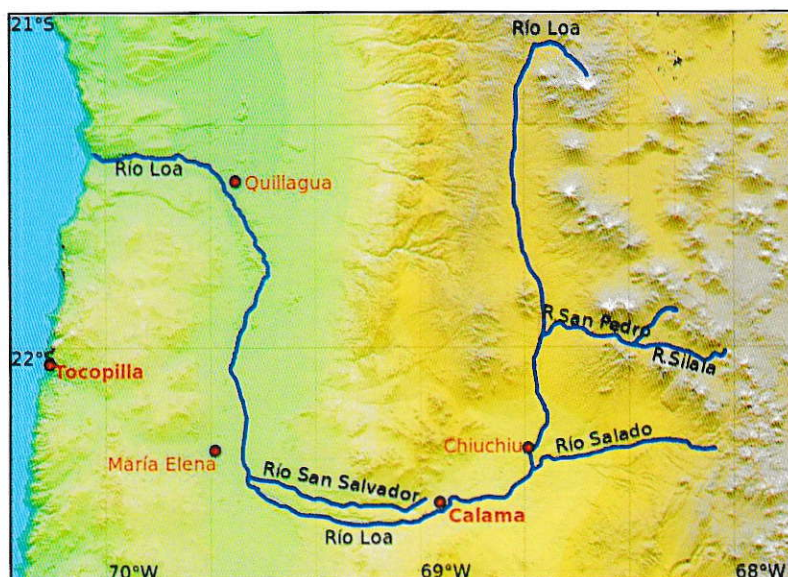


Figura 6: Diagrama de procesos planta de tostación (Referencias: bases técnicas División Ministro Hales).

### 1.3.1 Ubicación

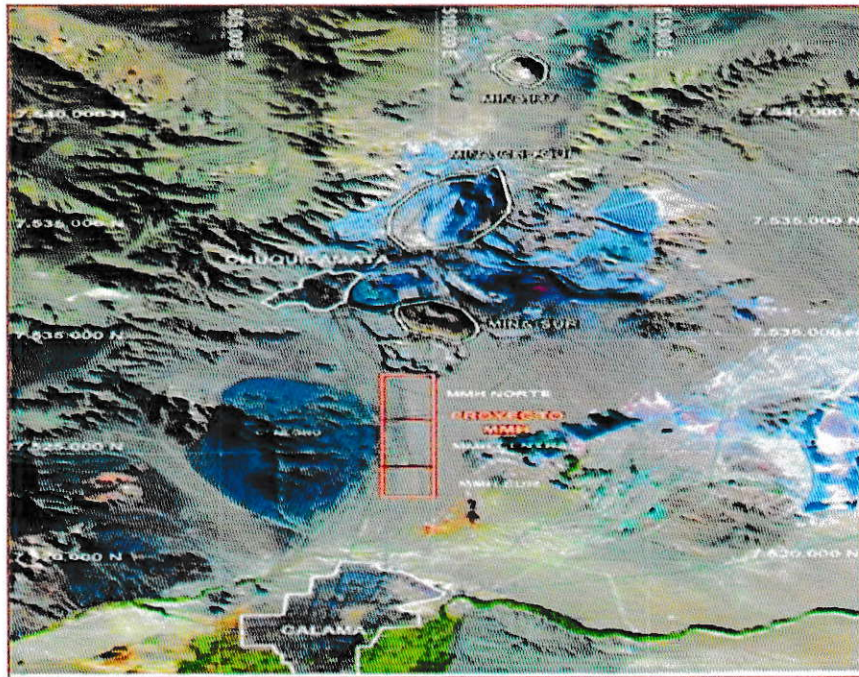
La mina se encuentra ubicada en la II Región de Antofagasta, comuna de Calama. Las instalaciones están ubicadas en la provincia de El Loa, a 5 km al norte de la ciudad de Calama, por camino asfaltado, 250 km al noreste de la ciudad de Antofagasta y a 1.650 km al norte de Santiago, a una altura de 2.400 a 2.600 msnm. La población más cercana es la ciudad de Calama, ubicada a 5 km al sur del rajo DMH.

La mina se abastece del agua del Río San Pedro de Inacaliri, río que recorre parte de la zona andina de la II Región de Antofagasta. La hoya total del río San Pedro de Inacaliri comprende una superficie de 1.087 km<sup>2</sup> que se desarrolla en dirección principal Este-Oeste por unos 75 km de longitud y 15 km de ancho medio.



**Figura 7:** Hoya hidrográfica del Río Loa.

El río San Pedro de Inacaliri, nace en la alta cordillera de Los Andes en la aguada de Inacaliri, y llega hasta la junta con el río Loa. El río San Pedro de Inacaliri muestra caudales muy parejos a lo largo del año, con la excepción de los meses de verano, cuando muestra sus mayores caudales producto de lluvias altiplánicas. Tanto para años húmedos y secos, los caudales se presentan sin importancia de variación. (DGA.2015) ANEXO 2



**Figura 8:** Ubicación geográfica mina Ministro Hales (MMH) (referencia: CODELCO)

### 1.3.2 Ósmosis inversa

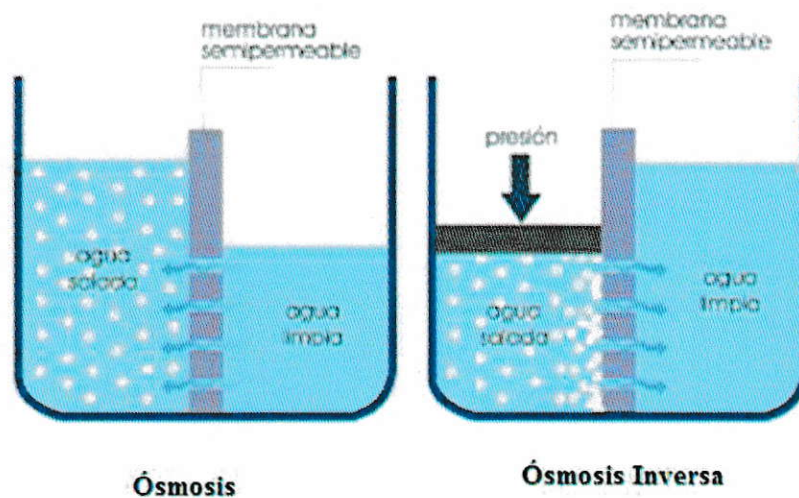
La cantidad de sales disueltas en el agua del río San Pedro de Inacaliri hacen necesario el uso de la planta de ósmosis inversa, ya que si el agua cruda pasara a través de cañerías y calderas se formarían depósitos e incrustaciones de las sales minerales que contiene el agua.

La ósmosis básicamente es el paso del agua a través de una membrana semipermeable desde una solución muy diluida a otra de mayor concentración. La presión osmótica es la presión necesaria para detener el flujo de agua a través de la membrana semipermeable.

En la ósmosis inversa se logra revertir el proceso natural de la ósmosis, se fuerza al agua a pasar a través de una membrana semi-permeable, desde una solución más concentrada en sales disueltas, a una solución menos concentrada, mediante la

aplicación de presión. El objetivo de la ósmosis inversa es obtener agua purificada partiendo de un caudal de agua con gran cantidad de sales. De hecho una de las grandes aplicaciones de la ósmosis inversa es obtener agua potable a partir del agua de mar, con la escasez de agua originada por el desarrollo humano este proceso se vuelve más rentable. (osmosisinversa.mx)

En la figura 9 podemos observar los procesos de ósmosis y ósmosis inversa



**Figura 9:** Figura comparativa de los procesos de ósmosis y ósmosis inversa.

El principal problema en la utilización de ósmosis inversa con aguas de alto contenido salino es que estas aguas al poseer una gran carga de sales provocan ensuciamiento o incrustaciones en la membrana. El ensuciamiento o incrustación puede definirse como la formación indeseada de depósitos en la superficie de la membrana.

Las incrustaciones de sílice ocurren en la planta de ósmosis inversa cuando la sílice disuelta excede su límite de solubilidad y precipita con otros compuestos. Cualquier ácido polisilícico formará silicatos en presencia de metales a pH adecuado. (Al-Mutaz I. 2002).

## 1.4 Otras tecnologías para la desalinización

En el mundo, las tecnologías para desalinización están lideradas por la ósmosis inversa (OI), con un 59%, seguida de la evaporación con un 27% y destilación con un 9%.

Las tecnologías utilizadas para la desalinización de aguas marinas o salobres continentales:

- a) **Destilación Térmica:** conocida también como Destilación solar, consiste en transformar el agua en vapor para luego condensarla y separarla de la sal. Se usa para tratar grandes volúmenes de agua (55.000 m<sup>3</sup>) con altas concentraciones de sal (sobre 30 gramos por litro)<sup>1</sup>. Tiene dos variantes, la primera por el uso directo de la energía del sol, y la segunda, celdas solares<sup>2</sup>. Esta tecnología ha sido diseñada para pequeñas comunidades en regiones áridas o semiáridas.
- b) **Compresión de vapor:** utiliza un compresor adiabático<sup>3</sup> que forma dos sectores de diferentes presiones, de tal manera de generar un flujo de vapor desde el sector de mayor presión y temperatura de condensación hacia el sector inferior, lugar donde se produce la condensación y posterior separación de las sales del agua<sup>4</sup>.
- c) **Congelación:** el agua salina se ve sometida a diversos sistemas de refrigeración para posteriormente evaporar a baja presión en un cristizador al vacío. De esta forma se obtienen cristales de hielo mezclados con cristales en salmuera que pueden ser separados mediante procesos mecánicos<sup>5</sup>.
- d) **Electrodiálisis:** es uno de los métodos de mayor uso, junto con la destilación térmica y osmosis inversa, consiste en la separación iónica a través de una serie de membranas situadas sucesivamente y separadas por milímetros entre

---

<sup>1</sup> Tecnologías de aprovechamiento de aguas. Disponible en: <http://bcn.cl/1k6ik> (Marzo 2015).

<sup>2</sup> Desalación por Destilador y Osmosis Inversa. Disponible en: <http://bcn.cl/1k6il> (Marzo 2015).

<sup>3</sup> Principio adiabático al introducir el gas en el cilindro por las válvulas de entrada, se retiene y comprime en el cilindro y sale por las válvulas de descarga, en contra de la presión de descarga.

<sup>4</sup> Op.cit. Desalación por Destilador y Osmosis Inversa.

<sup>5</sup> Ibíd.

sí. La aplicación de campos eléctricos genera la migración de iones que pasan por estas membranas que actúan como tamices de las sales<sup>6</sup>.

- e) **Ósmosis inversa:** tecnología que aplica presión mecánica logrando así contrarrestar la presión osmótica natural<sup>7</sup>, de forma que el agua fluye desde una zona con mayor concentración de sales a una de menor concentración hasta obtener agua pura<sup>8</sup>.

A nivel mundial, las tecnologías para desalinización están lideradas por la ósmosis inversa, con un 59%, seguida de la evaporación con un 27% y destilación con un 9%<sup>9</sup>.

Las aplicaciones y usos del agua obtenida por desalinización se reparten en los siguientes sectores: 68% para municipios y 22% para entidades industriales. El agua desalada también se ha empleado en la industria energética (5%), agricultura (2%) y en la industria turística y militar<sup>10</sup>.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

Determinar un método para abatir la sílice, aumentando la vida útil de la membrana y disminuyendo el caudal de agua utilizado.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Determinar el comportamiento del ácido orto silícico a distintos pHs realizando una curva de pH.
- Determinar el contenido de ácido orto silícico en los ensayo de abatimiento utilizando cal, soda, aluminato de sodio, cloruro de magnesio y floculante aniónico Clarisol 4010.

---

<sup>6</sup> *Ibíd.*

<sup>7</sup> Ósmosis natural: presión ejercida por las partículas del disolvente en una disolución sobre la membrana semipermeable que la separa de otra de mayor concentración.

<sup>8</sup> *Op.cit.* Desalación por Destilador y Ósmosis Inversa.

<sup>9</sup> *Ibíd.*

<sup>10</sup> *Op.cit.* Gabbrielli E.2010. El desarrollo y el estado actual de los procesos El desarrollo y el estado actual de los procesos de desalinización y el rol de la International Desalination Association (IDA).



## II. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Materiales

#### 2.1.1. Equipos e instrumentos

En este estudio se utilizaron los equipos e instrumentos que se detallan a continuación:

- pH metro serie Orion 5 star, Thermo Scientific
- Electrodo combinado de nitrato Orion 9700BNWP, Thermo Scientific
- Espectrofotómetro de absorción molecular DR5000 HACH
- Balanza analítica RADWAG WAS 220/C/2
- Micropipeta Transferpette de 5 mL
- Micropipeta Transferpette de 10 mL
- Estufa de secado regulable a 140°C
- Desecador, provisto con indicador de humedad, en base a color o instrumental.
- Plancha calefactora, regulable entre 80° y 90°C
- Pinzas de puntas redondas
- Sistema de filtración, aparato para filtración por membranas, Crisol Gooch, u otro adecuado al tamaño del filtro.
- Sistema de vacio
- Vasos de precipitado de 1000 mL y 3000 mL
- Envases plásticos de 1000 mL
- Envases plásticos de 125 mL
- Matraz de aforo de 500 y 1000 mL
- Bureta de 25 mL
- Agitador Magnetic stirrer MS-3000 Soviquim
- Tubos de Nessler, de 50 mL forma alta
- Filtro 0,45 um Cellulose nitrate filter Sartorius stadim
- Software Advisor 3.0

### 2.1.2. Reactivos y soluciones

En el desarrollo de este proyecto se utilizaron diversos reactivos y soluciones que se detallan a continuación:

- Agua grado reactivo para análisis
- Ácido bórico Merck p.a
- Ácido clorhídrico fumante 35% Merck p.a
- Ácido nítrico 65% Merck p.a
- Ácido sulfúrico 95% Merck p.a
- Ácido oxálico dihidrato Merck p.a
- Aluminato de sodio Quipasur
- Amonio heptamolibdato tetrahidrato Merck p.a.
- Cal superfina Soprocál 4
- Carbonato de sodio 0,05N Merck p.a
- Clarisol 4010 floculante para procesos Aguasin
- Cloruro de magnesio Merck p.a
- Cloruro de sodio Merck p.a
- Cloruro de bario dihidratado Merck p.a
- Hidróxido de sodio Merck p.a
- Nitrato de plata Merck p.a
- Sulfato de Aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  Merck p.a.
- Sulfato de plata Merck p.a.
- Solución estándar de nitrato 1000 ppm Orión ionplus 920707
- Solución de relleno electrodo de referencia, Orión ionplus 900046
- Solución de calibración estándar de  $\text{N-NO}_3$  en el rango de 2,0 a 10 mg/L
- Solución buffer ISA
- Solución indicadora de rojo de metilo
- Solución de cloruro de bario
- Solución indicadora de cromato de potasio

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Comportamiento de sílice a diferentes pHs

Primero se realizó un estudio del comportamiento de la sílice a distintos pHs, utilizando 20 muestras de agua de 1000 mL del río San Pedro de Inacaliri, modificando el pH de la muestra con HCl 1M y NaOH 1M. Se efectuó un barrido de pH desde 3 hasta 12 con intervalos de 0,5 unidades de pH. Luego con un espectrofotómetro de absorción molecular se midió el contenido de sílice (determinación de la sílice por método molibdosilicato) y por absorción atómica el contenido de silicio (determinación de silicio por método de espectrofotometría de absorción atómica con aspiración directa) en cada muestra. Posteriormente se filtraron las muestras con un filtro de 0,45  $\mu\text{m}$  y se midió nuevamente el contenido de sílice molibdoreactiva y silicio, con el objetivo de determinar la concentración de sílice coloidal, disuelta y total.

### 2.2.2. Ensayo de abatimiento de sílice con cal

En el ensayo con cal se utilizó una solución de cal al 5% y se dosificó a cada muestra para variar el pH desde 9 a pH 12, (se determina este rango de pH ya que la cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) al mezclarse en agua puede hidrolizarse y liberar iones  $\text{OH}^-$  los cuales alcalinizan la muestra), esto agitando la muestra constantemente y midiendo con el pHmetro. Finalmente, al clarificado de cada muestra filtrada se cuantificó el contenido de sílice y silicio.

Después de obtenidos los resultados de concentración de sílice y silicio se eligió un rango de pH en donde se observan las concentraciones más bajas de sílice y se repitió el procedimiento anterior. Al obtener el clarificado se midieron; Fe, Al, Sr, Ba, Na, K, Mn, Ca, Mg,  $\text{PO}_4^{3-}$  (medidos por Lab Aguasin) y Cl,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$ , alcalinidad total y sólidos suspendidos (medidos por mi), para poder realizar una simulación con el software Advisor 3.0.



### 2.2.3. Ensayo de abatimiento de sílice con aluminato de sodio

Para el ensayo con aluminato de sodio se utilizó la dosificación indicada en la literatura (200 mg/L). La muestra original de agua del río San Pedro de Inacaliri tiene un pH de 8,5 por lo que el agua debe ser acidificada con ácido clorhídrico 1M y alcalinizada con hidróxido de sodio 1M. Se hizo un barrido desde pH 3 hasta 12<sup>11</sup>. Luego de adicionar el aluminato de sodio a cada muestra con agitación constante, se agregó floculante Clarisol 4010 y se dejó reposar por 20 minutos. Finalmente al clarificado de estas muestras se les midió sílice por absorción molecular y silicio por absorción atómica además de realizar un filtrado por lo que la muestra se debe medir luego de filtrar.

Después de observar y analizar los resultados de concentración de sílice y silicio se eligió el rango de pH en donde se observaron las concentraciones más bajas de sílice. Al obtener el clarificado se midió; Fe, Al, Sr, Ba, Na, K, Mn, Ca, Mg, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (medidos por Lab Aguasin) y Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, SiO<sub>2</sub>, alcalinidad total y sólidos suspendidos (medidos por mi), con los datos obtenidos se realizó una simulación con el software Advisor 3.0.

### 2.2.4. Ensayo de abatimiento de sílice con cloruro de magnesio

Este ensayo se realizó a diferentes valores de pH (entre 8,5 y 12) y dosificaciones de cloruro de magnesio (70 mg/L, 90 mg/L, 120 mg/L, 150 mg/L y 180 mg/L) como se observa en la tabla 1.

Para la primera prueba en la cual se deben agregar 70 mg/L de cloruro de magnesio se toma una muestra de 1L del río San Pedro de Inacaliri la cual presenta 48 mg/L de magnesio, por lo tanto para que la muestra posea 70 mg/L se realizó la siguiente operación para calcular la dosificación real.

$$70 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 48 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 22 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

---

<sup>11</sup> Este barrido de pH se realizó para poder determinar la efectividad del aluminato de sodio, abatiendo sílice a distintos valores de pH.

Se repitió este mismo procedimiento para conocer la dosis que se debe agregar de cloruro de magnesio a cada muestra.

Luego de agregar la dosis correspondiente se midió el pH y se adicionó soda hasta llegar al pH deseado. Finalmente la muestra se filtró, al clarificado se le midió; Fe, Al, Sr, Ba, Na, K, Mn, Ca, Mg,  $\text{PO}_4^{-3}$  (medidos por Lab Aguasin) y Cl,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SiO}_2$ , alcalinidad total y sólidos suspendidos (medidos por mi), con los datos obtenidos se realizó una simulación con el software Advisor 3.0.

**Tabla 1:** Dosificación de cloruro de magnesio a cada muestra según pH.

pH	Dosificación de cloruro de magnesio (mg/L)				
8,5	70	90	120	150	180
9,0	70	90	120	150	180
10,0	70	90	120	150	180
11,0	70	90	120	150	180
12,0	70	90	120	150	180

#### 2.2.5. Ensayo de abatimiento de sílice con cloruro de magnesio y floculante aniónico Clarisol 4010.

Se realizó el mismo procedimiento del punto 2.2.4 pero antes de filtrar la muestra se le agregó floculante aniónico Clarisol 4010 al 0,1%, se dejó reposar la muestra por 30 min y se filtró.

Finalmente al clarificado se le midió; Fe, Al, Sr, Ba, Na, K, Mn, Ca, Mg,  $\text{PO}_4^{-3}$  (medidos por Lab Aguasin) y Cl,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{SiO}_2$ , alcalinidad total y sólidos suspendidos (medidos por mi), con los datos obtenidos se realizó una simulación con el software Advisor 3.0.

### **2.3. Medición de sílice en agua.**

#### **2.3.1. Medición de sílice por método de absorción molecular<sup>12</sup>**

Para medir el contenido de sílice de cada muestra a distintos valores de pH se tomó una alícuota de 5 mL de muestra y se aforó a 50 mL con agua desmineralizada en un tubo nessler de forma larga. Luego se adicionó 1mL de ácido clorhídrico 1:1 y 2 mL de molibdato de amonio al 10%, se mezcló hasta homogenizar completamente y se dejó reposar por 10 minutos. Finalmente se adicionó 2 mL de ácido oxálico al 10% y se dejó en reposo de 2 a 15 min. El color se leyó a longitud de onda de 410 nm en cubetas de 1,0 cm de paso óptico, entre 2 -15 minutos.

### **2.4. Análisis de muestra de agua del río San Pedro de Inacaliri.**

Además de medir el contenido de sílice en el agua, también se midieron distintos parámetros, como: pH, alcalinidad, cloruros, sulfatos y nitratos. A continuación se detalla la metodología empleada.

#### **2.4.1. Determinación de pH por método electrométrico<sup>13</sup>.**

Este método es aplicable para la determinación de pH. En primera instancia se debe ajustar y calibrar el instrumento con soluciones buffer certificadas, luego enjuagar el electrodo con agua para análisis grado reactivo, secar con un papel suave e introducir el electrodo en la muestra problema, manteniendo agitación constante.

Registrar el valor de pH entregado por el instrumento, cuando se alcance una lectura estable.

#### **2.4.2. Determinación de alcalinidad por método titulación potenciométrica.<sup>14</sup>**

Se registró el pH de la muestra y se tituló potenciométricamente hasta pH 8,3 adicionando solución HCl 0,02 N (previamente estandarizado) para obtener

---

<sup>12</sup> Este método es aplicable para la determinación de sílice según lo establecido en Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA.WEF. 22th edition 2012, Part. 4500-SiO<sub>2</sub>-C: Molibdosilicate Method.

<sup>13</sup> Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA.WEF. 22th edition 2012, Part. 4500-H +-B: Electrometric Method.

<sup>14</sup> Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA.WEF. 22th edition 2012, Part. 2320-B: tritration Method.

alcalinidad P, posteriormente para obtener alcalinidad M seguir titulando hasta pH 4,5

Los resultados se expresan de la siguiente forma:

$$\text{Alcalinidad, como } \frac{\text{CaCO}_3}{L} = \frac{A * N * 50000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

A: mL de HCl (0,02 N) titulante

N: normalidad de HCl (0,02)

### 2.4.3. Determinación de cloruros por método argentométrico.

Se tomaron 10 mL de muestra y se aforó a 100 mL con agua grado reactivo para análisis en un matraz erlenmeyer de 250 mL (la porción titulada debe contener cloruros en el rango de 0,015 a 10 mg de Cl<sup>-</sup>). Verificar el pH de la muestra, el cual debe estar entre 7 a 10 unidades. De lo contrario, ajustar al rango requerido con solución NaOH o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, usando un pHmetro o solución indicadora de fenolftaleína.

Se agregaron 30 gotas de solución indicadora de K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>. Se tituló sobre fondo blanco, con estándar de nitrato de plata hasta punto final amarillo – café. También se realizó en paralelo la medida de un blanco.

Los resultados se expresaron de la siguiente forma:

$$\text{Cl}^- \text{ mg/L} = \frac{(A - B) * N * 35,45 * 1000}{\text{mL de la muestra}}$$

Donde: A mL gastados en titulación de la muestra

B: mL gastados en titulación del blanco

N: normalidad real del titulante AgNO<sub>3</sub>

#### 2.4.4. Determinación de sulfato por método gravimétrico<sup>15</sup>.

En primer lugar se prepararon los filtros, estos se ponen en un vidrio reloj, y se dejaron en la estufa a 103°-105° por una hora. Posteriormente se enfriaron en desecadora y se masaron hasta peso constante. Se eligió 50 mL de muestra y se aforó con agua grado reactivo para análisis hasta 150 mL. Se ajustó el pH de la muestra utilizando anaranjado de metilo y añadiendo unas gotas de HCl (1:1) hasta cambio de color. Se calentó a ebullición sobre plancha calefactora y se agregó solución calentada de cloruro de bario, hasta precipitación completa del sulfato. Se dejó enfriar un mínimo 2 horas.

Se filtró el precipitado de sulfato de bario a temperatura ambiente, utilizando el filtro preparado en la etapa anterior. Se secó el filtro con el precipitado en la estufa a 103° - 105°C. Finamente se enfrió en desecadora y se pesó.

Los resultados se expresaron de la siguiente forma:

$$SO_4^{2-} \text{ mg/L} = \frac{\text{peso residuo} * 411,6 * 1000}{\text{Alicuota (mL)}}$$

#### 2.4.5. Determinación de nitrato por método electrodo específico.<sup>16</sup>

Primero se acondicionó el electrodo de ion selectivo, para lo cual este se deja sumergido en una solución de 100 mg/L de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por una hora. En un vaso precipitado de 50 mL con pipeta volumétrica se adicionó 10 mL de la muestra. Se introdujo el electrodo, se adicionó 10 mL de solución ISA. Se debe agitar inmediatamente con barra magnética a velocidad controlada. Se registraron los valores obtenidos por el instrumento.

---

<sup>15</sup> Determinación de sulfato, según lo establecido en Standard methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA.WEF. 22th edition 2012, Part. 4500-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - D. Gravimetric Method with Drying of Residue.

<sup>16</sup> Determinación de nitrógeno – nitrato, según lo establecido en Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. APHA. AWWA. WEF. 22th edition 2012, part 4500-D: Nitrate selective electrode method.



### III. RESULTADOS

#### 3.1. Parámetros fisicoquímicos del agua del río San Pedro de Inacaliri

Antes de realizar los ensayos se midieron los parámetros fisicoquímicos del agua del río San Pedro de Inacaliri.

A continuación se muestran los valores promedio de dos mediciones que se realizaron en distintos periodos de tiempo, las referencias de cada medición pueden ser observadas en detalle en el ANEXO 1. Estos resultados fueron proporcionados por el LAB-AGUASIN. Para los datos de la DGA, estos fueron sacados de la página de la DGA en el periodo donde se realizó el estudio (01/01/2013-30/04/2014) en el ANEXO 2, se pueden observar con más detalle los datos.

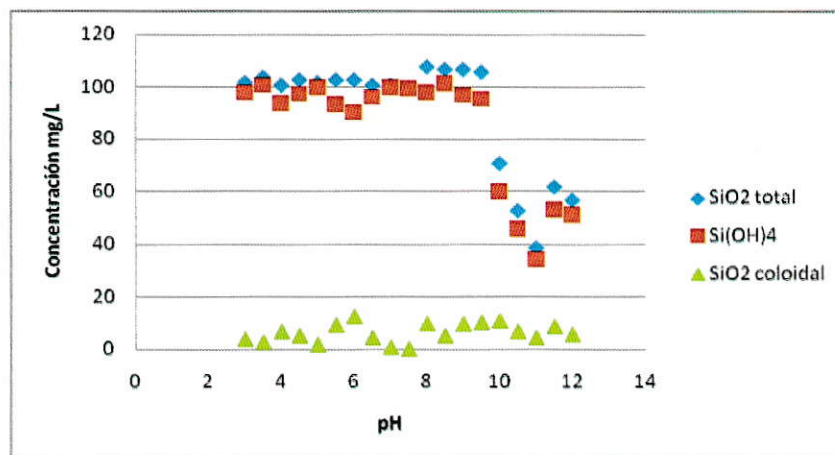
**Tabla 2:** Determinación de parámetros fisicoquímicos del agua del río San Pedro de Inacaliri.

Elemento	Unidades	Resultados	Datos DGA
Alcalinidad total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	324,5	-
Alcalinidad Parcial	mg/L CaCO <sub>3</sub>	11,0	-
Calcio	mg/L	73,9	72
Aluminio	mg/L	<0,1	<0,5
Amonio	mg/L	<0,016	-
Bario	mg/L	<0,03	-
Cloruros	mg/L	242,0	229
Cobre	mg/L	<0,01	<0,02
Conductividad	µs/cm	1356,5	1425
Estroncio	mg/L	0,72	-
Flúor	mg/L	0,62	-
Hierro disuelto	mg/L	0,02	-
Hierro total	mg/L	0,015	0,18
Magnesio	mg/L	48,05	44,2
Manganeso	mg/L	0,013	0,08
Nitratos	mg/L	1,43	0,82
pH (25°C)	Unidades	8,5	6,88
Potasio	mg/L	32,75	19,1
Sílice	mg/L	95,45	-
Sodio	mg/L	188,5	157
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	883,0	-
Sulfatos	mg/L	76,0	101,5

Zinc	mg/L	<0,05	<0,01
Turbiedad	NTU	<0,05	-

### 3.2. Comportamiento de la sílice a distintos valores de pH

El contenido de sílice en el agua del río San Pedro de Inacaliri es de 95 mg/L a un pH de 8,5, por lo tanto se irá variando el pH del agua para ver la disponibilidad de sílice en solución. A continuación, se muestran los valores obtenidos para cada tipo de sílice. Para mayores detalles es posible observar los valores específicos de cada punto en el ANEXO 3



**Figura 10:** Concentración de sílice total, ácido orto silícico y sílice coloidal en agua a distintos pHs.

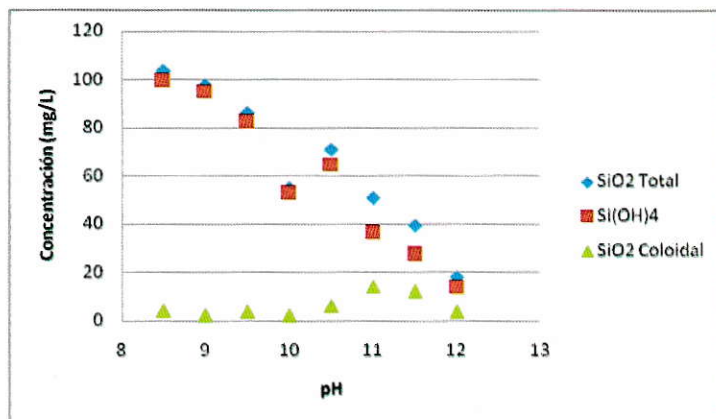
### 3.3 Ensayos de abatimiento

#### 3.3.1 Ensayo abatimiento utilizando cal

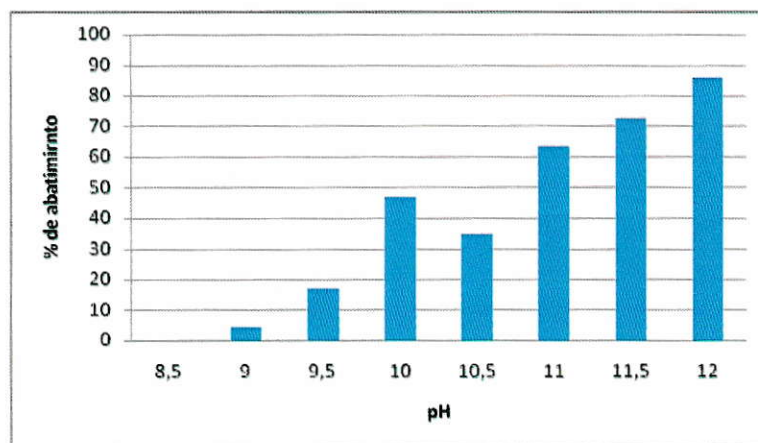
En este ensayo se utilizó cal para variar el pH del agua, pero la cal presenta diversas partículas en su composición (ver ficha técnica en ANEXO 4) por lo que fue necesario adicionar floculante al ensayo, ya que si bien disminuye el contenido de

sílice adicionando cal, el agua tomaba un aspecto turbio, además es necesario disminuir el tiempo de sedimentación de las partículas presentes en el agua.

A continuación se muestran distintos puntos de pH y la concentración de SiO<sub>2</sub> total, coloidal y disuelta presente en cada punto:



**Figura 11:** Distintos puntos de pH medidos y su correspondiente concentración de sílice; coloidal, disuelta como ácido ortosilícico y total.

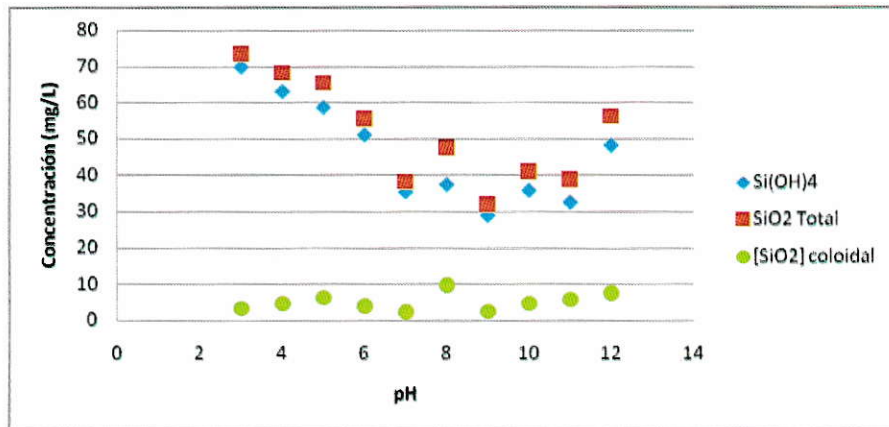


**Figura 12:** Porcentaje de abatimiento de sílice disuelta en cada punto de pH en método de abatimiento con cal.

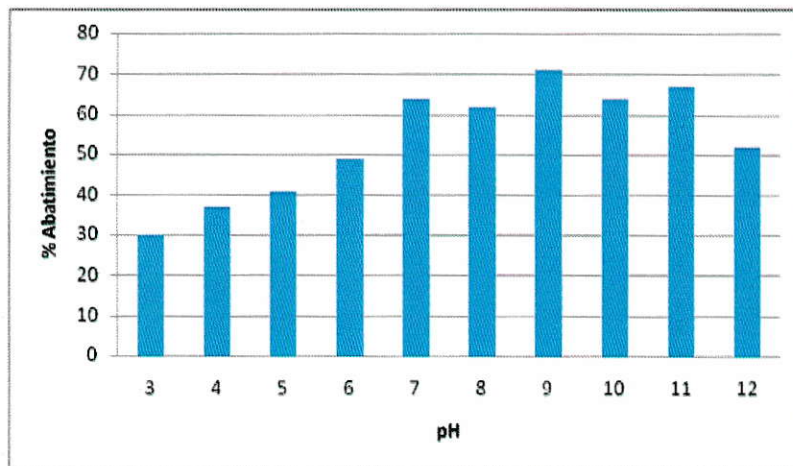
La cantidad de cal utilizada para variar el pH, se detalla en el ANEXO 5.

### 3.3.2 Ensayo abatimiento utilizando aluminato de sodio

En este ensayo se modificó el pH del agua con hidróxido de sodio y ácido clorhídrico, luego se agregó 200 mg/L de aluminato de sodio y finalmente 5 mg/L de floculante aniónico Clarisol 4010, el clarificado fue filtrado y se procedió a medir el contenido de sílice en el agua. A continuación se muestran los valores de sílice obtenidos en cada muestra:



**Figura 13:** Comportamiento de sílice total, coloidal y disuelta (Si(OH)<sub>4</sub>) en distintos puntos de pH para abatimiento con aluminato de sodio.

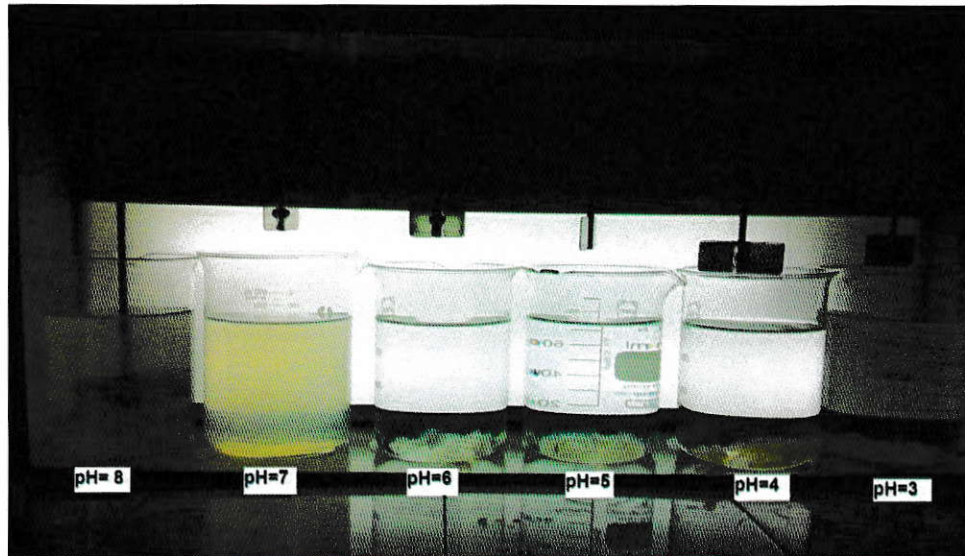


**Figura 14:** Porcentaje de abatimiento de la sílice disuelta en cada punto de pH para ensayo de abatimiento con aluminato de sodio.

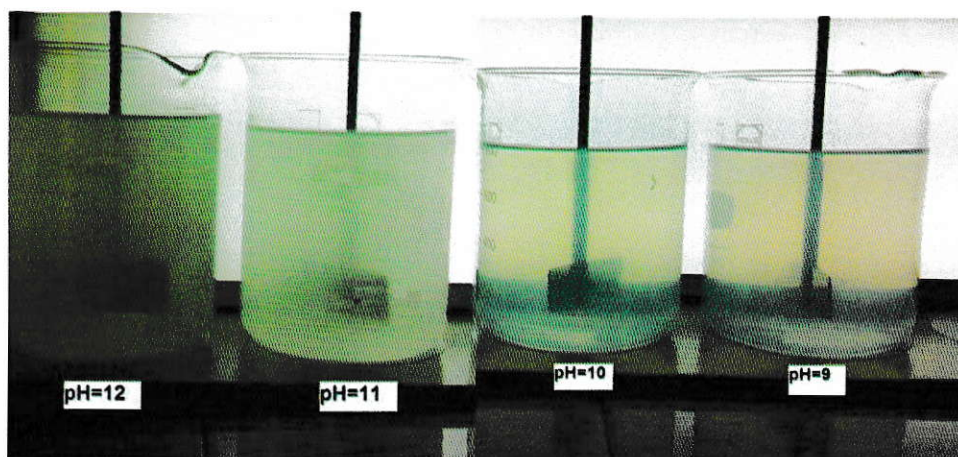
La cantidad de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico adicionados al ensayo se detallan en el ANEXO 5, además se detalla la concentración de sílice presente en el agua para cada punto de pH.

En la siguiente figura se observa el porcentaje de abatimiento de sílice en cada punto de pH.

A continuación se muestran imágenes de cada ensayo.



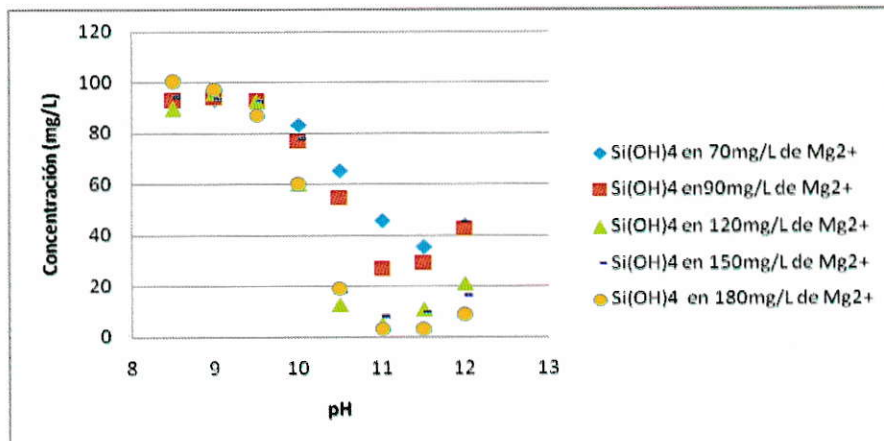
**Figura 15:** Ensayo de abatimiento de sílice utilizando aluminato de sodio, valores de pH entre 3 a 8.



**Figura 16:** Ensayo de abatimiento de sílice utilizando aluminato de sodio, valores de pH 9 a 12

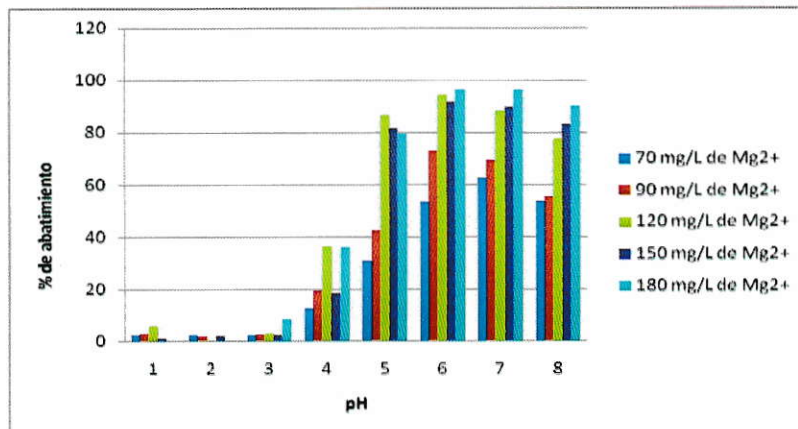
### 3.3.3 Ensayo abatimiento utilizando cloruro de magnesio

En el siguiente gráfico se muestran distintas concentraciones de magnesio en el agua, que van desde los 70 mg/L hasta los 180 mg/L, junto a los distintos puntos de pH, desde 8,5 a 12 unidades de pH y su correspondiente concentración de ácido orto silícico.



**Figura 17:** Silice disuelta ( $\text{Si(OH)}_4$ ) presente en muestras de agua del río San Pedro de Inacaliri con concentraciones variables de  $\text{Mg}^{2+}$  en solución y distintos puntos de pH.

A continuación en la figura 18 se observa el abatimiento de sílice como resultado de variar la concentración de magnesio en solución y pH.



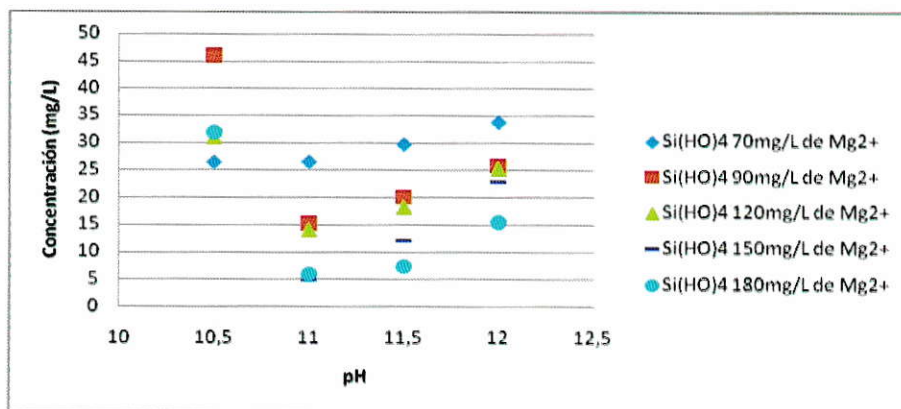
**Figura 18:** Porcentaje de abatimiento de silice disuelta en distintos puntos de pH con concentraciones variables de magnesio en solución.

Las cantidades de  $MgCl_2$  adicionadas al agua para lograr la concentración deseada y la cantidad de  $NaOH$  utilizadas para variar el pH se encuentran detalladas en el ANEXO 8, además de la cantidad de sílice en cada punto de pH.

### 3.3.4 Ensayo abatimiento utilizando cloruro de magnesio y floculante

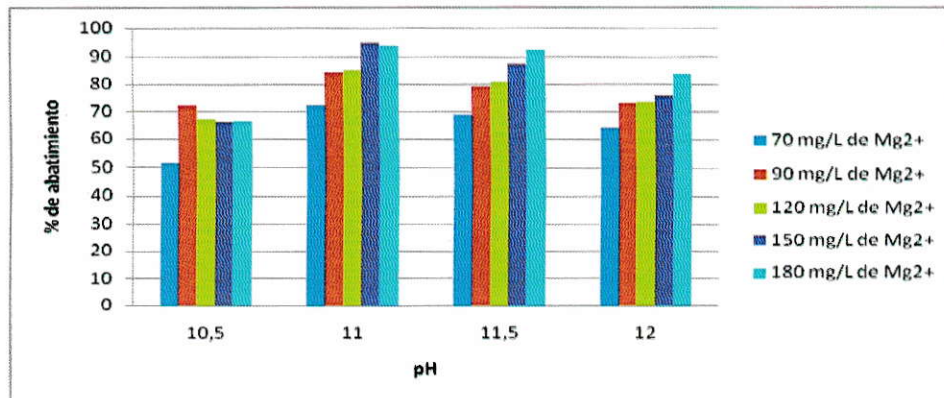
Observando los resultados del ensayo anterior notamos que a pH 10,5 la concentración de sílice en solución disminuye considerablemente. Es por esto que tomamos el rango de pH entre 10,5 -12,0 y realizamos nuevamente el ensayo anteriormente descrito pero adicionando floculante, se deja actuar por 30 minutos y luego se filtra y determina la cantidad de sílice en el agua.

A continuación se muestran la concentración de ácido orto silícico según punto de pH y concentración de magnesio en el agua.



**Figura 19:** Concentración de ácido orto silícico en muestras de agua con distintas concentraciones de magnesio y puntos de pH para ensayo de abatimiento utilizando cloruro de magnesio y floculante.

La concentración de sílice en cada punto de pH se muestra con detalle en el ANEXO 9.



**Figura 20:** Porcentaje de abatimiento de sílice disuelta en distintos puntos de pH con concentraciones variables de magnesio en solución. Ensayo de abatimiento utilizando cloruro de magnesio y floculante.

### 3.4 Evaluación de costos para cada ensayo

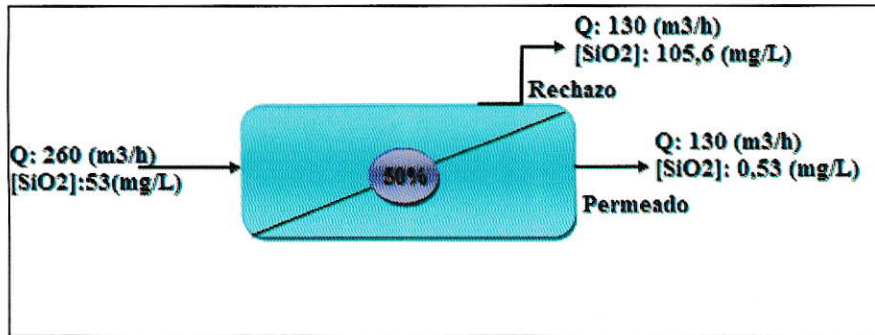
#### 3.4.1. Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice utilizando cal:

En el ensayo de abatimiento utilizando cal el punto más óptimo analizando los gráficos 11 y 12 es a pH 10 donde tenemos un abatimiento del 47% con una concentración de sílice en agua de 52,8 mg/L. Se elige este punto ya que hay una disminución de casi el 50% de sílice disuelta y también porque se realizará una variación menor de pH (variación de pH de 8,5 a 10).

Para lograr que el pH aumente a 10 se utilizaron 781mg/L de cal, considerando el caudal de agua, que es de 260 m<sup>3</sup>/h al mes sería necesario utilizar 146 toneladas de cal.

Como la planta de osmosis reversa actualmente opera al 50% de su capacidad, esto a causa del contenido de sílice en agua que es cercano a los 100mg/L y el caudal es de 260 m<sup>3</sup>/h, se obtendrán 130 m<sup>3</sup>/h de permeado con una concentración de 0,53 mg/L de sílice, agua apta para la utilización de procesos mineros. En la siguiente figura se observa el proceso que ocurre al utilizar el agua tratada con cal, con una concentración de sílice de 53 mg/L.

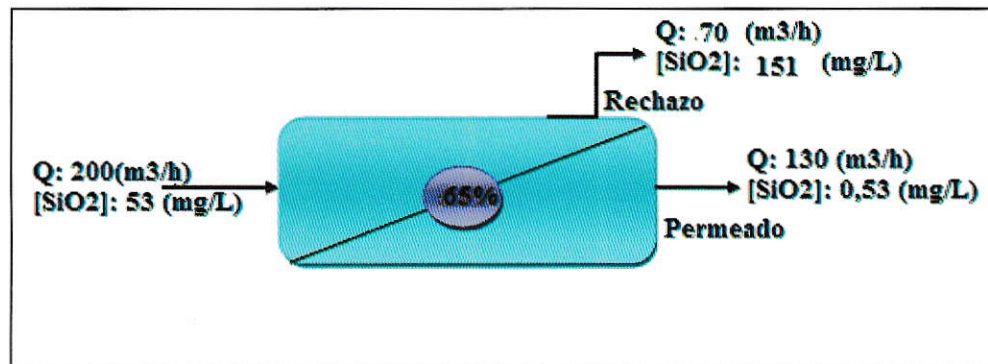




**Figura 21:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con Cal y capacidad de trabajo al 50%.

Como el contenido de sílice disminuye casi a la mitad de la concentración inicial del agua del río San Pedro de Inacaliri podemos optimizar la capacidad de trabajo de la ósmosis inversa al 65% y disminuir el caudal de entrada a  $200 \text{ m}^3\text{/h}$ , ya que se necesitan  $130 \text{ m}^3\text{/h}$  de agua permeada, libre de sales. Este proceso se muestra en la figura 22.

Disminuyendo el caudal de entrada a  $200 \text{ m}^3\text{/h}$  al mes será necesario utilizar 112 toneladas de cal.



**Figura 22:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con Cal y capacidad de trabajo al 65%.

Finalmente el valor de la tonelada de cal es de \$92.500 pesos, según proveedor SOPROCAL. El costo mensual en cal de este pre-tratamiento de agua sería de \$10.360.000 pesos.

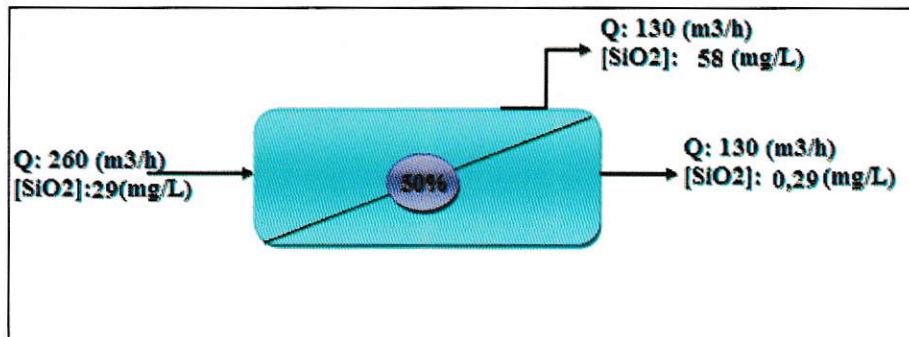
### 3.4.2 Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice con aluminato de sodio:

Al analizar los gráficos de las figuras 13 y 14 el punto óptimo para realizar este ensayo es a pH 9, donde la concentración de sílice en agua es de 29 mg/L y el porcentaje de abatimiento es de 71%..

El pH inicial del agua del río San Pedro de Inacaliri es 8,5 para lograr que aumente a 9 se utilizaron 32 mg/L de NaOH. Considerando el caudal de agua, que es de 260 m<sup>3</sup>/h al mes sería necesario utilizar 5.990 kg de NaOH, 37.440 kg de NaAlO<sub>2</sub> y 936 kg de Clarisol 4010.

Como la planta de osmosis opera al 50% de su capacidad y el caudal es de 260 m<sup>3</sup>/h, se obtendrán 130 m<sup>3</sup>/h de permeado con una concentración de 0,29 mg/L de sílice, agua que puede ser utilizada en los procesos mineros.

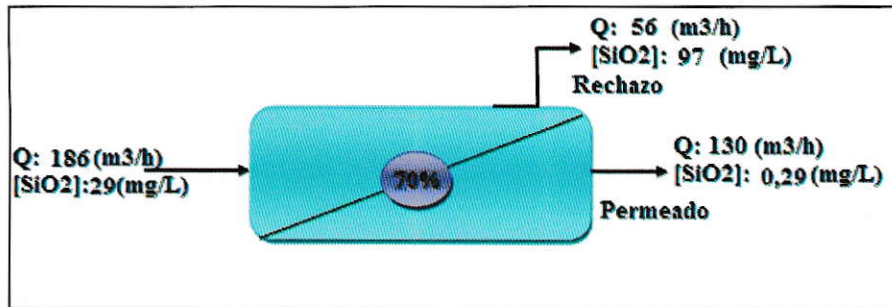
En la figura 24 se observa el diagrama de trabajo de la planta de ósmosis inversa operando al 50% de su capacidad y con caudal de entrada tratado con aluminato de sodio.



**Figura 23:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con aluminato de sodio y capacidad de trabajo de 50%.

Al optimizar la capacidad de trabajo de la ósmosis inversa por la baja cantidad de sílice en agua esta podría llegar a un 70%, disminuyendo además el

caudal de entrada a 186 m<sup>3</sup>/h. Con este nuevo caudal será necesario utilizar: 4.285 kg de NaOH, 26.784 kg de NaAlO<sub>2</sub> y 670 kg de Clarisol 4010. Con un gasto total de \$27.770.233 pesos mensuales.



**Figura 24:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con aluminato de sodio y capacidad de trabajo al 70%.

### 3.4.3 Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice utilizando cloruro de magnesio

En este ensayo se utilizaron concentraciones de magnesio en agua que van desde 70 mg/L a 180 mg/L. Para hacer el análisis se tomaron las 3 concentraciones más bajas de magnesio en agua; 70 mg/L, 90 mg/L y 120 mg/L ya que cumplen con disminuir el contenido de sílice en agua casi al 50%. Las otras concentraciones (150 mg/L y 180 mg/L) si bien disminuían la concentración de sílice en agua a niveles mínimos la cantidad de magnesio que se debe ocupar es demasiada.

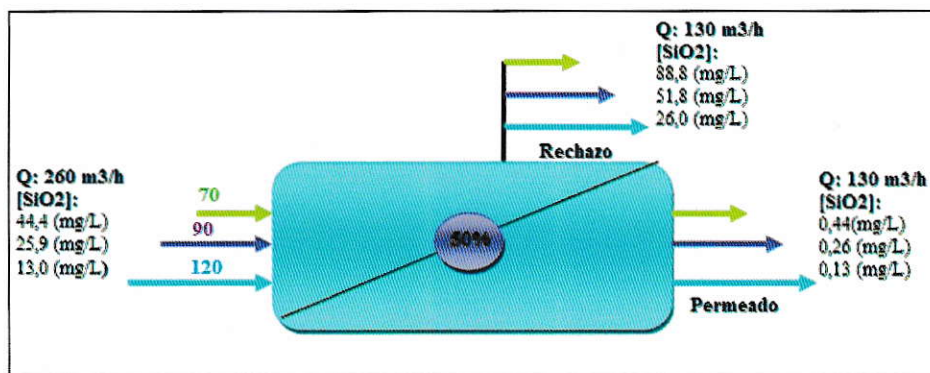
También se seleccionó el punto de pH donde la sílice era menor a 50 mg/L, ya que en ese rango de concentración, el agua es apta para pasar por la membrana de la ósmosis y no formará incrustaciones rápidamente. Se descartó el punto de pH 12 ya que se ve un leve incremento del contenido de sílice y además es necesario utilizar gran cantidad de NaOH para elevar el pH hasta este punto.

A continuación se muestran los puntos de pH elegidos con su respectivo contenido de sílice disuelto:

**Tabla 3:** Concentraciones de magnesio en solución, puntos de pH y ácido orto silícico en ensayo de abatimiento utilizando cloruro de magnesio.

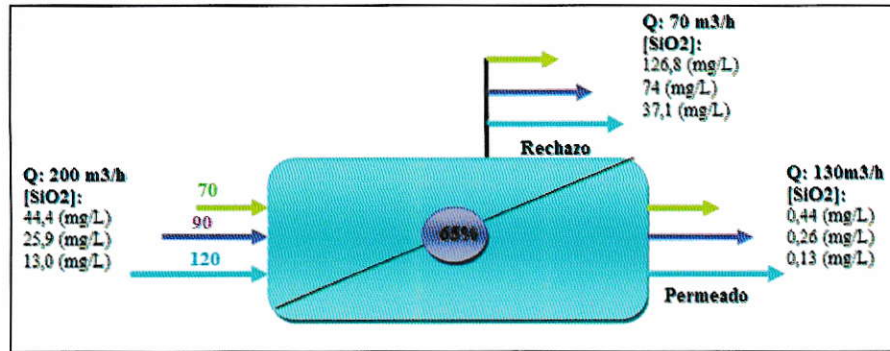
Mg <sup>2+</sup> en solución (mg/L)	pH	MgCl <sub>2</sub> adicionado (mg/L)	Si(OH) <sub>4</sub> (mg/L)
70	11,0	186,08	44,4
90	11,0	355,25	25,9
120	10,5	609,0	13,0

A continuación se muestra el sistema de ósmosis trabajando a una capacidad del 50% y con un flujo de entrada de 260 m<sup>3</sup>/h, tal cual lo hace en la actualidad. Se muestra además como sería el agua de rechazo y permeado de cada ensayo:



**Figura 25:** Diagrama de trabajo de un sistema de ósmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y capacidad de trabajo de 50%.

Al optimizar el trabajo del sistema de ósmosis al 65% el caudal de entrada puede disminuir a 200 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 26:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y capacidad de trabajo de 65%.

A continuación se muestran los gastos de químicos utilizados para cada ensayo, en este caso se utiliza NaOH, para variar pH y MgCl<sub>2</sub>:

**Tabla 4:** Cantidad de productos químicos utilizados mensualmente con su respectivo valor.

Ensayo	pH	NaOH (kg/mes)	MgCl <sub>2</sub> (Kg/mes)	Costo mensual (\$/mes)
70	11,0	46.080	26.798	20.807.928
90	11,0	46.080	51.163	27.995.544
120	10,5	28.800	87.696	33.934.320

### 3.4.4 Evaluación de costos de reactivos para abatimiento de sílice utilizando Cloruro de magnesio y Clarisol 40120

Se realizó lo mismo del ensayo anterior pero antes de medir la concentración de sílice según contenido de magnesio y pH, se adicionó floculante aniónico (5mg/L), se dejó actuar por 30 min, se filtró la muestra y se midió concentración de sílice disuelto.

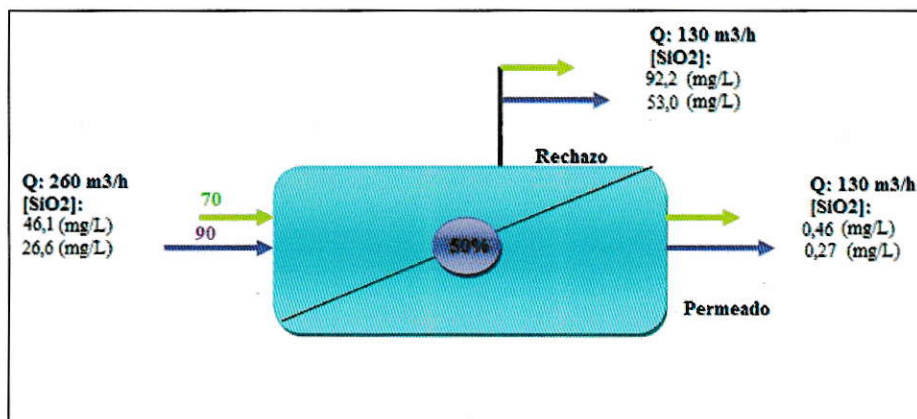
En el ANEXO 9 podemos ver los resultados de este ensayo. Para la evaluación económica se eligieron 2 puntos donde la concentración de sílice disuelta no superase los 50 mg/L, además de un gasto menor de MgCl<sub>2</sub>.

En este ensayo se eligieron las concentraciones más bajas de magnesio y sílice disuelta en el agua, en distintos puntos de pH, en la siguiente tabla se muestran los ensayos elegidos:

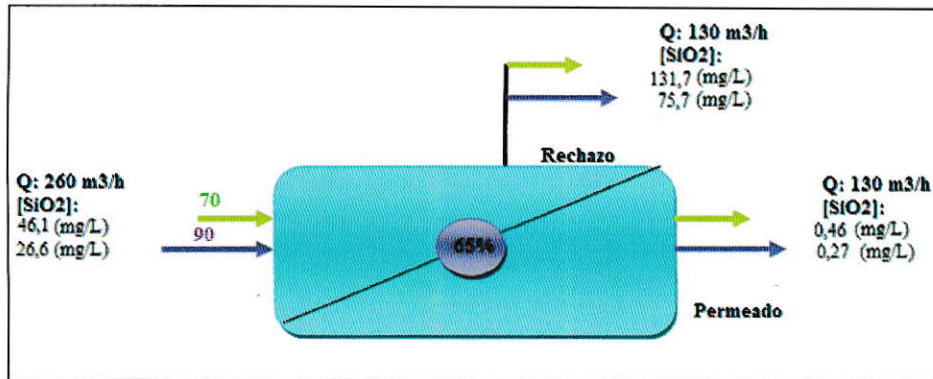
**Tabla 5:** Puntos de pH, concentración de magnesio y ácido orto silícico para ensayo utilizando  $MgCl_2$  y Clarisol 4010 en el abatimiento de la sílice.

pH	$Mg^{2+}$ en solución (mg/L)	$MgCl_2$ adicionado (mg/L)	$[Si(OH)_4]$ (mg/L)
11,0	70	186,08	46,1
10,5	90	355,25	26,6

En la siguiente imagen se muestra la planta de ósmosis trabajando al 50% de su capacidad, para los ensayos de 70 mg/L y 90 mg/L de magnesio en solución. En la figura 28 se observa la ósmosis trabajando al 65% con los mismos ensayos.



**Figura 27:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y floculante aniónico Clarisol a una capacidad de trabajo de 50%.



**Figura 28:** Diagrama de trabajo de un sistema de osmosis inversa, con caudal de entrada ya tratado con cloruro de magnesio y floculante anionico Clarisol y capacidad de trabajo de 65%.

A continuación se muestra el listado de productos químicos utilizados, según ensayo realizado, estos productos fueron: cloruro de magnesio, hidróxido de sodio para variar el pH y clarisol 4010.

**Tabla 6:** Cantidad de productos químicos utilizados mensualmente con su respectivo valor.

Ensayo	pH	NaOH (kg/mes)	MgCl <sub>2</sub> (Kg/mes)	C4010 (Kg/mes)	Costo mensual (\$/mes)
70	11,0	46.080	26.798	720	21.990.612
90	10,5	28.800	51.163	720	24.315.522

#### IV. DISCUSIÓN

El análisis de agua del río San Pedro de Inacaliri, permite conocer las características fisicoquímicas del agua, alcalinidad, pH, conductividad, etc.

El agua del río San Pedro de Inacaliri, presenta una alcalinidad total de 324,5 mg/L CaCO<sub>3</sub>, la que se clasifica como alta. El pH del agua es de 8,5 correspondiente a un pH normal para aguas naturales ya que estas tienen una variación entre 6,2 y 8,5. La conductividad del agua es de 1356,5 µs/cm, lo que se clasifica como agua con alto contenido salino, para ser agua de efluente natural. Es común encontrar ríos en la zona norte con una alta conductividad eléctrica pues las condiciones de aridez o semi-aridez de una porción significativa del territorio aumenta los niveles de salinidad de las aguas naturales (Sánchez A. 2005).

Los aniones presentes en el agua en mayores concentraciones son los sulfatos (76 mg/L) y cloruros (242 mg/L). Los cationes son; sodio (188,5 mg/L) que por la alta solubilidad de sus sales es el catión más frecuente, después calcio (73,9 mg/L), magnesio (48,05 mg/L) y potasio 32,75 (mg/L). La precipitación de sales en las membranas se produce cuando su concentración en el agua de rechazo supera el producto de solubilidad. Las sales que normalmente pueden crear problemas de precipitaciones son los sulfatos de calcio, bario y estroncio, el carbonato de calcio, el fluoruro de calcio y la sílice (Ministerio de Salud y Política Social. 2009).

En el caso del río San Pedro de Inacaliri hay alto contenido de cloruros, sulfatos y calcio por lo que podrían contribuir, además de la sílice, a la formación de incrustaciones en la membrana de ósmosis inversa.

En el ensayo de abatimiento utilizando cal, hay dos grandes ventajas: reducción de la sílice y el ablandamiento del agua. También la utilización de cal aumenta el pH del agua sin la necesidad de utilizar otro producto químico.

Al ir aumentando la dosis de cal, hay una disminución en el contenido de sílice, a pH 10 ocurre una baja del 47% del ácido orto silícico que se encontraba inicialmente en el agua. Esta disminución ocurre por la precipitación de hidróxido de



magnesio, pero el agua toma un aspecto turbio por que se recomienda realizar un estudio sobre el tiempo de precipitación y el residuo que genera utilizar cal.

El ensayo utilizando aluminato de sodio que es una combinación de óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  alúmina). La alúmina es un excelente adsorbente de sílice disuelto. La formación de alúmina en presencia de sílice disuelta conduce a la hidrólisis, la formación de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  precipitado y  $\text{SiO}_4$  adsorbido por el precipitado (Al-Mutaz 2002).

En la adición de aluminato de sodio al agua se produce  $\text{OH}^-$  que promueve la precipitación de hidróxido de magnesio y por lo tanto un acrecentamiento en la reducción de ácido orto silícico. El aluminato de sodio también elimina durezas.

A pH 9 hay un abatimiento de sílice disuelto de un 70%, en comparación con el ensayo que utiliza cal, abate mucho más pero a la vez es necesario utilizar NaOH para variar el pH. Por otro lado agregar aluminio al agua puede generar ensuciamiento de la membrana o quedar fácilmente disponible en el agua.

En los ensayos donde se aumentó el contenido de magnesio en el agua se observa que a medida que aumenta el contenido de magnesio disminuye la concentración de ácido orto silícico en el agua, esto ocurre por la presencia de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  que lo adsorbe.

En el último ensayo donde se aumenta la concentración de magnesio en el agua y además se aplica floculante, la concentración de la sílice disminuye aún más y el precipitado que se forma decanta en un menor tiempo, pero al utilizar floculante se incrementan más los gastos.

El impacto ambiental más significativo ocasionado por la utilización de pre-tratamiento de aguas sería la eliminación de residuos provocados por el pre-tratamiento elegido, por ejemplo, en el caso de la utilización de cal se formarían sedimentos ya que la cal viene en su composición con otros compuestos además de  $\text{CaO}$ , para la utilización de aluminato que posee aluminio este quedaría en el agua de rechazo.

También se debe considerar el suministro eléctrico durante el proceso de OI, esto depende de la tecnología de la planta generadora eléctrica ya que si es térmica y

se alimentara con carbón, emitiría una importante carga de gases, por lo que es de suma importancia el empleo de energía renovable para suministrar la energía.

## V. CONCLUSIONES

- El agua del río San Pedro de Inacaliri es un agua con alto contenido de sales y una elevada conductividad eléctrica, esto se refleja en la cantidad de cationes y aniones disueltos en el agua. Esto se debe principalmente a la disolución y lixiviación de la gran cantidad de sales minerales y metales presentes en el suelo, la litología y volcanismo de la cuenca. Los cationes y aniones encontrados en el agua del río San Pedro de Inacaliri podrían contribuir a las incrustaciones de la membrana, además de la sílice, para comprobar esto es necesario realizar una autopsia de membrana.
- El pH óptimo para la absorción de sílice con  $Mg(OH)_2$  está entre 10 y 11 que coincide adecuadamente con las condiciones creadas durante el tratamiento con cal. A pH 10 hay una disminución de 43% de sílice disuelta.
- El ensayo con aluminato de sodio es el que mayor cantidad de sílice abate, cercano al 70%, esto ocurre por la formación de precipitados de alúmina e hidróxido de magnesio que adsorben la sílice disuelta. Lo negativo de este ensayo es que se deben utilizar dos productos químicos para el pre-tratamiento encareciendo más el proceso.
- No se observa una gran disminución en el contenido de sílice disuelto en el ensayo donde se aumenta la concentración de magnesio en el agua con y sin floculante. La misión del floculante en este caso es disminuir el tiempo de aglutinación y posterior decantación de las partículas de sílice.
- Aumentar la cantidad de magnesio en el agua funciona al momento de abatir sílice, pero al utilizar cloruro de magnesio aumenta la concentración de cloruros en el agua, esto podría afectar el funcionamiento de la membrana de ósmosis.

- La limitación de los procesos de precipitación química en el agua es la toxicidad del producto que se utiliza para abatir sílice, ya que en parte este producto podría quedar en forma soluble en el agua constituyendo riesgo de intoxicación o contaminación. En el ensayo donde se utiliza aluminato de sodio, se debe monitorear el contenido de aluminio disponible en el agua.
- En comparación todos los ensayos logran abatir sílice, pero el ensayo con cal, es el más sencillo, económico y logra un abatimiento de sílice disuelta cercano al 50%, pero se debe definir un tratamiento para los residuos que genera este ensayo.
- Se recomienda realizar un estudio de la cinética de reacción y precipitación en cada ensayo, esto con el fin de optimizar los métodos ya que podría disminuir aún más el contenido de sílice disuelto considerando el tiempo de reacción.
- Se recomienda realizar un estudio del agua de rechazo en cada método, y ver la posibilidad de reutilizarla mediante algún tratamiento ya que contiene un alto contenido de sales. Disminuir las sales y confirmar si podría ser apta para utilizarla como agua de riego según especificaciones NCh 1333.

## VI. REFERENCIAS

- Al-Mutaz I. & Al-Anezi I. 2002. Silica reduction in reverse osmosis desalting plants. King Saud University. The 6<sup>th</sup> Saudi Engineering Conference. Pp 3-13. Arabia Saudita.
- Al-Mutaz I. & Al-Anezi I. 2004. Silica removal during softening in water treatment plant. King Saud University. Department of Chemical Engineering. Pp 1-7. Arabia Saudita.
- Avendaño, A. 2008. Influencia del pH en la adsorción de surfactantes catiónicos sobre diversas superficies rocosas. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Pp 21- 30. España.
- González P. 2012. Desalación mediante Ósmosis Inversa. Ingeniería Constructiva. Ingeagua tecnología publications. pp 8-12. España.
- Koo T, Lee J. & Sheikholeslami R. 2001. Silica fouling and cleaning of reverse osmosis membranes. El Sevier. Pp 43-56. Australia
- Melgar, C. y Torres, K. 2008. Validación del método del molibdosilicato para la determinación de sílice en agua potable en el laboratorio central de la administración nacional de acueductos y alcantarillados, ANDA. En Universidad del Salvador, Facultad de química y farmacia, pp 24 – 28. El Salvador.
- Ministerio de Sanidad y Política Social. Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano, Gobierno de España. Pp 33. España.
- Moreno, J. 2000. Análisis de óxido de silicio y estructura multicapa para aplicaciones microelectrónicas. Departamento de electrónica, Facultad de física, Universidad de Barcelona. Pp 15-24. España.
- OCDE/CEPAL.2005. Evaluación de desempeño ambiental Chile. Pp 78.
- Rayner-Canham, G. 2000. Química inorgánica descriptiva, 2da. Edición. En Pearson educación, pp 276-278. México.
- SAG. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Cuenca del Río Loa. Gobierno de Chile, Ministerio de obras públicas, Dirección general de aguas. Pp 39-64. Chile.
- Sanchez A. et al. 2005. Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego. Informe final. Gobierno de Chile, Servicio Agrícola y ganadero SAG. 8-20. Chile.
- Sheikholeslami R. & Bright J. 2002. Silica and metals removal by pretreatment to prevent fouling of reverse osmosis membranes. El Sevier. Pp 255-257. Australia.

- Sheikholeslami R. & Tan S. 1999. Effects of water quality on silica fouling of desalination plants. *El Sevier*. Pp 276-280. Australia.
- Tarquin A. 2008. Cost-Effective volume reduction of silica-saturated RO concentrate. *Reclamation managing water in the west*. pp 3- 26. Estados Unidos.
- Vivanco E. 2015. *Desalinización: Tecnologías, usos e impacto medio ambiental*. Biblioteca del congreso nacional. Pp 2-10. Chile

## VII. ANEXOS

### ANEXO 1

Informes de resultados de las mediciones fisicoquímicas realizadas en el LAB-

AGUASIN a las muestras de agua del río San Pedro de Inacaliri.

### Informe de Resultados de Ensayo



Solicitante : **Ministro Hales**  
 Atención : **Tamara Fernández**  
 Dirección : **No Indica**  
 N° de análisis : **AQ-4153**

#### 1. Identificación de la Muestra

Fecha de recepción : **19-11-2013 / 16:00**  
 Fecha y hora de muestreo : **13-11-2013 / 12:00**  
 Matriz : **Agua Cruda**  
 Tipo de muestreo : **Puntual**  
 Punto de muestreo : **Río San Pedro**  
 Muestreo realizado por : **AQ-4153**

#### 2. Resultados

Elemento	Unidades	Resultados	Fecha y hora de análisis	Método
Alcalinidad M	mg/L CaCO <sub>3</sub>	334	19-11-13 / 16:30	2320B St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
Alcalinidad P	mg/L CaCO <sub>3</sub>	12	19-11-13 / 16:30	2320B St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
Calcio	mg/L	76,9	04-12-13 / 13:40	3111 D St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Aluminio	mg/L	<0,1	04-12-13 / 15:02	3111 D St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Amonio	mg/L	<0,016	25-11-13 / 16:00	4600-NH <sub>3</sub> D St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
Bario	mg/L	<0,03	04-12-13 / 16:20	3111D St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Cloruros	mg/L	261	29-11-13 / 16:00	4600Cl-B St Mt 21 <sup>ed</sup> 2005
Cobre	mg/L	<0,01	03-12-13 / 11:24	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Conductividad	µs/cm	1362	19-11-13 / 16:00	2510B St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
Estroncio	mg/L	0,79	04-12-13 / 15:38	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Flúor	mg/L	0,6	29-11-13 / 16:30	4600-F C St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
Hierro Disuelto	mg/L	0,02	03-12-13 / 13:25	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Hierro Total	mg/L	0,02	03-12-13 / 13:25	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Magnesio	mg/L	50,7	04-12-13 / 10:22	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Manganeso	mg/L	0,013	03-12-13 / 14:11	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Nitratos	mg/L	<0,95	19-11-13 / 16:30	4600-NO <sub>3</sub> D St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
pH (25°C)	Unidades	8,5	19-11-13 / 16:30	4600-H C St Mt 21 <sup>ed</sup> ,2005
Potasio	mg/L	32,7	03-12-13 / 16:32	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Silicio	mg/L	93,3	30-11-13 / 14:00	4600SiO <sub>2</sub> -C St Mt 21 <sup>ed</sup> 2005
Sodio	mg/L	193	04-12-13 / 08:46	3111B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	930	20-11-13 / 11:00	2540C St Mt 21 <sup>ed</sup> 2005
Sulfatos	mg/L	70	29-11-13 / 10:00	4600SO <sub>4</sub> D St Mt 21 <sup>ed</sup> 2005
Zinc	mg/L	<0,05	03-12-13 / 14:59	3111 B St Mt 21 <sup>ed</sup> , 2005
Turbiedad	NTU	<0,05	19-11-13 / 16:30	2130B St Mt 21 <sup>ed</sup> 2005

# Informe de Resultados de Ensayo



Solicitante : Mnistro Hales  
 Atención : Tamara Fernandez  
 Dirección : Río San Pedro  
 N° de análisis : AQ-4331

## 1. Identificación de la Muestra

Fecha de recepción : 07-01-2014 / 12:00  
 Fecha y hora de muestreo : 07-01-2014 / 10:00  
 Matriz : Agua Cruda  
 Tipo de muestreo : Puntual  
 Punto de muestreo : Río San Pedro  
 Muestreo realizado por : Cliente

## 2. Resultados

Elemento	Unidades	Resultados	Fecha y hora de análisis	Método
Alcalinidad P	mg/L CaCO3	315	08-01-14 / 09:00	2320B St Mt21ed,2005
Alcalinidad M	mg/L CaCO3	10	08-01-14 / 09:00	2320B St Mt21ed,2005
Aluminio	mg/L	<0,1	10-01-14 / 15:05	3111D St Mt21*ed,2005
Amoníaco	mg/L	<0,016	13-01-14 / 15:00	4500-NH3 D St Mt21ed,2005
Bario	mg/L	<0,03	17-01-14 / 15:29	3111B St Mt21*ed,2005
Calcio	mg/L	70,9	14-01-14 / 14:37	3111B St Mt21*ed,2005
Cloruro	mg/L	223	13-01-14 / 15:30	4500-Cl St Mt21*ed,2005
Cobre	mg/L	<0,01	13-01-14 / 10:45	3111B St Mt21*ed,2005
Conductividad	µS/cm	1331	09-01-14 / 14:30	2510B St Mt21ed,2005
Cromo	mg/L	0,68	17-01-14 / 15:47	3111B St Mt21*ed,2005
Fluoruro	mg/L	0,64	10-01-14 / 11:30	4500-F C St Mt21ed,2005
Hierro	mg/L	0,01	10-01-14 / 10:17	3111B St Mt21*ed,2005
Hierro Disuelto	mg/L	<0,01	10-01-14 / 10:17	3111B St Mt21*ed,2005
Magnesio	mg/L	45,4	14-01-14 / 12:16	3111B St Mt21*ed,2005
Manganeso	mg/L	<0,005	10-01-14 / 10:43	3111B St Mt21*ed,2005
Nitrato	mg/L	1,9	09-01-14 / 13:00	4500-NO3 D St Mt21ed,2005
pH (25°C)	Unidades	8,5	08-01-14 / 09:00	4500-H C St Mt21ed,2005
Potasio	mg/L	32,8	10-01-14 / 11:56	3111B St Mt21*ed,2005
Silice	mg/L	97,6	13-01-14 / 10:30	4500Si2-C St Mt21*ed,2005
Sodio	mg/L	184	14-01-14 / 09:17	3111B St Mt21*ed,2005
Sólidos Totales disueltos	mg/L	836	13-01-14 / 11:00	2540C St Mt21*ed,2005
Sulfato	mg/L	82	09-01-14 / 10:00	4500SO4-D St Mt21*ed,2005
Turbiedad	NTU	<0,05	09-01-14 / 11:30	2130B St Mt21*ed,2005
Zinc	mg/L	<0,05	10-01-14 / 11:08	3111B St Mt21*ed,2005



## ANEXO 2

**GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

Periodo: 01/01/2013-30/04/2014

### Valores individuales microbiológicos

Primavera Verano Otoño Invierno

Estación:	RIO SAN PEDRO EN PARSHALL N° 1	Latitud S:	21° 57' 59"
Código BNA:	02103001-5	Longitud W:	68° 21' 58"
Altitud:	3700 msnm	SubCuenca:	Río Loa Alto (bajo junta Río Salado)
Cuenca:	RIO LOA		

Para el periodo 01/01/2013-30/04/2014 existen 3 mediciones:

- Medición 1 fecha : 12-06-2013, hora:12:30
- Medición 2: Fecha: 29-10-2013, hora: 11:37
- Medición 3: fecha: 19-02-2014, hora: 11:00

Medición	Aluminio Total (mg/L Al)	Arsénico Total (mg/l As)	Boro (mg/l B)	Cloruro (mg/l Cl)
	Espectrofotometría de absorción atómica	Manchas de bromuro de mercurio	Curcumin – Colorimetría	Potenciométrico - Argentométrico – Titulación
<b>1</b>	0,5<	0,641	3	240,6
<b>2</b>		0,542	3	220,5
<b>3</b>		0,565	3	224,6

Medición	Cadmio Total (mg/l Cd)	Calcio Total (mg/l Ca)	Cobalto Total (mg/l)	Cobre Total (mg/l Cu)
	Espectrofotometría de absorción atómica	Espectrofotometría de absorción atómica		Espectrofotometría de absorción atómica
<b>1</b>	0,01<	75	0,01<	0,02<
<b>2</b>		70	0,01<	0,02<
<b>3</b>		70,9	0,01<	0,02<

Medición	Conductividad Específica (S/cm)	Cromo Total ICP-OES (mg/l Cr)	Demanda Química de Oxígeno (mg/l O <sub>2</sub> )	Hierro Total (mg/l Fe)	Magnesio Total (mg/l Mg)
	Conductivímetro	Colorimetría	Reflujo Dicromato de Potasio – Colorimetría	Espectrofotometría de absorción atómica	Espectrofotometría de absorción atómica
1	1541		5	0,39	47,1
2	1402	0,009<	3	0,08	45,2
3	1331	0,009<	3,9	0,07	40,3

Medición	Manganeso Total (mg/l Mn)	Mercurio Total (mg/l Hg)	Molibdeno Total (mg/l Mo)	Níquel Total ICP-OES (mg/l )	Nitrógeno de Nitrito y Nitrato (mg/l)
	Colorimetría – Persulfato	Espectrofotometría de absorción atómica	Espectrofotometría de absorción atómica		
1	0,15		0,05<		0,82
2	0,08	0,002<		0,02<	
3	0,02<	0,002<		0,02<	

Medición	Níquel Total (mg/l Ni)	Oxígeno Disuelto (mg/l O <sub>2</sub> )	Ph (unid. Ph)	Plata Total (mg/l Ag)	Plomo Total (mg/l Pb)
	Espectrofotometría de absorción atómica	Yodométrico (Azida) – Titulación	Potenciométrico	Espectrofotometría de absorción atómica	Espectrofotometría de absorción atómica
1	0,05<	9,25	7,29	0,01<	0,07<
2		9,28	7,32	0,01<	
3		4,9	6,04	0,01<	

Medición	Plomo Total ICP-OES (mg/l)	Potasio Total (mg/l K)	Selenio disuelto (mg/l Se)	Sodio Total (mg/l Na)	Sulfato (mg/l)
		Espectrofotometría de absorción atómica	Diaminobencidina	Espectrofotometría de absorción atómica	Turbidímetro
1		18,1	0,001<	155,5	103,7
2	0,06<	21	0,001<	166	99,4
3	0,06<	18,1	0,001<	150,9	101,4

Medición	Temperatura °C	Zinc Total (mg/l Zn)
	Termómetro	Espectrofotometría de absorción atómica
1	21,92	0,01<
2	22,61	
3	21,61	

**INDICADOR:** < : Medida Menor a la Sensibilidad del Instrumento  
> : Medida mayor que la sensibilidad del instrumento  
D : Medida dudosa  
E : Medida errónea

### ANEXO 3

Comportamiento de la sílice a distintos valores de pH. Valores de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico agregados para variar el pH del agua del río San Pedro de Inacaliri, además de los correspondientes contenidos de Sílice en cada muestra.

pH	[NaOH] mg/L	[HCl] mg/L	SiO <sub>2</sub> Total (mg/L)	SiO <sub>2</sub> disuelta (mg/L)	SiO <sub>2</sub> Coloidal (mg/L)
3	0	229,7	102	98	4
3,5	0	211,47	104	101	3
4	0	204,18	101	94	7
4,5	0	200,53	103	97,6	5,4
5	0	191,42	102	100	2
5,5	0	175,01	103	93,6	9,4
6	0	133,08	103	90,4	12,6
6,5	0	91,15	101	96,4	4,6
7	0	40,11	101	100	1
7,5	0	25,52	100	99,6	0,4
8	0	10,94	108	98	10
8,5	4	0	107	97,6	9,4
9	32	0	107	97,2	9,8
9,5	92	0	106	95,6	10,4
10	212	0	71	60	11
10,5	252	0	53	46	7
11	438	0	39	34,4	4,6
11,5	590	0	62	53,2	8,8
12	892	0	57	51,2	5,8

## ANEXO 4

Ficha técnica de cal utilizada para realizar el ensayo.

### Cal Apagada Superfina

**Nombre Comercial:** Cal Superfina

**Fórmula Química:**  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

**Peso Molecular:** 74 gr/mol

**Apariencia:** Cal de aspecto muy fino, color blanco.

**Baja Densidad:** 0,4 – 0,5 g/cm<sup>3</sup> (densidad a granel según norma DIN 1060 Parte 3).

**Forma de entrega:** Bolsa papel de 20 Kg.

### Composición Química

%Ca(OH) <sub>2</sub> libre	79,3 – 83,2
%CaO libre	60,0 – 63,0
% SiO <sub>2</sub>	1,5 – 4,0
% MgO	0,5 – 1,6
% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 – 2,0
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 – 2,0
% S	0,0 – 2,0
% R. Insoluble	0,2 – 2,0

### Porcentaje retenido sobre malla (RSM)

Mallas Tyler	%
+M30	0,0
+M50	0,0
+M100	0,5
+M170	1,5
+M200	0,5
+M325	3,0
+M400	13,0

## ANEXO 5

Ensayo abatimiento utilizando cal. Valores de sílice en cada muestra, además de la cal y floculante adicionados en cada ensayo.

<b>pH</b>	<b>[Ca(OH)<sub>2</sub>] mg/L</b>	<b>Clarisol (mg/L)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> Total (mg/L)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> disuelta (mg/L)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> coloidal (mg/L)</b>
8,5	0	5	104	99,6	4,4
9	175	5	97,6	95,2	2,4
9,5	570	5	86,4	82,4	4
10	781	5	55,2	52,8	2,4
10,5	850	5	71,2	64,8	6,4
11	1200	5	50,8	36,3	14,5
11,5	1550	5	39,6	27,2	12,4
12	2800	5	18	14	4

## ANEXO 6

Ensayo abatimiento utilizando aluminato de sodio. Valores de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio para variar el pH y contenido de sílice en cada muestra de agua del río San Pedro de Inacaliri. Además a cada muestra se le adicionó 200 mg/L de aluminato de sodio y 5 mg/L de floculante aniónico Clarisol 4010.

<b>pH</b>	<b>HCl (mg/L)</b>	<b>NaOH (mg/L)</b>	<b>[SiO<sub>2</sub>] Total (mg/L)</b>	<b>[SiO<sub>2</sub>] disuelta (mg/L)</b>	<b>[SiO<sub>2</sub>] coloidal (mg/L)</b>
3	230	0	74	70	4
4	204	0	68	63	5
5	190	0	65	59	7
6	130	0	56	51	4
7	40	0	38	36	3
8	10	0	48	38	10
9	0	32	32	29	3
10	0	200	41	36	5
11	0	440	39	33	6
12	0	900	56	48	8

## Ficha técnica aluminato de sodio



**Aluminato de sodio**  
**Ficha Técnica del Producto**



### Propiedades Químicas

Fórmula Química	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ (ac)
Densidad	$1.53 \pm 0.03$ g/ml
Contenido de Alúmina	$23 \pm 1\%$ $\text{Al}_2\text{O}_3$
Contenido de óxido de sodio	$19 \pm 1\%$ $\text{Na}_2\text{O}$

\*Vida útil posterior a su fabricación: 45 días

### Indicaciones

El aluminato de sodio es un coagulante de aluminio con una basicidad alta, suprimiendo la necesidad de agregar cal, carbonato de sodio u otros agentes alcalinos.

Por sus propiedades, permite el tratamiento en pH un poco más altos que el sulfato de aluminio, obteniéndose agua menos corrosiva.

### Condiciones de Manejo

El producto puede ser almacenado y conducido empleando acero inoxidable, PVC. Elastómeros comerciales como Buna, EPDM y Neopreno también son apropiados. No es adecuado utilizar aluminio, cobre, zinc, estaño ni caucho natural.

### Precauciones y Seguridad

El producto es de carácter alcalino, corrosivo y puede causar serias afecciones por ingestión.

Su manejo es delicado y deben ser utilizadas las medidas preventivas necesarias para evitar el contacto con la piel o los ojos.

El producto en ciertas condiciones puede emitir gases nocivos, por lo que se debe manejar en un lugar bien ventilado.

Es altamente recomendado el uso de guantes y gafas protectoras.





## ANEXO 7

Ficha Técnica de floculante anionico: Clarisol 4010



# CLARISOL4010

Floculante para Procesos FT 39301J9

### Propiedades

**CLARISOL 4010** es un floculante aniónico de peso molecular alto. El modo de actuar de **CLARISOL 4010** se basa en un intercambio de cargas entre los potenciales eléctricos existentes en solución acuosa a lo largo de la cadena del polímero y las cargas superficiales de las partículas sólidas en suspensión.

**CLARISOL 4010** se emplea en la industria minera, papelera, metalúrgica y química en general. También se utiliza en la clarificación de aguas residuales y plantas depuradoras biológicas/químicas, posteriores a un pretratamiento con formadores de hidróxidos o desestabilizadoras de carga, como cloruro férrico o sulfato de aluminio.

### Características generales

Porcentaje de activo: 100%

Carga iónica: Débilmente aniónico.

Densidad aparente: 600 - 900 kg/m<sup>3</sup>

Aspecto: Granulado blanco soluble en agua.

Rango de efectividad: 4 – 13 pH

Estabilidad: Producto en su envase original: aprox. 2 años

Solución madre con agua potable (al 0.5 %): aprox. 2 días

Solución de empleo con agua potable (al 0.1 %): aprox. 1 día

Suministro: Sacos de 25 Kg neto.

### Aplicación y Dosificación

**CLARISOL 4010** se aplica en solución acuosa fuertemente diluida (por ejemplo al 0.1% en peso). Para la elaboración de la solución de empleo puede prepararse primero una solución madre más concentrada (por ejemplo al 0.5% en peso), diluyéndola posteriormente a la concentración de empleo deseada, o bien, se prepara

directamente la solución de empleo a la concentración final requerida (por ejemplo al 0.1% en peso). La solución madre o la de empleo requieren un tiempo de maduración de aproximadamente cuarenta y cinco minutos, durante el cual debe mantenerse la solución bajo suave agitación.

Debido a las diversas propiedades de los turbios y fangos a tratar, las cantidades a dosificar sólo pueden ser determinadas en cada caso, mediante ensayos de laboratorio o pruebas industriales.

### Manejo y Almacenaje

Floculantes de alto peso molecular como **CLARISOL 4010** son siempre sensibles a los efectos de la humedad en forma de agua de condensación, salpicaduras de agua o la humedad del aire. Al contacto con el agua (en forma de gotas) pueden formarse grumos o nudos. Por eso, los productos deben ser almacenados en recipientes secos y cerrados, protegidos de la humedad.

La temperatura de almacenaje no debe sobrepasar prolongadamente los 45 °C

## ANEXO 8

Ensayo abatimiento utilizando cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ). Valores de hidróxido de sodio para variar el pH y contenido de sílice en cada muestra de agua del río San Pedro de Inacaliri. Además de la cantidad de magnesio adicionada en el agua para lograr la concentración requerida.

<b>[Mg<sup>2+</sup>] deseada en solución (mg/L)</b>	<b>Masa de MgCl<sub>2</sub> agregada (mg/L)</b>
70	186,08
90	355,25
120	609
150	862,75
180	1116,5

<b>pH</b>	<b>NaOH (mg/L)</b>	<b>SiO<sub>2</sub> 70mg/L de Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SiO<sub>2</sub> 90mg/L de Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SiO<sub>2</sub> 120mg/L de Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SiO<sub>2</sub> 150mg/L de Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SiO<sub>2</sub> 180mg/L de Mg<sup>2+</sup></b>
8,5	0	93,2	92,8	89,8	94,3	100,3
9	18	93,2	93,9	95,6	93,6	97,5
9,5	60	93	93	92,6	93	87,2
10	144	83,4	76,9	60,4	77,8	60,6
10,5	200	65,6	54,9	12,5	17,7	19,4
11	320	44,4	25,9	5,3	7,9	3,4
11,5	480	35,6	29,4	11,04	9,9	3,4
12	636	44,1	42,6	21,3	16,1	9,2

## ANEXO 9

Ensayo abatimiento utilizando cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ) y floculante anionico Clarisol 4010. Contenido de sílice en cada muestra de agua del río San Pedro de Inacaliri. La cantidad de magnesio adicionada en el agua para lograr la concentración requerida se muestra en el anexo anterior.

pH	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
	70mg/L de Mg <sup>2+</sup>	90mg/L de Mg <sup>2+</sup>	120mg/L de Mg <sup>2+</sup>	150mg/L de Mg <sup>2+</sup>	180mg/L de Mg <sup>2+</sup>
10,5	46,1	26,6	31,1	32,1	31,9
11	26,5	15,2	14,1	5	5,9
11,5	29,8	20	18,3	12,1	7,4
12	33,9	25,8	25,3	22,9	15,5