

Universidad del Bío-Bío

Facultad de Ingeniería.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

Prof. Patrocinante: Pedro Cisterna Osorio.



“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OXIDACIÓN DE HIERRO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ABASTECIMIENTO A TRAVES DE AIREACIÓN”

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Civil.

HERNÁN ANTONIO FUENTES ALARCÓN.

Concepción, Junio del 2013.

DEDICATORIA.

Dedico este proyecto de título a las personas que me han apoyado durante toda mi vida, a mi familia, en especial a mi abuelo que me cuida desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a mi familia, en especial a mis padres por su apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por enseñarme a elegir el siempre el camino del trabajo y el esfuerzo para conseguir mis objetivos.

Al profesor Pedro Cisterna por brindarme la oportunidad de desarrollar este tema y confiar en mí.

A Natalia Carvajal y al Laboratorio Biodiversa, por brindarnos sus servicios para desarrollar esta investigación.

ÍNDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	3
1.1 Problema Investigativo	3
1.2 Descripción de la Propuesta	4
1.3 Justificación de la Propuesta	4
1.4 Objetivos	5
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	5
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	5
 CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE	6
2.1 Hierro en Aguas Subterráneas	6
<i>2.1.1 Antecedentes generales</i>	6
<i>2.1.2 Criterio de calidad de aguas de consumo</i>	7
2.2 Transferencia de Oxígeno	8
2.3 Cinética de Oxidación del Hierro	9
 CAPITULO III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	12
3.1 Metodología Cuantitativa	12
<i>3.1.1 Variables experimentales</i>	12
<i>3.1.2 Recolección de datos</i>	12
<i>3.1.3 Etapas de la investigación</i>	13
3.2 Fase Experimental	13
<i>3.2.1 Equipos</i>	13
<i>3.2.2 Implementación y operación</i>	14
<i>3.2.3 Metodología de ensayos</i>	16

CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	18
4.1 Oxígeno Disuelto en Función del Tiempo de Aireación	18
<i>4.1.1 Relación entre variables independientes</i>	18
4.2 Análisis de Oxidación de Hierro	20
<i>4.2.1 Caracterización agua bruta</i>	20
<i>4.2.2 Efectos de las variables independientes en la concentración de hierro</i>	21
<i>4.2.3 Tiempos de sedimentación</i>	23
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25
5.1 Conclusiones	25
5.2 Recomendaciones	26
BIBLIOGRAFÍA	27
ANEXOS	29

Lista de Ecuaciones.

Ecuación 1. Ley de Henry	9
Ecuación 2. Tasa de Oxidación del Hierro por Aireación	10

Lista de Figuras.

Figura 1. Esquema del Hierro Total Presente en Aguas Subterráneas	7
Figura 2. Esquema de la Teoría de la Película Doble propuesta por Lewis y Whitman	8
Figura 3. Tanque De Aireación	14
Figura 4. Bomba de Aire	14
Figura 5. Ciclo Operacional del Sistema de Aireación	15
Figura 6. Variación de las Concentraciones de Oxígeno en Función del Tiempo de aireación	19
Figura 7. Concentración de Hierro en Función del Tiempo de Aireación.	21
Figura 8. Concentración de Hierro en Función de los Caudales de Aireación.	22
Figura 9. Efectos de los Tiempos de Sedimentación en la Concentración de hierro.	23

Lista de Tablas.

Tabla 1. Variables Independientes Experimentales	17
Tabla 2. Resumen de Datos medidos en el Ensayo	18
Tabla 3. Concentración de Hierro en las Muestras Experimentales.	20
Tabla 4. Tiempos de Sedimentación	23

“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OXIDACIÓN DEL HIERRO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE ABASTECIMIENTO A TRAVÉS DE AIREACIÓN.”

HERNÁN FUENTES ALARCÓN.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

hefuente@alumnos.ubiobio.cl

PEDRO CISTERNA OSORIO.

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío.

pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN:

El agua de abastecimiento de la localidad de Arinco, ubicada en la comuna de Nacimiento, posee una concentración de hierro de 1,9 [mg/l], lo cual supera lo establecido por la normativa de agua potable, que es de 0,3 [mg/l]. Esto provoca un deterioro en su calidad (mal aspecto, olor y sabor desagradable, manchas en objetos en contacto con ella, obstrucción de cañerías). El presente trabajo de investigación tiene como objetivo, analizar experimentalmente la oxidación del hierro en el agua subterránea de abastecimiento a través de aireación. Esto se logra implementando un sistema de tipo discontinuo a escala de laboratorio, donde se analizan dos variables: caudales de aire y tiempos de contacto del agua con el oxígeno. Estas condiciones se manipulan y combinan con la finalidad de cuantificar los cambios en las concentraciones de hierro presentes en las muestras. De los resultados se puede determinar que la oxidación del hierro es eficiente hasta la segunda hora de aireación y que los caudales aplicados tienen su mayor influencia en la tasa de oxidación, entre la primera y la segunda hora. Luego de este tiempo, la remoción del hierro en las muestras de aguas se vuelve cada vez más lento. Utilizando un flujo de 9,2[l/min] existe una remoción de 66,72%, mientras que empleando un caudal de 3,7 [l/min] la remoción alcanza los 51,14% a las dos horas de aireación. Se utiliza un tiempo de sedimentación de 30 minutos, el cual es insuficiente para alcanzar las concentraciones de hierro establecidas por la normativa vigente.

Palabras claves: Agua de abastecimiento, Aireación, Oxidación del hierro.

6025 Palabras + 13 Figuras / Tabla * 250 = 9275 Palabras.

ABSTRACT:

The water supply of the town of Arinco, located in the commune of Nacimiento, has an iron concentration of 1.9 [mg/l], which exceeds the established by the rules of drinking water, which is 0.3 [mg/l]. This causes deterioration in quality (bad look, smell and taste unpleasant, stains on objects in contact with it, clogging of pipes). The present research aims to analyze experimentally the oxidation of iron in the groundwater supply through aeration. This is achieved by implementing a batch- type system laboratory scale, analyzing two variables: flow of air and water contact time with oxygen. These conditions are manipulated and combined in order to quantify the changes in the concentrations of iron in the samples. Of the results it is possible to determine that the oxidation of the iron is efficient until the second hour of aeration and that the applied flows have his major influence in the rate of oxidation, between the first one and the second hour. Using a flow of 9.2 [l/min] there is a removal of 66.72%, while using a flow rate 3,7 [l /min] removal reaches 51.14%. It uses a settling time of 30 minutes, which is insufficient to achieve iron concentrations established by current legislation.

Keyword: Water Supply, Aeration, Oxidation of iron.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

Este capítulo expone de forma sintetizada el tema propuesto en el presente proyecto de título. Se explica la problemática que dio lugar a su elaboración, una descripción de la propuesta llevada a cabo para hacer frente al problema enunciado, su justificación y el planteamiento de los objetivos.

1.1 Problema Investigativo.

El agua es un recurso fundamental para el ser humano, ya que desempeña un rol esencial en las actividades vitales del organismo. Además se utiliza en distintas acciones cotidianas a nivel doméstico (aseo personal, cocinar, lavar, etc.), que son primordiales en el diario vivir de las personas. Por este motivo es sumamente importante que tenga una calidad que permita consumirla sin sufrir efectos de ningún tipo (salud, económicos, etc.). Esto se logra a través de la potabilización del agua cruda.

En Chile existe una cierta desconexión entre algunas comunidades rurales y los centros urbanos (debido principalmente a la geografía del país), lo que origina que ciertos sectores no posean servicios básicos como agua potable y luz eléctrica. Cuando la red de distribución de agua potable no abastece a las comunidades, éstas utilizan generalmente agua subterránea para su consumo, ya que tienen mejor calidad y son más fáciles de explotar que las aguas superficiales (ríos, arroyos, etc.). Éstas tienden a ser dulce, debido a la circulación subterránea que las depura de partículas y microorganismos contaminantes, sin embargo se pueden contaminar producto de la actividad humana o a factores naturales. Uno de los constituyentes que se presenta con mayor frecuencia en este tipo de aguas es el hierro, elemento que se desea remover a través de la propuesta presentada en este trabajo de investigación.

El hierro no produce efectos directos sobre la salud, pero en las concentraciones usualmente encontradas en aguas subterráneas, origina un deterioro evidente en su olor, sabor y aspecto (coloración rojiza-café). Además provoca manchas de muy difícil remoción, en los objetos que están en contacto con ella (artículos de cocina, ropa, aparatos sanitarios). En el sistema de abastecimiento, produce serios problemas en la operación y mantención debido a la obstrucción de cañerías. Por otra parte, la utilización de agua rica en hierro en los sembrados, tiende a reducir el pH de los suelos, lo que afecta la productividad agrícola.

La presente investigación se realiza en Arinco, una localidad rural ubicada en la comuna de Nacimiento, donde las aguas subterráneas utilizadas para consumo poseen concentraciones de hierro mayores a las establecidas como seguras por la normativa de calidad de agua potable. (Nch 409/1 Of 2005).

1.2 Descripción de la Propuesta.

Se busca encontrar una solución a la problemática anteriormente expuesta, a través de un proceso eficiente y de fácil operación a nivel doméstico.

Se plantea como una alternativa viable para este fin al proceso aireación- sedimentación, el cual se evalúa experimentalmente a través de la implementación de un sistema de aireación discontinuo a escala de laboratorio que permite efectuar ensayos a las muestras de agua cruda del sector de estudio. Su funcionamiento consiste en aumentar el contenido de oxígeno disuelto en el agua, lo que provoca la oxidación del hierro soluble, transformándolo en precipitados que sedimentarán por acción de la gravedad.

En este proyecto de título, se desea medir los efectos que provocan el tiempo de contacto y la concentración de oxígeno disuelto, en la reducción de la concentración de hierro en las muestras ensayadas, manipulando de forma controlada estas variables. La determinación de la eficiencia de este tratamiento, se logra a través del análisis de los datos cuantitativos entregados por los ensayos.

1.3 Justificación de la Propuesta.

La elección de este tratamiento para la remoción de hierro en agua subterránea utilizada para consumo en el sector de estudio, se adoptó principalmente por ser un método fácil de utilizar a nivel doméstico, lo cual es de gran importancia en sectores rurales. La otra alternativa existente era el uso de químicos como el dióxido de cloro o permanganato de potasio, lo cual se descartó, ya que se requiere personal calificado para su manipulación, lo que ocasiona en sectores alejados o de difícil acceso, un problema operacional para el tratamiento de las aguas de abastecimiento.

Por este motivo se busca a través de la investigación científica, validar de forma objetiva este método de tratamiento, con datos cuantitativos comprobados experimentalmente que permitan asegurar que su uso es una buena alternativa para solucionar este problema.

1.4 Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

- Analizar experimentalmente la oxidación del hierro en aguas subterráneas de abastecimiento a través de aireación.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Implementar un sistema de aireación a escala de laboratorio.
- Realizar ensayos experimentales de aireación a las muestras de aguas, utilizando como variables independientes, los tiempos de contacto y los caudales de aireación aplicados.
- Evaluar el efecto que tienen las variables independientes utilizadas en el desarrollo experimental, en las concentraciones de hierro de las muestras ensayadas.
- Analizar cómo influyen los tiempos de sedimentación en la oxidación del hierro.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.

En este capítulo se realiza una recopilación de la información teórica relacionada con el estudio de la oxidación del hierro en aguas subterráneas utilizadas para consumo humano, a través de aireación. Se divide en 3 secciones, donde inicialmente se hace referencia a la problemática que dio origen a la investigación, a través de la búsqueda de antecedentes bibliográficos vinculados a la presencia de hierro en aguas subterráneas. Posteriormente se explica el proceso de aireación, el cual es la alternativa para solucionar el problema, a través del estudio de la teoría de transferencia de oxígeno. Para finalizar el capítulo, se estudia la cinética de oxidación del hierro en las aguas crudas.

2.1 Hierro en Aguas Subterráneas.

2.1.1 Antecedentes generales.

El hierro es un metal de transición que se encuentran de forma abundante en la corteza terrestre. Su presencia en aguas subterráneas se atribuye principalmente a la disolución de las rocas que contienen hierro y minerales, principalmente óxidos (hematita, magnetita, limonita), sulfuros (pirita), carbonatos (siderita) y silicatos (piroxenos, anfíboles, biotitas y olivinos) en condiciones anaeróbicas y en presencia de agentes reductores como la materia orgánica y el sulfuro de hidrógeno (O'Connor, 1971; citado por Sharma, 2001.).

La concentración de hierro en el agua subterránea normalmente oscila entre unas pocas centésimas a aproximadamente 50 mg/l, el contenido en la mayoría es menor a 5 mg/l (Hem, 1989; Davis, 1997; citado por Sharma, 2001.). Ésta se ve frecuentemente limitada por la solubilidad de los carbonatos, por lo tanto las aguas de alta alcalinidad a menudo, tienen un contenido de hierro inferior al agua de baja alcalinidad.

En aguas subterráneas el hierro suele existir en dos estados de oxidación, los cuales son el ferroso bivalente reducido (Fe^{2+}) y el férrico trivalente oxidado (Fe^{3+}). Lo diferentes estados del hierro en el agua se resumen en la figura 1.

Las formas bajo las cuales el hierro se encuentra en el agua dependen de su Ph y de su potencial de oxidación-reducción. Por lo general, el hierro se encuentra en 6 formas distintas en las aguas subterráneas: como bicarbonato ferroso, hidróxido ferroso, sulfuro ferroso, hierro orgánico (quelato), carbonato ferroso e hidróxido férrico, siendo el bicarbonato ferroso su forma más

común en aguas crudas. La mayoría de los compuestos ferrosos son solubles, con la excepción del sulfuro ferroso.

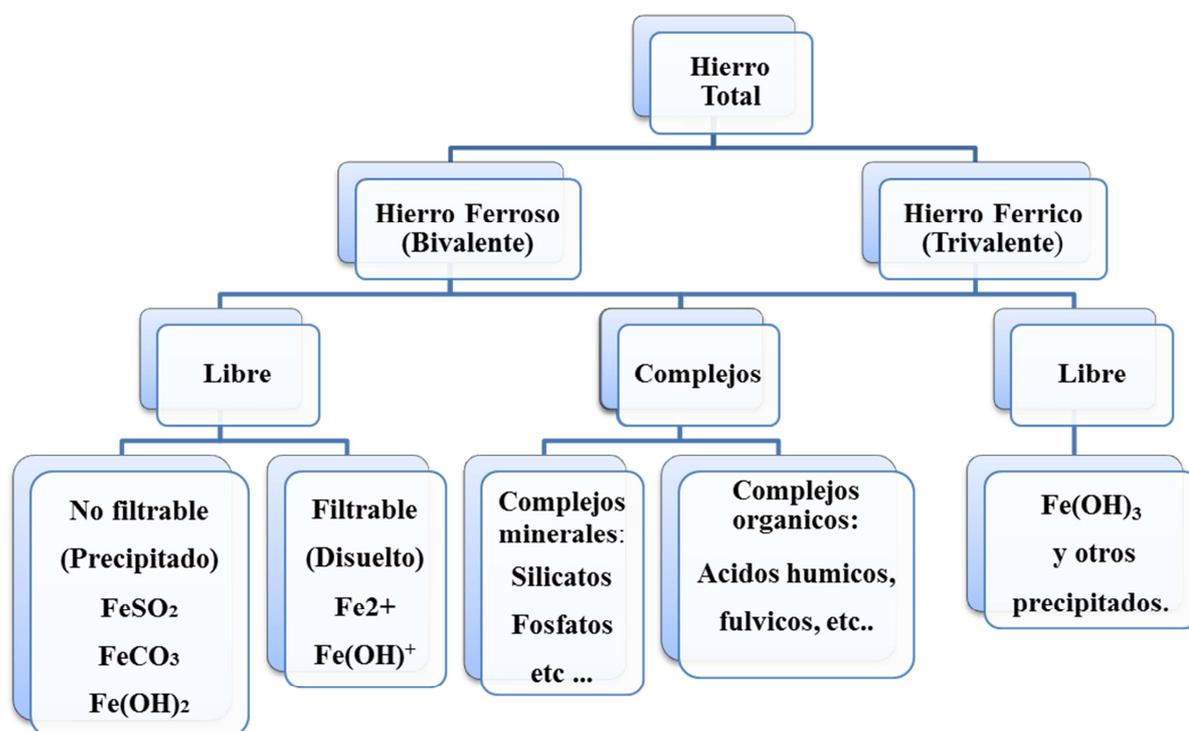


Figura 1. Esquema del Hierro Total Presente en Aguas Subterráneas

(Fuente: Degremont (1989), Manual Técnico del agua.)

2.1.2 Criterio de calidad aguas de consumo.

La calidad del agua depende del propósito particular que se le va a dar, en este caso es el consumo humano, por lo cual se establecen concentraciones límites para las diversas sustancias que la constituyen, las cuales son establecidas por la normativa chilena de agua potable (Nch 409/1 of 2005), la que entrega las concentraciones máximas que aseguran tanto la aceptabilidad estética (Turbiedad, olor, color, sabor), como la ausencia de riesgos en la salud de los consumidores. Ésta debe poseer la calidad bacteriológica y química que permita utilizarla para tal fin.

El límite permisible establecido para el hierro en las aguas de consumo humano es de 0,3 mg/l, lo cual les brinda características que cumplen con los criterios de aceptabilidad por parte de los consumidores. Cuando la concentración es inferior a 0.3 [mg/l], el sabor no suele ser perceptible, y el agua presenta un buen aspecto.

2.2 Transferencia de Oxígeno.

La aireación es un proceso que tiene como finalidad purificar el agua a través del contacto directo con oxígeno. En las aguas subterráneas esto provoca la oxidación de sustancias orgánica, inorgánicas y gases disueltos, lo que mejora su calidad química, bacteriológica y estética. Los métodos más utilizados para estos fines son a través del aire en capas delgadas o gotas finas (aeradores de cascada) o mezclando el agua con aire disperso (aireación difusa).

Existen varias teorías propuestas para el mecanismo de transferencia de oxígeno en el agua, siendo la teoría de la doble película propuesta por Lewis y Whitman (Figura 2), la más sencilla y utilizada. De acuerdo con esta teoría, es la presencia de dos capas, una líquida y otra gaseosa, en la interfase gas-líquido, la que proporciona la mayor parte de la resistencia al paso de las moléculas de gas de la masa en fase gaseosa a la líquida. (Ramalho, 1998)

La concentración de oxígeno varía en zonas cercanas a la interfase. Al estar perfectamente mezclados ambos fluidos, la concentración tiende a ser constante. La transferencia de materia a través de esta interfase se produce perpendicular a la película y únicamente por difusión molecular. (Montoya, 2003).

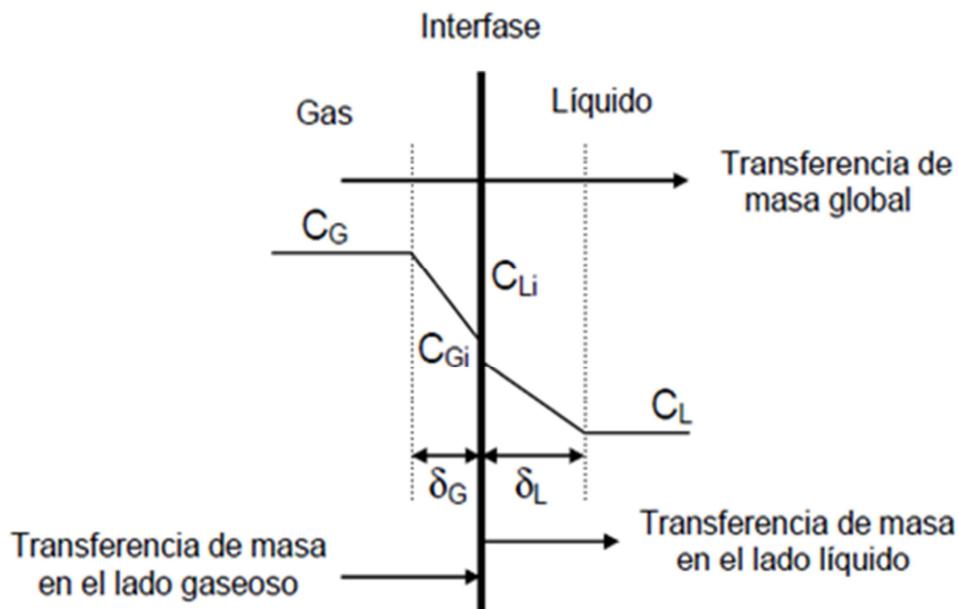


Figura 2. Esquema de la Teoría de la Película Doble propuesta por Lewis y Whitman

(Fuente: Deckwer (1992). Column reactors. Adaptado por Montoya (2003))

Dónde:

δ_G : Espesor de la película de gas.

δ_L : Espesor de la película líquida.

C_{Gi} : Concentración de oxígeno en la película de gas de la interfase

C_{Li} : Concentración de oxígeno en la película líquida de la interfase.

C_G : Concentración de oxígeno en la masa gaseosa.

C_L : Concentración de oxígeno en la masa líquida.

En la transferencia de moléculas de gas de la fase gaseosa a la líquida, los gases de baja solubilidad en fase líquida (que es el caso a considerar en este estudio) encuentran la resistencia principal a la transferencia en la capa líquida, en tanto que los gases muy solubles en fase líquida hallan dicha resistencia en la capa gaseosa. Los gases de solubilidad intermedia hallan una resistencia significativa en ambas capas.

Su proceso ha sido descrito como un fenómeno que ocurre en dos etapas, en la primera se transfieren las moléculas de oxígeno a la superficie del líquido, lo que da como resultado condiciones de saturación o de equilibrio en la interfase. La velocidad de transferencia es muy rápida, ya que la resistencia de la película de gas es despreciable (la resistencia se encuentra en la capa líquida). Durante la segunda etapa las moléculas de oxígeno atraviesan la película líquida por difusión molecular, mezclándose dentro de la masa líquida por difusión.

La concentración de equilibrio del gas disuelto en un líquido es función de la presión parcial del gas en contacto con el líquido. Esta relación viene dada por la ley de Henry:

$$C_L = K_H * P_g \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde

C_L = Concentración de saturación o en el equilibrio de oxígeno en la fase acuosa (mol l⁻¹)

K_H = Constante de la Ley de Henry (mol l⁻¹ atm⁻¹)

P_g = Presión parcial de oxígeno en la fase gaseosa (atm)

2.3 Cinética de Oxidación del Hierro.

La cinética de la reacción que involucra al hierro, está basada en la velocidad a la que ocurre la reacción de óxido-reducción, dependiendo de las condiciones de pH, temperatura y presencia de sustancias que induzcan un efecto iónico o un efecto complejante y respectivamente, acelere o

retarde el proceso (Campo y Barrera, 2005). Stumm y Lee (1961) encontraron que la tasa de oxigenación del hierro ferroso en las soluciones de bicarbonato es de primer orden con respecto a las concentraciones de Fe^{2+} y al oxígeno disuelto y de segundo orden con respecto a la ión OH.

$$\frac{-d [Fe^{2+}]}{dt} = k_0 pO_2 [Fe^{2+}][OH^-]^2 \quad Ec.(2)$$

Dónde:

$$\frac{-d [Fe^{2+}]}{dt} = \text{Tasa de oxidación del } Fe^{+2} \text{ (mol l}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{)}$$

$$k_o = \text{Constante tasa de reacción (l}^2 \text{ mol}^{-2} \text{ atm}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{)}$$

$$pO_2 = \text{Presión parcial de oxígeno (atm)}$$

$$[Fe^{2+}] = \text{Concentración molar de hierro ferroso. (mol l}^{-1} \text{)}$$

$$[OH^-] = \text{Concentración molar de ion hidroxilo. (mol l}^{-1} \text{)}$$

La tasa de oxigenación depende fuertemente del pH, aumentando 100 veces por cada aumento de unidad del pH. Por lo tanto, la velocidad de oxidación de Fe^{+2} es lenta a pH bajo. Los estudios de Stumm y Lee (1961) también demostraron que se debe esperar que la oxidación del hierro ferroso se produzca rápidamente en aguas bien oxigenadas con valores de pH superiores a 7,2. Además del pH, otros parámetros del agua también han sido considerados por tener un efecto significativo sobre la velocidad de oxidación del Fe^{+2} . A continuación se describe cada uno de ellos:

a) Alcalinidad: es importante en la eliminación de hierro ya que proporciona la capacidad de amortiguación para evitar la caída en exceso del pH durante la oxidación del hierro e influye en las características del precipitado. En aguas de baja alcalinidad, la oxidación de hierro es lenta y se forman precipitados difíciles de filtrar.

b) Temperatura: Stumm y Lee (1961) observaron que a pH y concentraciones de oxígeno constante, la tasa de oxigenación aumenta diez veces para un aumento de 15 ° C de temperatura. Sin embargo, cuando Sung y Morgan (1980), citados por Sharma (2001), normalizaron los datos experimentales con respecto a los cambios en K_w (constante de reacción del agua) y el oxígeno disuelto, la tasa de velocidad varió ligeramente con el aumento de temperatura.

c) Materia orgánica: El complejo de hierro se puede formar por ácidos húmicos, fúlvicos y sustancias orgánicas similares presentes en el agua. Dicho complejo puede hacer al hierro

resistente a la oxidación, incluso en presencia de oxígeno disuelto (Oldham y Gloyna 1969; Jobin y Ghosh 1972; citado por Sharma, 2001). Algunas sustancias, como, silicatos, fosfatos o polifosfatos, desempeñan un papel inhibidor en la precipitación y la filtración del hidrato férrico (Degremont, 1989).

d) Efectos catalíticos de algunos elementos: Diferentes iones presentes en el agua puede alterar la tasa de oxigenación de Fe^{+2} . Los catalizadores (sobre todo Cu^{+2}) en cantidades de traza, así como los aniones que forman complejos con el hierro férrico (H_2PO_4), aumentan la velocidad de reacción considerablemente (Stumm y Lee, 1961). Mientras que efectos inhibidores han sido reportados en aguas con presencia de SO_4^{2-} y Cl^- (Sung y Morgan, 1980; citado por Sharma, 2001).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Este capítulo presenta la planificación de la etapa experimental que permite desarrollar el presente trabajo de investigación. Se construye en base a dos temas. El primero tiene que ver con la metodología cuantitativa aplicada al estudio, donde se indican las variables utilizadas en el experimento, el método e instrumentos utilizados para recolectar los datos y las etapas de la investigación. El segundo tema se relaciona con la fase experimental, describiendo los equipos, la implementación y forma de operación del sistema de aireación. Además entrega la metodología utilizada para la realización de los ensayos.

3.1 Metodología Cuantitativa.

3.1.1 Variables experimentales.

La investigación científica de tipo experimental realizada en este estudio, tiene como finalidad determinar el efecto de las variables independientes sobre la variable dependiente, manipulando de forma controlada las primeras y analizando como esto influye en el elemento que se desea medir. Se basa en la recopilación y análisis de datos cuantificables a través de los equipos y dispositivos específicos de medición establecidos en la fase experimental.

En este estudio, las variables independientes son la intensidad del flujo de aire aplicada a la masa líquida y los tiempos de contacto del oxígeno con el agua tratada. Por otra parte, la variable dependiente es la concentración de hierro en las muestras de agua tratadas con aireación.

3.1.2 Recolección de datos.

Las técnicas de recolección de información se basaron en fuentes secundarias y primarias; las primeras se obtuvieron de la información escrita recopilada de fuentes bibliográficas, con el propósito de obtener conocimientos que soporten el tema de investigación. Mientras que las fuentes primarias fueron recopiladas directamente a través del uso de instrumentos de medición utilizados en ensayos que permitieron cuantificar los datos de las variables independientes (Anexo B) y la variable dependiente (Anexo C).

3.1.3 Etapas de la investigación.

a) Búsqueda y estudio de antecedentes.

En esta etapa se realiza la búsqueda bibliográfica a través de diversas fuentes, con el fin de recopilar información sobre la oxidación de hierro en aguas subterráneas utilizadas para consumo humano, por efecto del proceso de aireación.

b) Fase experimental.

Para realizar este trabajo de investigación, se debe implementar un sistema de aireación de tipo discontinuo a escala de laboratorio, en el cual se ejecuten los ensayos a las muestras del agua cruda del sector de estudio. En esta etapa se efectúan las acciones necesarias para realizar este experimento. Esto consiste en gestionar los distintos equipos e implementar el sistema de aireación que se utilizará para realizar los ensayos.

c) Metodología de ensayos.

Consiste en el planeamiento y ejecución de los ensayos de aireación. Se deben determinar las variables independientes y decidir de qué forma se manipularán, para definir un procedimiento que permita llevar a cabo los ensayos. Además se deben precisar los métodos e instrumentos de medición que se aplicarán en la etapa experimental.

d) Análisis de resultados.

Se determina el efecto que tienen las variables utilizadas en el desarrollo experimental, sobre la variable dependiente, a través de los datos entregados en la etapa experimental.

3.2 Fase Experimental.

3.2.1 Equipos.

El sistema a escala de laboratorio cuenta principalmente de un tanque de aireación y de una bomba de aire, además de otros dispositivos que permiten su correcto funcionamiento. A continuación se describen los equipos utilizados:

a) Tanque de aireación.: Corresponde a un cilindro de acrílico transparente, con una altura de 45 cm y un diámetro interno de 20 cm. El tanque posee orificios laterales de salida a distintas alturas, lo que permite elegir el volumen de trabajo y tomar las muestras ensayadas.



Figura 3. Tanque de Aireación.

b) Bomba de aire: Compresor de aire que posee 4 salidas regulables. Su caudal máximo es de aproximadamente 9,2 [l/min] mientras que su caudal mínimo alcanza los 3,7 [l/min].



Figura 4. Bomba de Aire.

c) Otros dispositivos

Para completar el sistema, se utilizan tubos plásticos de 4 [mm] de diámetro y piedras difusoras que se encuentran ubicadas en la base del tanque de aireación. Para medir las concentraciones de oxígeno aplicadas al agua por la bomba de aire, se utiliza un oxímetro modelo YSI 550A.

3.2.2 Implementación y operación

Para implementar el sistema de aireación, la bomba de aire se ubica a un nivel superior de la superficie del agua, de esta manera se evita que en el caso de que se produzca un corte de

electricidad se invierte el flujo del aire, y que en vez de expulsarlo, aspire el agua, lo que provocaría daños en el equipo. La bomba comprime aire hacia el interior del recipiente a través de sus salidas, las cuales están conectadas con tubos plásticos que tienen la función de conducir el aire hacia las piedras difusoras ubicadas en la base del recipiente. Luego estas piedras transforman el aire en pequeñas burbujas las cuales ascienden hasta la superficie del agua contenida en el tanque, transfiriendo oxígeno a la masa líquida.

La operación del sistema está basada en el establecimiento de varias etapas que son realizadas en un mismo tanque, donde las fases de los procesos son secuenciales y se repiten en forma cíclica. Consiste en introducir las muestras de agua al tanque, airearla y permitir que reaccionen en un tiempo determinado. Luego se deja sedimentar las partículas para finalmente descargar la mezcla resultante. Las operaciones unitarias se muestran en el figura 5 y son las siguientes:

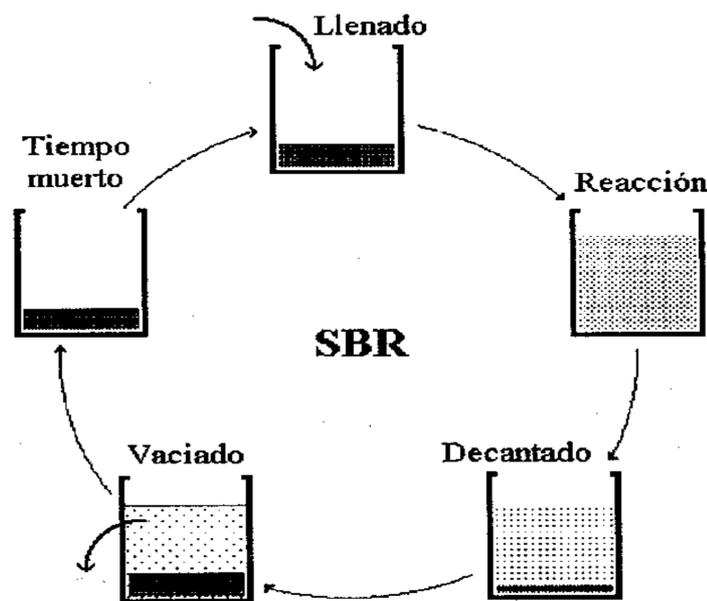


Figura 5. Ciclo Operacional del Sistema.

(Fuente: Moreno y Buitron, (2001))

a) Fase de llenado.

Durante esta fase, las muestras de agua cruda del sector de estudio que se desean tratar, ingresan al tanque de aireación. Esto se realiza de forma manual, descargando las muestras al tanque de aireación en condiciones estáticas.

b) Fase de aireación.

Posteriormente al llenado, se inyecta aire al sistema a través de la bomba y difusores los cuales tienen la función de transformar el flujo de aire en pequeñas burbujas, las cuales rompen en la superficie del agua produciendo un intercambio gaseoso eficaz ya que se crea una corriente y una agitación que aumenta la superficie acuosa en contacto con el aire a la vez que se renueva el agua más oxigenada por otra menos oxigenada.

Al aumentar el oxígeno disuelto en el agua se produce la oxidación del ion Fe^{+2} , transformándolo a su estado insoluble. Los resultados de la etapa son muy variables, dependiendo principalmente de la duración de la fase, de las características del agua y del caudal de aire en el sistema, entre otros factores.

c) Fase de Sedimentación.

Al finalizar la fase de aireación se detiene la agitación del agua, quedando en reposo, lo que permite que los óxidos de hierro precipiten hasta el fondo del tanque en un determinado intervalo de tiempo por acción de la gravedad, dejando clarificado el efluente. De esta manera se separan las partículas de hierro del agua tratada.

d) Fase de Vaciado.

El agua utilizada como muestra de laboratorio en el análisis de concentración de hierro, se retirara por los orificios laterales, mientras que el resto se vaciara de forma manual. Luego se realizara un lavado del tanque de aireación para remover los precipitados de hierro.

3.2.3 Metodología de ensayos

En la planeación del experimento se debe precisar cómo se van a manipular las variables independientes y cómo se medirán las dependientes.

En este caso las variables independientes son el tiempo de contacto de la aireación y la concentración de oxígeno disuelto en la muestras de agua, lo cual está en función de los caudales aplicado por la bomba de aire. La manipulación de estas variables se realiza en dos modalidades (utilizando un caudal de aireación de 3,7[l/min] y otro de 9,2 [l/min]) y a varios niveles de duración del tiempo de aireación. Los valores cuantitativos de la manipulación controlada de las variables independientes se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Variables Independientes Experimentales.

Ensayo	Volumen muestra [l]	Caudal de aire [l/min]	Tiempo de contacto [min]
1	8	3,7	30
2	8	3,7	60
3	8	3,7	120
4	8	3,7	240
5	8	9,2	30
6	8	9,2	60
7	8	9,2	120
8	8	9,2	240

Se pretende analizar el efecto de la aireación en función del tiempo, aplicando distintas intensidades con el fin de determinar cómo las condiciones de duración y oxigenación del agua influyen en la magnitud de la variable dependiente (concentración de hierro en las muestras de agua aireadas). El instrumento de medición utilizado para cuantificar la concentración de oxígeno disuelto en las muestras de agua es un oxímetro modelo YSI 550A. Éstas se realizan introduciendo la sonda con sensor polarográfico del oxímetro en el centro del tanque de aireación. Luego se toma una medición en la superficie y otra en la mitad del volumen utilizado, promediando las dos concentraciones. Esto se realiza a una frecuencia de 5 minutos hasta los 30 minutos del proceso de aireación. Después de este tiempo, la frecuencia de medición cambia a 10 minutos.

Al cumplir con los tiempos de contacto planificados, la agitación producida por la aireación finaliza, quedando el agua en reposo. Esto permite que el hierro oxidado sedimente hasta el fondo del tanque. Para lograr esto, se utiliza un intervalo de 30 minutos después de finalizar el proceso de aireación, para tomar las muestras por los orificios laterales del tanque de aireación.

Para determinar qué efectos tienen los tiempos de sedimentación en la variable dependiente, se esperaron los 30 minutos iniciales, para luego tomar muestras a una hora y dos horas después de terminada la fase de aireación en el ensayo 7.

Luego de tener todas las muestras ensayadas, estas se envían al laboratorio Biodiversa para medir las concentraciones de hierro presente en el agua. Esto se realiza a través del ensayo de Espectrofotometría por Absorción Atómica (detalle Anexo B). Finalmente al tener estos datos cuantitativos, se podrá analizar los efectos de las variables independientes sobre la variable dependiente.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Este capítulo tiene por finalidad exponer los datos cuantitativos medidos en la etapa experimental (variables independientes), como también estudiar los resultados de los ensayos de aireación, proporcionados por el laboratorio Biodiversa (variable dependiente).

Para comenzar se establecerá el comportamiento de las variables independientes (Tiempo de aireación y concentración de oxígeno disuelto) a través de los datos experimentales, con el propósito de precisar la relación existente entre ambas. Posteriormente se analizan los resultados de las concentraciones de hierro presentes en las muestras de agua tratada, con el objetivo de determinar el efecto de las variables experimentales en la oxidación de este metal. Finalmente se estudia la influencia de los tiempos de sedimentación en la remoción de hierro.

4.1 Oxígeno Disuelto en Función del Tiempo de Aireación.

4.1.1 Relación entre variables independientes.

Tabla2. Resumen de Datos medidos en el Ensayo.

Ensayo	C.A [l/min]	T.C[min]	C.I.O.D [mg/l]	C.R.O.D[mg/l]
1	3,7	30	2,86	6,08
2	3,7	60	3,11	6,47
3	3,7	120	3,62	6,57
4	3,7	240	3,75	6,66
5	9,2	30	2,67	8,36
6	9,2	60	3,01	8,57
7	9,2	120	3,61	8,69
8	9,2	240	3,72	8,7

La tabla 2 entrega un resumen de los datos medidos en la ejecución de los ensayos de aireación. (Los datos están de forma detallada en anexo B). Estos son el caudal de aire (C.A), los tiempos de contacto (T.C), la concentración inicial de oxígeno disuelto (C.I.O.D) y la concentración máxima de oxígeno disuelto (C.M.O.D). La concentración inicial se refiere al oxígeno disuelto en las muestras de agua cruda, medidas antes de ejecutar los ensayos. La máxima, son las mayores

concentraciones medidas en la ejecución de la fase de aireación. La figura 6 muestra el comportamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto transferido por la bomba de aire a través del tiempo.

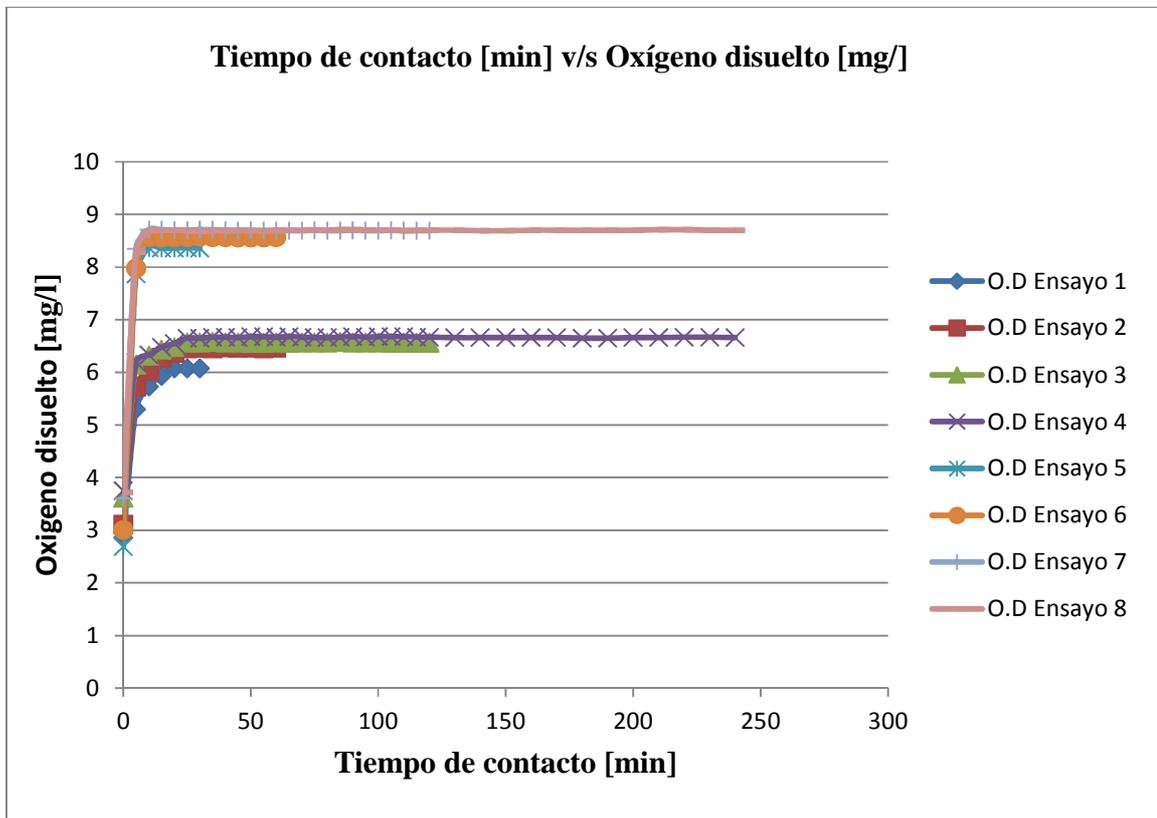


Figura 6. Variación de las concentraciones de oxígeno en función del tiempo de aireación.

En los primeros minutos del proceso se presenta una variación en la concentración, la cual se eleva hasta un valor máximo que se mantiene constante en el tiempo. Esto se explica por la teoría de la doble película propuesta por Lewis y Whitman, en la cual existen dos capas en la interfase gas- líquido, una capa gaseosa y otra líquida, la cual aporta la mayor resistencia en el paso de las moléculas de oxígeno a la masa líquida. Inicialmente se transfieren las moléculas de oxígeno a la superficie del líquido y las concentraciones varían hasta lograr una condición de saturación o de equilibrio en la interfase, lo que permite a estas moléculas atravesar la capa líquida, logrando que ambos fluidos se mezclen. Al suceder esto, se alcanza una concentración de oxígeno que permanece constante en el tiempo.

En los ensayos realizados con diferentes caudales de aireación se observan diferencias, tanto en el lapso de tiempo necesario para llegar al punto de saturación, como en la concentración de

oxígeno disuelto en la masa líquida. En el caso donde se utiliza un mayor flujo de aire, existe un menor intervalo de tiempo para llegar a este valor y las concentraciones son mayores, debido principalmente al aumento de la velocidad del movimiento de las moléculas a través de la interfase.

4.2 Análisis de Oxidación de Hierro.

La tabla 3 expone las concentraciones de hierro (C.H) en las muestras de agua cruda del sector de estudio y en el agua tratada a través de aireación. Se utiliza un tiempo de sedimentación de 30 minutos, en el cual se dejó en reposo el agua tratada, con la finalidad de que las partículas de hierro oxidadas precipiten al fondo del tanque de aireación.

Tabla 3. Concentración de Hierro en las Muestras Experimentales.

Muestra	Tipo de muestra	T.A [min]	C.A [l/min]	C.H [mg/l]	% Oxidación
1	Agua cruda	0	0	1,83	0
2	Agua cruda	0	0	1,92	0
3	Ensayo	30	3,7	1,585	15,46
4	Ensayo	30	9,2	1,411	24,74
5	Ensayo	60	3,7	1,31	30,13
6	Ensayo	60	9,2	1,263	32,64
7	Ensayo	120	3,7	0,916	51,14
8	Ensayo	120	9,2	0,624	66,72
9	Ensayo	240	3,7	0,817	56,42
10	Ensayo	240	9,2	0,562	70,02

4.2.1 Caracterización agua bruta.

Se tomaron dos muestras del agua cruda del sector de estudio, las cuales dieron como resultados concentraciones de hierro de 1,83 [mg/l] y 1,92[mg/l]. Esto indica que las concentraciones superan el límite permisible por la norma de calidad de agua potable, la cual establece límites de 0,3 mg/l, por lo que se puede afirmar que el agua de abastecimiento de este sector posee una alta concentración de hierro (superan en más de 6 veces lo establecido por la norma), lo que acarrea efectos nocivos para los usuarios que la consumen (mal apariencia estética, sabor y olor desagradable, entre otras cosas).

Una de las propiedades fundamentales en la capacidad de oxidación del ión Fe^{+2} es el pH del agua. En el sector de estudio se encontró un pH de 7.3, lo cual favorece la utilización de la aireación en la oxidación del hierro disuelto en el agua cruda, ya que estudios experimentales encontrados en la literatura aseguran que este método es efectivo en aguas con pH mayores a 7.

4.2.2 Efectos de las variables independientes en la concentración de hierro.

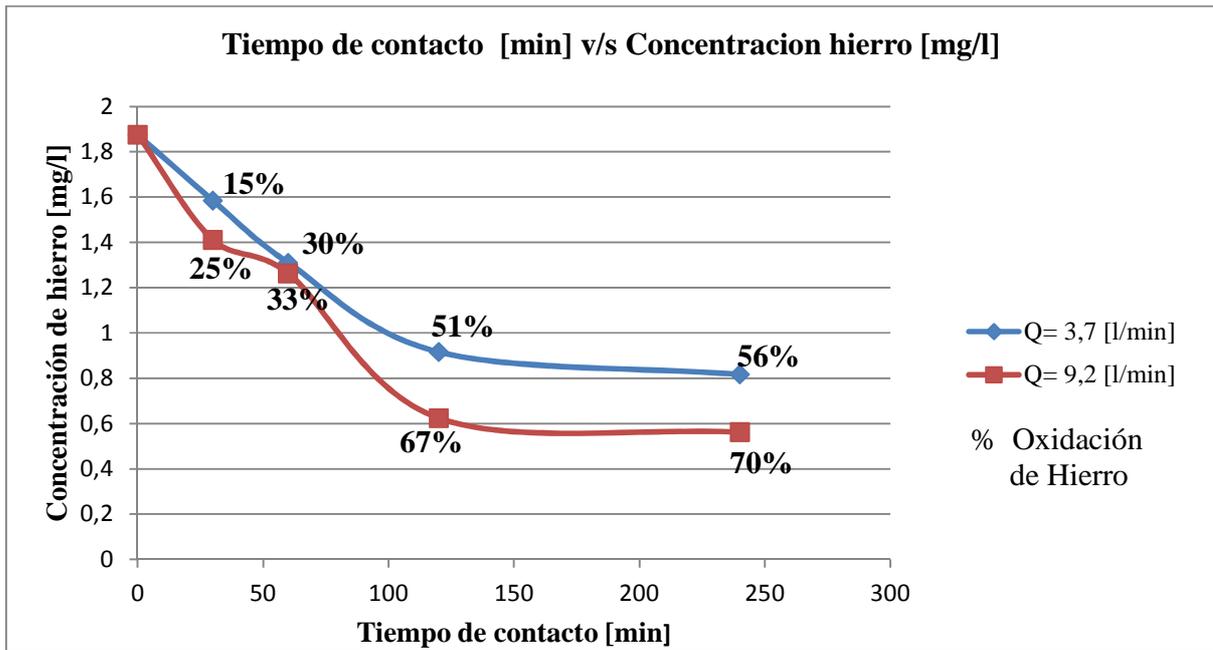


Figura 7. Concentración de Hierro en Función del Tiempo de Aireación.

En la figura 7 se muestran las curvas que exponen el efecto del tiempo de aireación en la oxidación del hierro presente en las muestras de agua.

En las dos curvas se aprecia un comportamiento similar, en donde la oxidación del hierro va aumentando gradualmente a medida que se prolonga el tiempo de aireación. De los resultados se puede precisar que la oxidación es eficiente hasta la segunda hora, después de transcurrido este tiempo, ésta se vuelve lenta y por lo tanto ineficiente.

Hasta la primera hora, la oxidación del hierro es semejante en ambos casos. Pasado este tiempo, hasta las dos horas, comienzan a notarse cambios importantes en la oxidación, las cuales están fuertemente influenciados por los flujos de aire aplicados a las muestras. Del análisis de ambas curvas se aprecia que el porcentaje de oxidación es mayor en los ensayos donde se utilizó un mayor flujo de aire. Esto se muestra en la figura 8 donde se expone las concentraciones de hierro

presentes en las muestras en función de los caudales de aire aplicados (3,7 [l/min] y 9,2[l/min]) en los distintos tiempos de contacto.

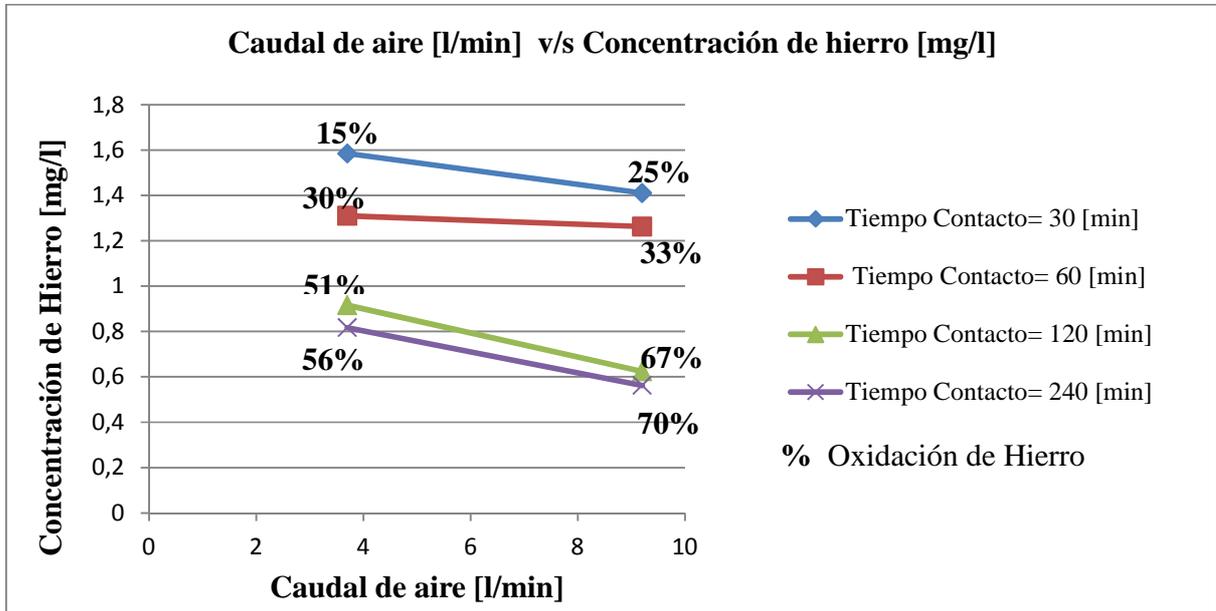


Figura 8. Concentración de Hierro en Función de los Caudales de Aireación.

Analizando los resultados de la figura 8, se determina que el porcentaje de oxidación del hierro presente en las muestras, siempre será mayor en la modalidad donde se utiliza un mayor flujo de aire. Esto ocurre debido a que se aplica una mayor presión de aire a las muestras de agua, lo que aumenta la tasa de oxidación según lo establecido en la ecuación (2) que rige la cinemática de oxidación del hierro a través de aireación. Las otras variables presentes en la ecuación son constantes e iguales para ambos flujos, por lo que no son relevantes en este estudio.

En los ensayos con un flujo de 3,7 [l/min] se observa un aumento gradual en el porcentaje de oxidación, el cual pasa de un 15% a un 30% entre los 30 minutos y la primera hora de aireación. Luego aumenta de forma significativa a un 51% a las dos horas de iniciado el tratamiento, incrementándose a un 56% a las cuatro horas, lo cual indica la baja oxidación del hierro después de las dos horas de aireación.

En el caso del flujo de 9,2 [l/min], ocurre algo similar al primer caso. Los porcentajes de oxidación aumentan de forma considerable entre la primera y la segunda hora (se incrementa de un 33% de oxidación en la primera hora a un 67% en la segunda hora de aireación.) y al igual que en el caso anterior, después de pasar este tiempo, el incremento en la oxidación del hierro tiene poca relevancia (aumenta de un 67% a un 70% en las cuatro horas de aireación.).

Realizando una comparación entre ambos casos, se puede determinar que la mayor diferencia de oxidación de hierro es a las dos horas de aireación y ésta es de un 16% aproximadamente. En la primera media hora se alcanza un 10% de diferencia y luego esta disminuye al 3% en la primera hora, el cual es el tiempo donde la oxidación tiene un mayor grado de similitud para ambos flujos. Finalmente, a las cuatro horas la diferencia de oxidación existente alcanza un 14% aproximadamente.

4.2.3 Tiempo de sedimentación.

La sedimentación es un procedimiento físico de separación sólido-líquido, en el que la principal fuerza que interviene es la de gravedad, en función de la densidad de las partículas disueltas en el líquido. Cuando la densidad de las partículas es mayor que la del agua, estas tienden a sedimentar basándose en la diferencia de pesos específicos.

La tabla 4 expone las concentraciones de hierro presentes en una muestra de agua que fue sometida a distintos tiempos de sedimentación.

Tabla 4. Efectos de los Tiempos de Sedimentación en la concentración de hierro.

Tiempo sedimentación [min]	Concentración hierro [mg/l]	% Oxidación
30	0,624	66,72
60	0,487	74,02
120	0,367	80,43

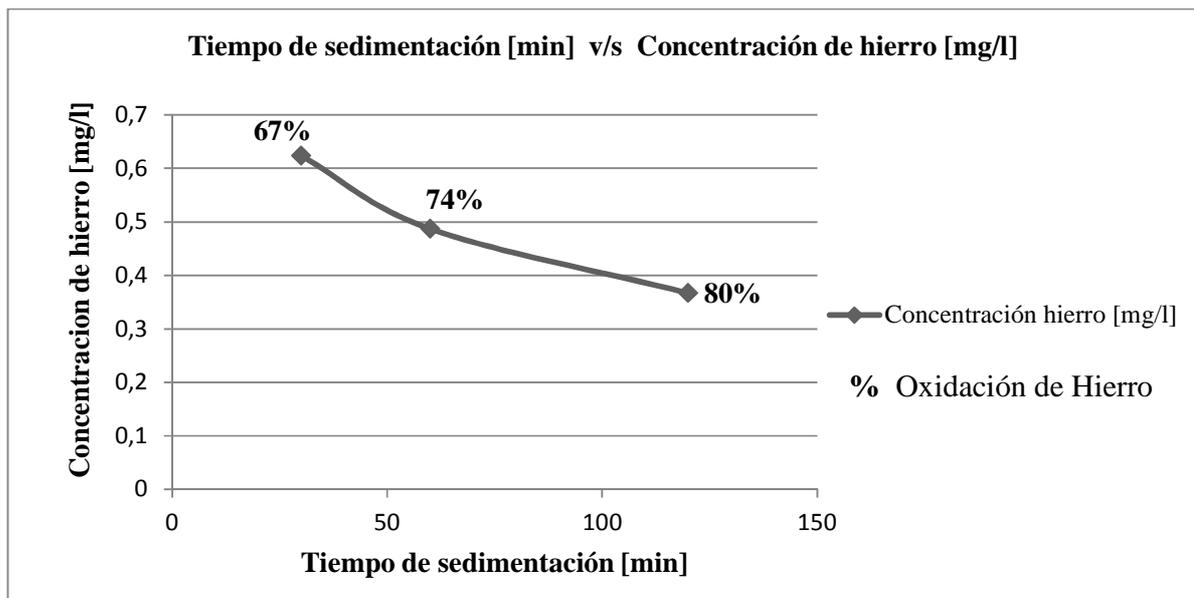


Figura 9. Efectos de los Tiempos de Sedimentación en la Concentración de hierro.

La figura 9 muestra el efecto que tiene el tiempo de sedimentación en las concentraciones de hierro presentes en la muestra de agua. Este intervalo de tiempo se inicia al finalizar la fase de aireación y se emplea para que los óxidos de hierro precipiten hasta el fondo del tanque, logrando que se separen las partículas sólidas del agua tratada.

En este estudio se utilizan tiempos de sedimentación de treinta minutos, una hora y dos horas. De los datos, se puede determinar que existen diferencias importantes en los porcentajes de oxidación de hierro en los distintos tiempos utilizados. El porcentaje de hierro oxidado tiene un aumento considerable entre los treinta minutos y la primera hora de sedimentación. En el transcurso de este tiempo aumenta aproximadamente un 7%, mientras que entre la primera y la segunda hora aumenta aproximadamente un 6 %.

De los resultados se puede establecer la importancia que tiene esta variable en la disminución de las concentraciones de hierro presentes en el agua, por lo que se debe estudiar más detalladamente con el fin de lograr una mayor eficiencia en la remoción del hierro a través de la aireación.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El capítulo final de este estudio, entrega las conclusiones obtenidas de los resultados de la etapa experimental. Al término del capítulo se presentarán recomendaciones para nuevas líneas de investigación de futuros proyectos de título a realizar.

5.1 Conclusiones

- La concentración de oxígeno en el agua tratada con aireación, es directamente proporcional con la intensidad de aire aplicado. El tiempo que tarda el líquido en alcanzar su valor máximo de oxígeno disuelto, depende en gran medida de la cantidad de flujo de gas suministrado al medio. A mayor flujo de aire, mayor rapidez para saturar de oxígeno el volumen de agua utilizado (mayor velocidad de transferencia de oxígeno al agua).
- La transferencia de oxígeno en la masa líquida, produce una disminución en las concentraciones de hierro presentes en las muestras. La magnitud de la oxidación está influenciada por las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua y por los tiempos de contacto. A una mayor intensidad de aire aplicado y tiempos de contactos más prolongados, existirá una mayor oxidación del hierro en el agua tratada.
- La oxidación del hierro en las muestras de aguas es eficiente hasta la segunda hora de aireación, después de transcurrido este tiempo ésta se vuelve lenta, disminuyendo drásticamente. La intensidad de aire aplicado tiene su mayor influencia en la tasa de oxidación, entre la primera y la segunda hora de iniciado el proceso.
- Mientras mayor sea el tiempo de sedimentación utilizado en el agua tratada, mayor será el asentamiento de los óxidos de hierro presentes en las muestras, por lo que las concentraciones de este metal disminuirán en forma considerable. Por lo cual la relación existente entre estas dos variables es inversamente proporcional. Éste se debe planificar para que sea económicamente aceptable, por este motivo es necesario optimizar el tiempo de reposo del agua tratada.

- El sistema de aireación brinda fácil operación y mantención en sectores que tienen problemas con la concentración de hierro presente en el agua de abastecimiento. Además el precipitado producido por la oxidación es fácil de filtrar, a diferencia de lo que ocurre al utilizar productos químicos. Por este motivo se concluye que este sistema es viable técnicamente, ya que es un sistema relativamente eficiente, confiable y de fácil uso. Se requiere más investigaciones experimentales que permitan comprender el fenómeno de mejor manera, con el fin de aumentar su eficiencia en la remoción de hierro.

5.2 Recomendaciones.

La realización de esta experiencia permitió observar que el campo de investigación del efecto de la aireación en la remoción de hierro en aguas de abastecimiento es amplio ya que influyen una gran cantidad de variables. Por este motivo se recomienda continuar con la investigación. Dentro de las líneas recomendadas se pueden observar algunos de los siguientes ítems:

- Continuar la línea investigativa a través de ensayos experimentales que permitan optimizar los tiempos de contacto utilizados en este estudio, para que el sistema sea más eficiente en la oxidación del hierro.
- Investigar experimentalmente las características del agua que restringen o aceleran la oxidación del hierro a través de aireación (influencias del pH, temperatura del agua, materia orgánica, etc).
- Analizar los compuestos que precipitan a través de la aireación, con el objetivo de precisar el grado de filtrabilidad y determinar las alternativas más eficientes para eliminar dichos precipitados.
- Establecer un diseño a escala real que permita solucionar la problemática provocada por el hierro presente en el agua de abastecimiento, identificando los requerimientos necesarios para implementar el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

Avendaño, N., & Córdón, O. (1999). Aplicación de estudio de laboratorio al diseño de plantas de tratamiento de aguas. XXI Congreso Centroamericano y nacional de ingeniería sanitaria y ambiental, Octubre de 1999. Guatemala.

Bulbano, L., & Sánchez, L. (2005). Remoción de hierro y manganeso por oxidación-Filtración para agua potable. Seminario internacional: Visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua, Noviembre del 2005, Cali, Colombia.

Barrera, S., & Campo, A. (2005). Estudio de la cinética de oxidación de hierro en sistemas acuosos orientada hacia la absorción de oxígeno. Tesis magister en ingeniería, Departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Cleasby, J. (1975). Iron and Manganese Removal – A Case study. *Journal American Water Works*, 67(3), 147–149.

Degremont (1989). Manual Técnico del agua. Editorial Degremont, Bilbao.

Ghosh, M.M., O'Connor, J.T. and Engelbrecht, R.S. (1966). Precipitation of iron in aerated groundwater. *Journal of Sanitary Engineering Division- ASCE*, 90 (SA1), 199-213.

Instituto nacional de Normalización. (2005). Norma Chilena 409/1 Of 2005: Agua Potable - Parte 1- Requisitos. Chile: Autor

Montoya, D.A., & Bermúdez, M.Y. (2003). Modelamiento de la transferencia de oxígeno para el cultivo de microorganismos en un biorreactor de columna de burbujeo. Proyecto final (Titulo ingeniero químico), Departamento de Ingeniería química, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Moreno, J., & Buitron, G. (2002). Optimización de un biorreactor aerobio para el tratamiento de aguas residuales industriales. *Computación y sistemas, número especial pp. 074-082.*

Ramalho, R.S. (1998). *Tratamiento de aguas residuales* (2ª Ed.). Barcelona: Reverté S.A.

Samad, Z.B. (2005). Study of iron and manganese removal in river water for textile industry usage. M.Eng thesis, University Technology Malaysia, Malaysia.

Sharma, S.K. (2001). Adsorptive iron removal from groundwater. PhD thesis, The Academic Board of Wageningen University and the Academic Board of the International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Netherlands.

Stumm, W. and Lee, G.F. (1961) Oxygenation of ferrous iron. *Industrial Engineering and Chemistry*, 53 (2), 143-146.

ANEXOS

ANEXO A: COMPLEMENTO DEL ESTADO DEL ARTE30

ANEXO B: DATOS CUANTITATIVOS DE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO 33

ANEXO C: ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO 38

Lista de Ecuaciones Anexos.

Ecuación A.1 Transferencia de Oxígeno en equilibrio discontinuo.....30

Ecuación A.2 Reacción Oxidación del Hierro por Aireación31

Lista de Figuras Anexos.

Figura B.1. Cronómetro digital33

Figura B.2. Oxímetro Modelo YSI 550A33

Figura C.1. Ubicación Laboratorio Biodiversa38

Figura C.2. Envases de polietileno de alta densidad para la toma de muestras39

Figura C.3. Espectrofotómetro de absorción atómica40

Lista de Tablas Anexos.

Tabla B.1. Datos ensayos experimentales34

Tabla B.2. Datos variables experimentales ensayo 134

Tabla B.3. Datos variables experimentales ensayo 234

Tabla B.4. Datos variables experimentales ensayo 335

Tabla B.5. Datos variables experimentales ensayo 435

Tabla B.6. Datos variables experimentales ensayo 536

Tabla B.7. Datos variables experimentales ensayo 636

Tabla B.8. Datos variables experimentales ensayo 736

Tabla B.9. Datos variables experimentales ensayo 837

ANEXO A: COMPLEMENTO DEL ESTADO DEL ARTE

A.1 Transferencia de Oxígeno

La transferencia de oxígeno para condiciones de equilibrio discontinuo, con flujo estacionario y semiestacionario se determina con la expresión:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a * (C_s - C) \quad \text{Ec. (A.1)}$$

Dónde:

$$\frac{dC}{dt} = \text{Masa de oxígeno transferido en una cierta cantidad de tiempo.} \left[\frac{\text{Kg } O_2}{h} \right]$$

$$K_L a = \text{Coeficiente global de transferencia de oxígeno.} \left[h^{-1} \right]$$

$$C_s = \text{Concentración de saturación del gas en el líquido.} \left[\frac{mg}{l} \right]$$

$$C = \text{Concentración del gas en la fase líquida, para el tiempo t.} \left[\frac{mg}{l} \right]$$

El coeficiente global de transferencia de oxígeno está determinado por la velocidad a la cual las moléculas de oxígeno pasan a través de la capa límite. Éste puede incrementarse por la reducción del tamaño de la capa límite al hacer más turbulenta la fase líquida y por el aumento de la velocidad del movimiento de las moléculas a través de la interfase. (Montoya, 2003)

Por lo general, la tasa de transferencia de oxígeno es proporcional a la diferencia entre el valor de saturación de oxígeno disuelto en la interfase de la película líquida y la concentración real de oxígeno en la masa de la fase líquida ($C_s - C$). Este valor se conoce como déficit de oxígeno y representa la fuerza que rige la transferencia de oxígeno. Eventualmente la fuerza señalada puede llegar a ser nula, en cuyo caso el oxígeno deja de ser transferido en la fase líquida.

A.2 Oxidación del hierro

A.2.1 Antecedentes Generales

Muchas reacciones químicas que tienen lugar en el medio acuático y en especial en el sistema de las aguas subterráneas, implica transferencia de electrones entre constituyentes disueltos, gases o

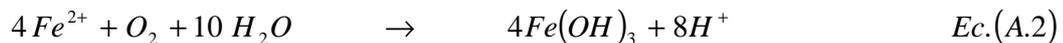
sólidos. Como resultados de estas transferencias se producen cambios en los estados de oxidación-reducción de los reaccionantes y los productos, que son fundamentales para comprender la remoción del hierro en las aguas de abastecimiento.

La especie química que entrega electrones es el agente reductor (especie que se oxida, aumentando su carga positiva) y la que los gana es el agente oxidante (especie que se reduce, aumentando su carga negativa). Estos procesos siempre ocurren simultáneamente ya que el número de electrones perdidos en la oxidación debe ser igual al número de electrones ganados en la reducción para mantener el equilibrio de la reacción.

La fortaleza de esta reacción se mide por el potencial redox (Eh). Este potencial se define como la presión electrónica existente en un líquido como resultado de las respectivas concentraciones de especies oxidantes productoras presentes y se mide en voltios. Un Eh positivo elevado significa abundancia de oxígeno y escasez de hidrógeno, mientras que un bajo Eh significa un potencial débil de oxidación (abundancia de hidrógeno y escasez de oxígeno).

La solubilidad del hierro en agua es favorecida por la prevalencia de condiciones ácidas y reductoras. Bajo condiciones oxidantes y alcalinas se favorece la oxidación del ión ferroso al ión férrico. Esto ocasiona la precipitación del hierro, ya que los compuestos férricos son insolubles en agua.

Las reacciones de oxidación utilizando la aireación en presencia de hierro es la siguiente:



En la estequiometría de la reacción entre el hierro y el oxígeno (Ecuación 2) se tiene en forma general que 4 moles de hierro reaccionan con un mol de oxígeno, es decir: al desarrollar la ecuación se obtiene que para oxidar 1 p.p.m de hierro se requiere 0,14 p.p.m de oxígeno disuelto. (Petrusevski, 2003; citado por Bulbano y Sanchez, 2005)

Según Sharma (2001), es importante señalar que los precipitados de hierro formado después de la oxidación de Fe^{2+} es un complejo de diferentes especies y la representación de los $Fe(OH)_3$ (hidróxidos férricos) no son más que una simplificación de la realidad.

A.2.2 Hierro precipitado.

En el agua subterránea natural, el hierro soluble existe principalmente en el estado bivalente. El hierro férrico trivalente también puede existir en forma soluble, especialmente en acuíferos donde se ha encontrado valores bajos de pH. En aguas alcalinas desprovistas de sulfuros, fosfatos y

componentes orgánicos, el hierro precipitara de solución acuosa a hidróxido ferroso, carbonato ferroso, hidróxido férrico, o mezclas de estos, dependiendo de los agentes oxidantes y del pH. (Ghosh y O'Connor, 1966)

La calidad de los precipitados del hidróxido férrico y ferroso son muy similares, éstos consisten en muchas partículas pequeñas, que están agrupadas juntas a una masa gelatinosa. Cada partícula individual aparece rodeada por esferas de agua. Estos hidróxidos precipitan formando masas gelatinosas impermeables que son muy difíciles de filtrar.

Los carbonatos precipitados son muy diferentes de los hidróxidos. Sus partículas son cristalinas y largas y no se encuentran rodeados por gotas de agua, lo que permite que sean muy filtrables.

Ghosh & O'Connor (1966) establecieron que en aguas subterráneas con alta alcalinidad los precipitados formados después de la aireación son principalmente carbonatos más que hidróxidos, y una gran parte del hierro precipitado está en el estado ferroso más que en la forma férrica. Cleasby (1975) indicó que el producto más probable al utilizar oxidantes fuertes como permanganato, cloro u ozono, es un precipitado en forma de hidróxido.

ANEXO B: DATOS CUANTITATIVOS DE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO.

Este anexo presenta los instrumentos de medición y los datos cuantitativos entregados por la ejecución de los ensayos. Se determinan los valores de las variables independientes.

B.1 Instrumentos de medición.

Para la medición de los tiempos de contacto se utilizó un cronómetro digital (Figura A.1), en el cual se determinan los tiempos respectivos de cada ensayo.



Figura B.1. Cronómetro digital.

Para medir el oxígeno disuelto se utiliza un oxímetro modelo YSI 550A (figura A.2), Este es un sistema portable de medición digital, basado en una sonda con sensor polarográfico unida al instrumento.



Figura B.2. Oxímetro modelo YSI 550A

B.2 Datos experimentales.**Tabla B.1. Datos ensayos experimentales**

Ensayos	Caudal de aire [l/min]	Tiempo de contacto [min]
1	3,7	30
2	3,7	60
3	3,7	120
4	3,7	240
5	9,2	30
6	9,2	60
7	9,2	120
8	9,2	240

Tabla B.2. Datos variables experimentales ensayo 1

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	2,86	20
5	5,3	20
10	5,73	20
15	5,93	20
20	6,08	20
25	6,08	20
30	6,08	20

Tabla B.3. Datos variables experimentales ensayo 2.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	3,11	19
5	5,73	19
10	6,03	19
15	6,28	19
20	6,37	19
25	6,46	19
30	6,47	19
40	6,48	19
50	6,47	19
60	6,47	19

Tabla B.4. Datos variables experimentales ensayo 3.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	3,62	18
5	6,15	18
10	6,32	18
15	6,43	18
20	6,48	18
25	6,57	18
30	6,57	18
40	6,57	18
50	6,56	18
60	6,57	18
70	6,57	18
80	6,57	18
90	6,57	18
100	6,57	18
110	6,56	18
120	6,56	18

Tabla B.5. Datos variables experimentales ensayo 4.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	3,75	18
5	6,19	18
10	6,33	18
15	6,48	18
20	6,55	18
25	6,65	18
30	6,65	18
40	6,67	18
50	6,68	18
60	6,67	18
70	6,67	18
80	6,66	18
90	6,68	18
100	6,68	18
110	6,68	18
120	6,67	18
130	6,66	18
140	6,66	18
150	6,66	18
160	6,66	18
170	6,66	18
180	6,65	18
190	6,65	18
200	6,66	18
210	6,66	18
220	6,67	18
230	6,67	18
240	6,66	18

Tabla B.6. Datos variables experimentales ensayo 5.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	2,69	21
5	7,87	21
10	8,37	21
15	8,36	21
20	8,36	21
25	8,37	21
30	8,36	21

Tabla B.7. Datos variables experimentales ensayo 6.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	3,01	20
5	7,98	20
10	8,57	20
15	8,56	20
20	8,56	20
25	8,57	20
30	8,58	20
40	8,57	20
50	8,56	20
60	8,57	20

Tabla B.8. Datos variables experimentales ensayo 7.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	3,61	18
5	8,35	18
10	8,71	18
15	8,71	18
20	8,7	18
25	8,7	18
30	8,71	18
40	8,7	18
50	8,7	18
60	8,69	18
70	8,69	18
80	8,69	18
90	8,7	18
100	8,69	18
110	8,69	18
120	8,69	18

Tabla B.9. Datos variables experimentales ensayo 8.

Tiempo de contacto [min]	Oxígeno disuelto [mg/l]	Temperatura [°C]
0	3,72	18
5	8,28	18
10	8,69	18
15	8,7	18
20	8,7	18
25	8,69	18
30	8,68	18
40	8,69	18
50	8,69	18
60	8,7	18
70	8,7	18
80	8,7	18
90	8,71	18
100	8,7	18
110	8,69	18
120	8,7	18
130	8,7	18
140	8,69	18
150	8,69	18
160	8,7	18
170	8,7	18
180	8,7	18
190	8,7	18
200	8,7	18
210	8,71	18
220	8,71	18
230	8,7	18
240	8,7	18

ANEXO C: ANÁLISIS DE CONCENTRACIÓN DE HIERRO.

Este anexo presenta el lugar de análisis, el método utilizado para tomar las muestras y el ensayo empleado para medir las concentraciones de hierro presentes en las muestras de agua.

C.1 Lugar de análisis.

El análisis se realiza en el laboratorio Biodiversa, el cual se encuentra ubicado en el interior de la planta La Mochita de Esbío (figura C.1). Esta es una planta de tratamiento de agua potable, la cual abastece a gran parte de las ciudades de Concepción y Talcahuano y a sectores aledaños, con una población actual del orden de los 502.000 habitantes. Fue diseñada en el año 1963 por The Ionac Company (Permutit) y construida entre los años 1964 y 1969.

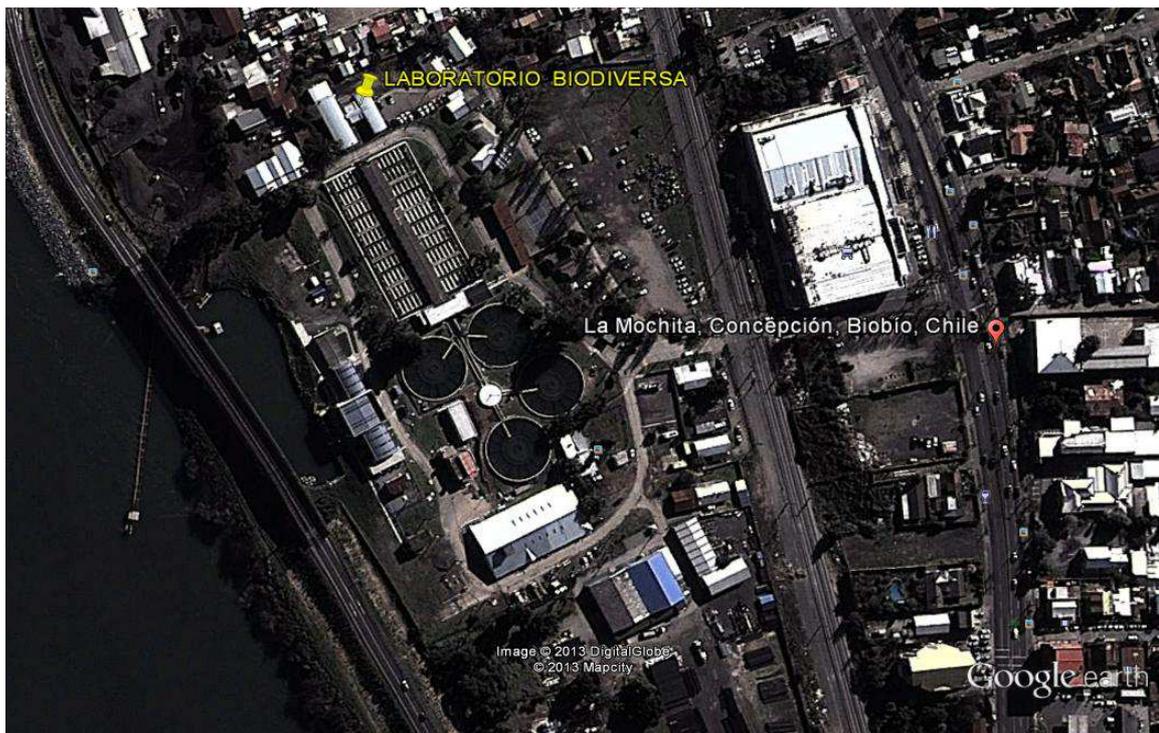


Figura C.1. Ubicación Laboratorio Biodiversa.

Este laboratorio cuenta desde el año 2005 con la certificación ISO 17.025, lo que garantiza la confiabilidad y calidad de los análisis. Además desde el año 2007 está acreditado en el área de Muestreo (NCh. 411/10 Of. 2005), Convenio INN-SISS.

C.2 Toma de muestras

La recolección y posterior manejo de las muestras deben ser manipuladas de tal forma, que no ocurran cambios significativos en su composición antes de la realización de los ensayos, ya que estas condicionan los resultados analíticos que permiten interpretar las características de la calidad del agua. Por este motivo se deben utilizar envases que permitan que la recolección y el transporte de las muestras sean los adecuados para tal fin, como también que los preservantes sean los adecuados para cada tipo de parámetro.

En este caso, donde el parámetro que se desea determinar es la concentración de hierro, el envase a utilizar según lo establecido por el manual de métodos de ensayo para agua potable, debe tener un volumen mínimo de 1 litro y este puede ser de polietileno de alta densidad o de vidrio. El envase debe ser enjuagado con ácido nítrico, el cual es un preservante que se utiliza para disminuir lo máximo posible, las reacciones químicas, físicas y biológicas que se puedan producir durante el transporte y almacenamiento de las muestras. Las muestras se acidifican para estabilizarlas. Porque al disminuir el Ph, cualquier precipitado ferroso se devuelve a la solución y se mide junto con el hierro ferroso de la solución. Esto se puede referir como el total del hierro ferroso.

Para la realización del presente trabajo investigativo, se utilizaron envases de polietileno de alta densidad (Figura C.2) para la recolección de muestras en terreno y del agua tratada a través de aireación, las cuales posteriormente se llevaron al laboratorio para su análisis de concentración de hierro.



Figura C.2. Envases de polietileno de alta densidad para la toma de muestras.

C.3 Ensayo de Espectrofotometría por absorción atómica.

Las muestras que contienen material particulado o materia orgánica, generalmente requieren pretratamiento antes del análisis espectroscópico. Éstas se deben someter a un pretratamiento previo de digestión, para liberar todo el hierro presente, que puede estar formando parte de la materia suspendida o coloidal. Para muestras de agua potable, transparentes, incolora e inodora, con turbiedad < 1 UNT, puede obviarse el pre- tratamiento de digestión para analizar por lectura directa.

En este ensayo se aplica energía en forma de radiación monocromática característica del elemento a determinar, la cual se obtiene de una lámpara de cátodos huecos. Una fracción de muestra es aspirada hacia una llama aire – acetileno posicionado en el paso óptico de un espectrofotómetro de absorción atómica (Figura C.3). La muestra en estas condiciones es atomizada. La población de átomos al estado elemental absorbe radiación característica proveniente de una fuente de emisión de líneas atómicas de Fe, la relación entre potencia incidente y potencia transmitida es una medida de la concentración del elemento en la muestra.



Figura C.3. Espectrofotómetro de absorción atómica.