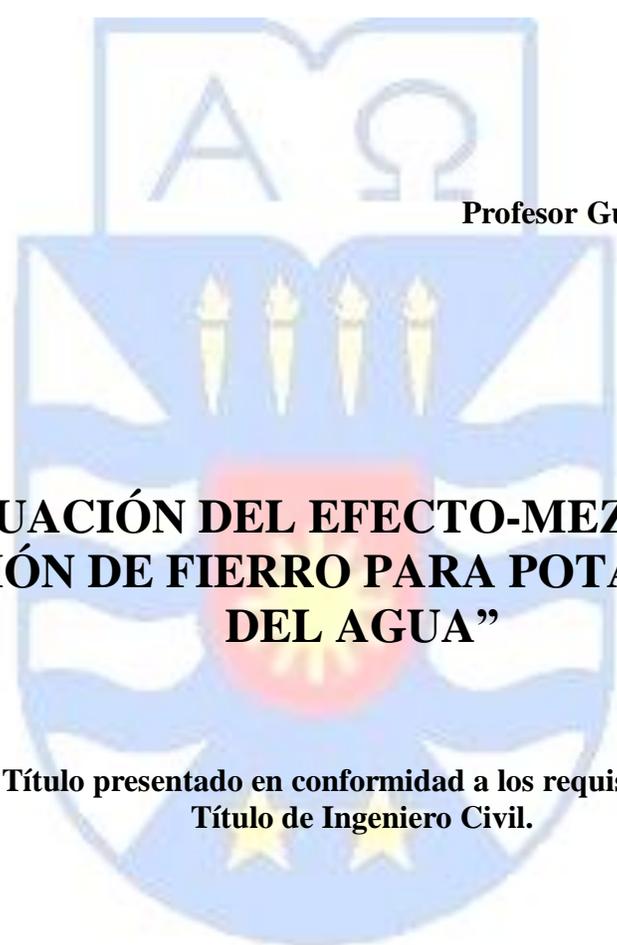


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



Profesor Guía: Pedro Cisterna Osorio.

“EVALUACIÓN DEL EFECTO-MEZCLA EN LA OXIDACIÓN DE FIERRO PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA”

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

RODRIGO ARMANDO GÓMEZ NÚÑEZ.

Concepción, Diciembre de 2013.

EVALUACIÓN DEL EFECTO-MEZCLA EN LA OXIDACIÓN DEL FIERRO PARA POTABILIZACIÓN DE AGUA.

RODRIGO ARMANDO GÓMEZ NÚÑEZ

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

roagomez@alumnos.ubiobio.cl

PROFESOR PATROCINANTE

Sr. Pedro Cisterna Osorio

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

Debido a que en Chile, los servicios básicos se centralizan en las grandes urbes, los pobladores de sectores rurales deben vivir la realidad de no contar con agua potable para abastecerse. Este es un gran problema debido a que, para satisfacer este tipo de necesidad, la población debe recurrir a la extracción de aguas subterráneas, ya que son de mejor calidad y más fáciles de explotar que las aguas superficiales. Pero estas aguas subterráneas llegan a presentar altos niveles de contenido de hierro, que sobrepasan de gran manera las cantidades establecidas en la norma Chilena de agua potable.

El objetivo de esta tesis es crear un modelo físico de purificación de aguas subterráneas, el cual extraiga el exceso de hierro presente en estas aguas, empleando un sistema de aireación a través de difusores de aire, utilizando distintos tamaños de burbujas. Esto permitirá variar el área de contacto entre en agua y el aire proporcionado para la oxidación del hierro, y encontrar un tiempo efectivo de Sedimentación donde la concentración de hierro cumpla con la normativa Chilena vigente.

Palabras Claves: Purificación, Aireación, Sedimentación, área de contacto.

ABSTRACT

The people who live in rural zones must deal with the reality of living without drinkable water to their use because in Chile the basics services focuses in big cities. This is an important problem because the way to satisfy this need is through the groundwater extraction due to its better quality and besides is easier to exploit than the surface water. But this groundwater has high levels of iron which greatly exceed the established amounts by the drinkable water Chilean standards.

The aim of this thesis is to create a physical model of groundwater purification which extract the iron excess present in this water by using an aeration system through air diffusers using different bubbles size. This allows varying the contact area between water and the provided air for iron oxidation and finding an effective sedimentation time where the iron concentration meets the currents Chilean standards.

Keywords: purification, aeration, sedimentation, contact area.

7.483 Palabras + 10 Figuras / Tablas * 250 = 9.983 Palabras.

INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA INVESTIGATIVO.....	1
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DE PROPUESTA.....	3
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. <i>Objetivo General:</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos Específicos:</i>	4
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1. HIERRO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	5
2.1.1. <i>Antecedentes Generales:</i>	5
2.1.2. <i>Criterio de calidad en aguas subterráneas de consumo.</i>	6
2.2. PROCESO DE AIREACIÓN Y TRANSFERENCIA DE OXÍGENO.....	7
2.2.1. <i>Proceso de Aireación:</i>	7
2.2.2. <i>Transferencia de Oxígeno:</i>	8
2.2.3. <i>Factores que afectan la transferencia de oxígeno</i>	9
I. Tipo de régimen de flujo en el Tanque de Aireación:.....	9
II. Difusores de aire.....	10
III. Disposición y Profundidad de los difusores de aire.....	13
2.3. PROCESO DE SEDIMENTACIÓN.....	14
2.3.1. <i>Concepto de Sedimentación:</i>	14
2.3.2. <i>Tipos de Sedimentación:</i>	15
I. Sedimentación de partículas discretas.....	15
II. Sedimentación de Partículas Floculentas.....	15
III. Sedimentación por caída libre e interferida.....	15
IV. Sedimentación por compresión.....	16
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	18
3.1. METODOLOGÍA CUANTITATIVA.....	18
3.1.1. <i>Variables experimentales.</i>	18
3.1.2. <i>Recolección de Datos</i>	19
3.2. FASE EXPERIMENTAL.....	20
3.2.1. <i>Equipo experimental utilizado</i>	20
3.2.2. <i>Implementación y operación.</i>	20
3.2.3. <i>Descripción de Fases Experimentales.</i>	21
3.3. METODOLOGÍA DE ENSAYOS.....	22
3.3.1. <i>Proceso de Aireación</i>	22
3.3.2. <i>Proceso de Sedimentación.</i>	23
3.3.3. <i>Muestreo.</i>	23
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
4.1. AREA DE CONTACTO AIRE – AGUA.....	24
4.1.1. <i>Oxígeno disuelto</i>	24
4.1.2. <i>Remoción de Hierro</i>	26
4.2. SEDIMENTACIÓN.....	26

4.3. CONTENIDO DE HIERRO FINAL.	28
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
5.1. CONCLUSIONES EN BASE A LOS RESULTADOS.	30
5.2. CONCLUSIONES SOBRE LA VIABILIDAD DE PROPUESTA.	31
5.3. RECOMENDACIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
REFERENCIAS.	32
ANEXO A: DATOS CUANTITATIVOS FASE EXPERIMENTAL.	34
<i>A.1. Datos Experimentales de Entrada.....</i>	34
<i>A.2. Datos Experimentales de Salida.</i>	34
<i>A.3. Ensayos de Aireación con Burbujas Finas.....</i>	35
<i>A.4. Ensayos de Aireación con Burbujas Medianas.....</i>	37
<i>A5. Representaciones Gráficas de los resultados del Proceso de Aireación.....</i>	39
<i>A6. Representaciones Gráficas de los resultados del Proceso de Sedimentación.....</i>	41

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

El presente trabajo de investigación, pretende evaluar los efectos de la Aireación Difusa o por burbujeo en aguas subterráneas ferrosas, de modo que la inyección de oxígeno permita la oxidación del hierro, manipulando la variable independiente Área de Contacto entre el agua y el aire. Seguido a este proceso, se la muestra de agua será sometida a Sedimentación con el fin de evaluar la incidencia de los tiempos de residencia sobre la precipitación de las partículas oxidadas durante la Aireación.

Este capítulo expone el proyecto de tesis en cuestión, infiriendo acerca de la investigación pertinente del problema a resolver, luego dando una descripción del estudio realizado y justificando el sistema a utilizar con el fin de dar solución al problema planteado.

1.1. PROBLEMA INVESTIGATIVO.

El agua es un elemento fundamental para todas las formas de vida conocidas, sobre todo para nosotros los seres humanos quienes nos hemos desarrollado como civilización desde tiempos muy antiguos en torno a ella. De tal manera que la utilizamos inmensurablemente en el día a día. Por este motivo es que debe tener la calidad que nos permita manipularla y consumirla de manera segura, sin riesgos de sufrir efectos negativos, ya sea de salud, económicos, etc. Pero no todos contamos con el servicio de agua potable, debido a que en nuestro país encontramos una desconexión entre sectores rurales y las grandes ciudades, lo que lleva a buscar otras alternativas de abastecimiento del recurso hídrico.

La principal alternativa es la extracción de aguas subterráneas, en primer lugar porque son de mejor calidad que las aguas superficiales, debido a que las partículas suspendidas y microorganismos se retienen por filtración natural y las sustancias orgánicas se degradan por oxidación, y en segundo lugar porque son más fáciles de explotar debido a su alta circulación bajo la superficie de la tierra y su bajo costo de inversión para la extracción. Por lo general se encuentran aguas dulces, sin embargo son contaminadas muchas veces por la actividad humana o de forma natural.

Uno de los constituyentes que se presenta con mayor frecuencia en estas aguas es el hierro. Aparte de dureza, la presencia de hierro es probablemente el problema más común que enfrentan los consumidores y profesionales de tratamiento de agua.

La presencia de hierro en las aguas subterráneas, es debido a la gran cantidad de este metal presente en la corteza terrestre. Si bien no causa problemas de salud, el hierro puede darle al agua un sabor, olor y color indeseable.

El hierro causa manchas rojizas-cafés en la ropa, porcelana, platos, utensilios, vasos, lavaplatos, accesorios de plomería y concreto. Los depósitos de hierro se acumulan en los tubos de cañerías, tanques de presión, calentadores de agua y equipo ablandador de agua. Estos depósitos restringen el flujo del agua y reducen su presión, por tanto más energía se requiere para bombear agua a través de tubos tapados y para calentar agua si las tuberías están cubiertas con depósitos minerales, lo que aumenta los costos de la energía y por ende del agua.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.

La importancia de este proyecto de tesis gravita en el estudio y la optimización del área de contacto entre el agua y el aire, según el tamaño de la burbuja empleada en el sistema de purificación, mediante un proceso de aireación. Este se enfocará en medir el efecto de la aireación sobre el contenido mineral del agua, y posteriormente evaluar los tiempos de residencia del agua en el proceso de sedimentación implementado para la precipitación de las partículas de hierro anteriormente oxidadas.

En cuanto al sistema experimental utilizado, este consistirá en un proceso de Aireación – Sedimentación diseñado a escala de laboratorio, el cual trabajara inyectando aire en ciertos intervalos de tiempo, para poder evaluar los efectos conseguidos. El propósito del método planteado, es aumentar el contenido de oxígeno disuelto en el agua, lo que provocará una aceleración en la oxidación del hierro soluble, transformándolo en óxido de hierro no soluble y obteniendo precipitados los cuales sedimentarán por acción de la gravedad.

A través de esta investigación se desea perfeccionar el sistema anteriormente descrito, de manera que permita optimizar el efecto de la aireación para la oxidación del fierro, para así ser implementado a escala real con el fin de resolver el problema planteado.

1.3. JUSTIFICACIÓN DE PROPUESTA.

Para este problema que se presenta en muchas localidades rurales de nuestro país, se desea implementar un sistema simple y más asimilable para el usuario, con menores costos de operación y mantención.

La tecnología que se utilizará para llevar a cabo este proyecto de tesis se eligió tomando en cuenta la facilidad de manipulación para el grupo de personas beneficiadas, ya que no requiere de profesionales o de personal calificado para su ejecución.

Por otra parte, la tecnología que es principalmente utilizada por la mayoría de la población que se abastece de aguas subterráneas, trabaja a base de químicos que de por sí implican un costo elevado, y además, requiere de terceras personas para llevarlo a cabo, aumentando así la complejidad y el costo de operación.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo General:

Crear un modelo de purificación para eliminar hierro en aguas subterráneas utilizadas como abastecimiento, mediante un proceso de Aireación-Sedimentación.

1.4.2. Objetivos Específicos:

- ✓ Implementar un sistema de aireación difusa a escala de laboratorio.
- ✓ Manipular experimentalmente las variables como el “Tamaño de Burbujas” en el proceso de Aireación y los “Tiempos de Residencia” en el proceso de Sedimentación.
- ✓ Determinar los efectos que provoca la alteración del Tamaño de Burbuja y Tiempo Total de Sedimentación, en la concentración de hierro en el agua tratada.
- ✓ Obtener un sistema de Aireación-Sedimentación que a través de resultados experimentales, muestre mayor eficiencia de purificación.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.

En esta fase exploratoria se muestra la síntesis del material bibliográfico recopilado. En primer lugar se exponen los antecedentes generales vinculados a la remoción de hierro mediante procesos de aireación, y se definen los límites de concentración del contaminante, los cuales deberán ser concordantes con los resultados obtenidos al final de la etapa experimental. Seguido a esto, se define el proceso de aireación y la transferencia de oxígeno, detallando los factores que optimizan la depuración.

2.1. HIERRO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS.

2.1.1. Antecedentes Generales:

El hierro es encontrado en la mayoría de las aguas crudas debido a su alta presencia en la corteza terrestre, en numerosas formas: en solución verdadera, como coloide, en suspensión, o como un complejo con otra sustancia mineral u orgánica. La presencia de hierro en aguas subterráneas se atribuye principalmente a la disolución de las rocas que contienen hierro y minerales, principalmente óxidos, sulfuros, carbonatos y silicatos 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 es aproximadamente 5 mg/l, el contenido en la mayoría es menor a 5 mg/l (Hem, 1989; Davis, 1997; citado por Sharma, 2001).

El hierro, en aguas subterráneas, suele estar presente en su estado ferroso (Fe^{2+}) y en estado férrico (Fe^{3+}). El hierro férrico no complejo se encuentra en forma de precipitados, mientras que las formas disueltas pueden ser las siguientes:

- a) Hierro ferroso bivalente (Reducido), ya sea en forma Fe^{2+} o en forma de iones hidratados: $\text{Fe}(\text{OH})^+$ o $\text{Fe}(\text{OH})_3$. El ion Fe^{2+} se encuentra sobre todo en estado de hidrogenocarbonato o bicarbonato.

- b) Complejos (Oxidado): están formados por Fe^{2+} o Fe^{3+} . Proviene de los minerales y de la descomposición de material orgánico.

Para definir un tratamiento de desferrización, no basta conocer el contenido total de hierro, sino que deben conocerse igualmente las diferentes formas bajo las cuales puede presentarse este elemento.

2.1.2. Criterio de calidad en aguas subterráneas de consumo.

La calidad del agua es un término usado para describir las características químicas, físicas y biológicas del agua. Es un parámetro importante que afecta a todos los aspectos de los ecosistemas y del bienestar humano, como la salud de una comunidad, el alimento que se ha de producir, las actividades económicas, la salud de los ecosistemas y la diversidad biológica.

Para decidir si un agua califica para un propósito particular, su calidad debe especificarse en función del uso que se le va a dar. Para el presente informe se considera calidad del agua para consumo humano, por lo cual se establecen concentraciones límites para las diversas sustancias que la constituyen, los cuales se encuentran establecidos por la normativa chilena de agua potable (Nch409/1 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. Esta debe poseer la calidad bacteriológica y química que permita utilizarla para consumo, además de todos los usos domésticos que se le quiera dar. El límite permisible establecido para el hierro en las aguas de consumo 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. PROCESO DE AIREACIÓN Y TRANSFERENCIA DE OXÍGENO.

2.2.1. Proceso de Aireación:

La aireación es un proceso mediante el cual el agua se pone en contacto directo con el aire para modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella.

El objetivo principal del proceso de aireación, es la purificación de agua a través de la transferencia de oxígeno de la atmósfera para la oxidación de hierro disuelto a su forma insoluble y liberar el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno reduciendo así la corrosividad y eliminando olores (Nathanson, 2000).

Otra ventaja de la aireación es que aumentará el contenido de oxígeno disuelto en el agua, causando con ello, que esta tenga un aspecto brillante y un gusto "fresco".

La aireación trabaja gracias al contacto directo del agua 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.

Existen tres grandes tipos de aireación para fines de purificación de agua potable:

- a) *Aireación por Gravedad*: aplicación de aire en capas delgadas, cascadas, chorros y escaleras.
- b) *Aireación mecánica*: método en el cual el agua se agita vigorosamente con mezcladoras mecánicas. Es utilizado en áreas de mayor tamaño y son de mayor costo. Es el tipo de aireación más eficaz para el intercambio de gases y sustancias volátiles.
- c) *Aireación Difusa*: método que mezcla el agua con aire comprimido a través de difusores que se encuentran, por lo general, en la base del reactor o recipiente. Este aire forma burbujas en dispersión.

Para el desarrollo de esta tesis, se utilizará el método de Aireación Difusa, debido a que es más económico y fácil de implementar a escala de laboratorio. Además posee una gran efectividad gracias a las propiedades de inyección de oxígeno que posee.

La eficiencia del proceso de aireación tiene directa relación con la eficiencia de transferencia de oxígeno obtenida por el sistema implementado.

2.2.2. Transferencia de Oxígeno:

En los últimos 50 años se han elaborado diversas teorías que pretenden explicar el mecanismo de transferencia de oxígeno. La más sencilla y la más empleada para describir la transferencia gas-líquido, es la Teoría de la película propuesta por Lewis y Whitman (1924). Esta teoría radica en la presencia de dos capas: una líquida y otra gaseosa, en la interfase gas-líquido, donde el flujo a través de cada película es proporcional a una fuerza impulsora dada por la diferencia de concentraciones entre las superficies de la película, es decir, la rapidez de difusión dentro de una fase depende del gradiente de concentraciones existente en ella, y se expresa en esta fórmula:

$$N_i = k_L (C_i - C_L)$$

Ecuación N°1

Donde N_i es la masa de oxígeno transferido, k_L es el coeficiente de difusión de oxígeno en la película líquida, C_i es la concentración de saturación de la interfase y C_L es la concentración de oxígeno en el medio líquido.

Al considerar la transferencia de oxígeno a un volumen de líquido, que posee un área de interface determinada, en contacto con la fase gaseosa, se tiene entonces que la velocidad total de transferencia de oxígeno al líquido por unidad de volumen, en condiciones de equilibrio discontinuo, con flujo estacionario y semiestacionario se determina con la expresión:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{A}{V} \cdot N_i = k_L \cdot \frac{A}{V} (C_i - C_L) = k_L a (C_i - C_L)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_L a (C_i - C_L)$$

Ecuación N°2

Donde el coeficiente A/V es el área de interfase por unidad de volumen, llamada superficie específica y se denota habitualmente por a , dC/dt es la tasa de cambio en la concentración

de oxígeno transferido y el producto k_{La} se denomina coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno. Por lo tanto, la velocidad de transferencia de oxígeno es proporcional a un gradiente de concentraciones, siendo el coeficiente volumétrico de transferencia la constante de proporcionalidad.

En síntesis: “El gas se mueve espontáneamente de una región de alta concentración a una de baja concentración, y a medida que la diferencia de concentración es mayor, la tasa de difusión aumenta.”

2.2.3. Factores que afectan la transferencia de oxígeno

I. Tipo de régimen de flujo en el Tanque de Aireación:

Cuando se va a llevar a cabo un determinado proceso que implica una reacción química, en este caso la transferencia de oxígeno, además de conocerse la cinética debe determinarse el tipo y tamaño del reactor (tanque de aireación), y las condiciones de operación más adecuadas para el fin propuesto. El tipo de caudal y la forma del tanque de aireación van a determinar las condiciones de la reacción.

Los equipos en los que se efectúan reacciones homogéneas pueden ser de tres tipos generales:

- a) *Reactores Discontinuos o Tipo Batch*: reactor en el cual no hay entrada ni salida de reactantes. Se supone además que el reactor está perfectamente agitado, por lo tanto la composición es la misma en todos los puntos del reactor para un instante de tiempo dado (homogénea).
- b) *Reactores Continuos o Flujo Pistón*: reactor de flujo estacionario que se caracteriza porque el flujo de fluido es ordenado, sin que ningún elemento del mismo se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel, esto es, no hay mezcla en la dirección de flujo (dirección axial). Como consecuencia, todos los elementos de fluido tienen el mismo tiempo de residencia dentro del reactor. Como la composición del fluido varía a lo largo del reactor el balance de materia debe realizarse en un elemento diferencial de volumen transversal a la dirección de flujo.

- c) *Reactores Semicontínuos o Mezcla Completa*: reactor que supone un flujo de alimentación y salida uniforme, y una agitación perfecta, esto es, en todos los puntos del reactor la composición y propiedades físicas del fluido son iguales. Por esta misma razón la corriente de salida tiene la misma composición y propiedades que el fluido que se encuentra en el interior del reactor.

La operación de este reactor se realiza en condiciones de estado estacionario, es decir, no hay acumulación dentro del reactor. En esas condiciones desaparece el término de dependencia con la variable tiempo.

$$(\text{Variación de Materia}) = (\text{Mat. Entrante}) - (\text{Mat. Saliente}) \pm (\text{Mat. Reaccionante}) = 0$$

$$\frac{dM_{Fe}}{dt} = M.\text{ent}_{Fe} - M.\text{sal}_{Fe} \pm M.\text{oxi}_{Fe} = 0$$

$$M.\text{oxi}_{Fe} = M.\text{ent}_{Fe} - M.\text{sal}_{Fe}$$

Ecuación N°3

Los reactores discontinuos son sencillos de operar e industrialmente se utilizan cuando se han de tratar pequeñas cantidades de sustancias. Los reactores continuos son ideales para fines industriales cuando han de tratarse grandes cantidades de sustancia y permiten obtener un buen control de la calidad del producto. Los reactores semicontínuos son sistemas más flexibles pero de más difícil análisis y operación que los anteriores.

Para esta experiencia se utilizara un tanque de aireación en régimen de flujo mezcla completa, lo que mantendrá homogénea la muestra y se proporcione de igual manera el aire, y así se realice un proceso de transferencia de oxígeno homogéneo en cada parte del tanque de aireación.

II. Difusores de aire.

Los difusores son dispositivos de aireación, que producen burbujas de distinto tamaño mediante el uso de medios porosos como carborundum, fibra de vidrio torcida, materiales envueltos en sarán o unidades con orificios.

En un volumen dado de aire o líquido, el área de la superficie de contacto cambia proporcionalmente con la gota o tamaño de las burbujas. Así mismo, dependiendo del tamaño de las burbujas proporcionadas por el difusor, varía también la tasa de oxígeno, debido a la mayor o menor área de superficie de contacto que cada una proporciona.

Los tipos de difusores de burbujas, los cuales serán utilizados en este proyecto investigativo, se dividen según el tamaño de la burbuja que proporcionen, y esto pueden ser:

- a) *Difusores de Burbuja Gruesa ($\varphi > 10$ mm)*: producen burbujas que se elevan rápidamente desde la base hasta la superficie del tanque de aireación. En general son mejores en vertical para bombear agua que para la transferencia de oxígeno, ya que suelen ofrecer la mitad del oxígeno transferido por difusores de burbuja fina, dado el mismo volumen de aire. Los difusores de burbuja gruesa se han utilizado con menos frecuencia, debido principalmente al mayor costo de energía que implica su obtención.

En tanques de aireación, un sistema que utiliza difusores de burbujas gruesas requiere de 30 a 40 por ciento más de aire que el proceso de difusión que utiliza burbuja fina, para proporcionar el mismo nivel de tratamiento.

La excepción sería en las fases de tratamiento secundario, donde las partículas provenientes de procesos de floculación, sedimentación y acumulación de carbonato tienden a obstruir los poros en los difusores de burbuja fina. Aquí los difusores de burbuja gruesa son la solución, debido a que eliminar estos problemas sería entregar un enorme ahorro de costos en el reemplazo del producto y así también disminuir el tiempo de inactividad del sistema para facilitar su intercambio.

- b) *Difusores de Burbuja Mediana (φ 3-10 mm)*: producen burbujas que se encuentran entre las burbujas gruesas y la burbuja fina. Su principal uso es la aireación de tanques tampones y la extracción de grasas en plantas de tratamiento de aguas servidas.

- c) *Difusores de Burbuja Fina* (ϕ 1-3 mm): producen una gran cantidad que se elevan lentamente desde la base hacia la superficie del tanque de aireación, y proporcionan una transferencia sustancial y eficiente de masa de oxígeno en el agua.

Los difusores de burbujas finas repartidos de forma homogénea en el suelo de un tanque, proporciona gran flexibilidad operativa, las cuales pueden crear zonas con altas concentraciones de oxígeno (aeróbico), zonas con una concentración mínima de oxígeno (anoxia) y las zonas sin oxígeno (anaeróbico). Esto permite una focalización y eliminación más efectiva de los contaminantes específicos.

Los difusores de burbuja fina han sustituido en gran medida difusores de burbuja gruesa y aireadores mecánicos en la mayoría de los países desarrollados y en gran parte del mundo en desarrollo.

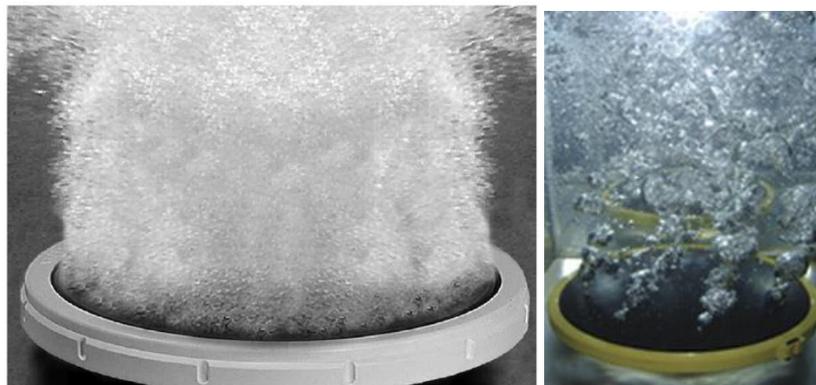


Figura 1: Difusor de Burbuja Fina vs Burbuja Gruesa

El coeficiente de transferencia total de oxígeno $k_L a$ aumenta cuando el tamaño de las burbujas disminuye. Investigaciones científicas muestran que este coeficiente tiene su valor máximo cuando el diámetro de burbujas está entre 1,0 y 2,5 mm (Sano et al. 1974), ya va disminuyendo a medida que el tamaño de la burbuja aumenta.

El aumento en el valor de $k_L a$ se debe al aumento total en la superficie de transferencia de masa total, obtenida a través del diámetro de burbujas menores. Si la alimentación del aire se mantiene a un nivel constante, la disminución del tamaño de burbujas de 5 mm a 2 mm tendrá como resultado un área de superficie de transferencia aproximadamente 6 veces mayor entre el aire y el agua.

Para determinar el área efectiva de contacto A_{et} o superficie de contacto, utilizamos la siguiente ecuación:

$$A_{et} = 4 \cdot \frac{\text{Área transversal del lecho}}{\text{perímetro mojado}}$$

Ecuación N°4

El rendimiento de la aireación no aumenta en proporción directa al tamaño de las burbujas.

Como regla general, los rendimientos están en relación (a uno) a cada tamaño de burbujas como sigue a continuación:

- ✓ Burbujas Finas: 1 = 100 %
- ✓ Burbujas Medianas: 0,7 = 70 %
- ✓ Burbujas Gruesas: 0,4 - 0,5 = 40 % - 50 %

El área esférica de la burbuja, que en teoría debería aumentar en un 5% por cada metro que asciende la burbuja, disminuye aproximadamente en un 10% para cada metro de desplazamiento vertical. La razón natural para este fenómeno debe hallarse en la disminución de la presión parcial de oxígeno en la burbuja, debido a la transferencia de gas del aire al agua.

La velocidad ascensional de las burbujas producidas por los difusores de burbuja fina es de 25 a 30 cm /s. (Davies y Taylor, 1950)

III. Disposición y Profundidad de los difusores de aire.

Existe una gran variedad de formas de distribuir los difusores a la hora de diseñar el sistema de aireación. La elección del más adecuado depende de una serie de factores relacionados con el mantenimiento, el grado de agitación, la geometría del equipo y la eficiencia en la transferencia de oxígeno. En la siguiente figura se muestran las configuraciones de difusores típicas:

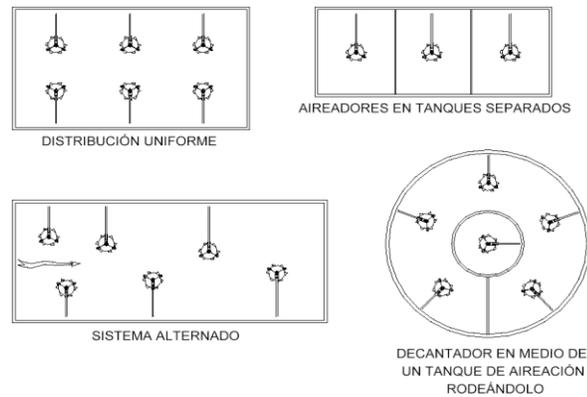


Figura 2: Diversas disposiciones de difusores según la geometría del T.A.

El efecto de la profundidad del difusor, es decir, de la altura de la columna de agua por encima del difusor, sobre la eficacia estándar de transferencia de oxígeno se debe principalmente a una mayor presión parcial de oxígeno y a un tiempo de residencia de la burbuja más alto.

En el intervalo de profundidad típicas en los sistemas de aireación actuales, el efecto de la profundidad sobre la eficacia estándar de transferencia de oxígeno es aproximadamente lineal para muchos sistemas de aireación, por lo que es frecuente encontrar eficacias de aireación como porcentajes por metro de profundidad.

Se debe tener en cuenta que un aumento de la profundidad del difusor implica un aumento en la energía necesaria para insuflar el aire.

2.3. PROCESO DE SEDIMENTACIÓN.

2.3.1. Concepto de Sedimentación:

La sedimentación es una operación consistente en la separación por la acción de la gravedad de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida, debido a que las partículas en suspensión poseen un peso específico mayor que el del agua. La sedimentación es una de las operaciones más utilizadas para la purificación de aguas. Cuando las impurezas son separadas del agua por la acción de la gravedad y sin la ayuda de agentes químicos, la

operación se denomina sedimentación simple. Finalmente, cuando se utilizan agentes químicos para eliminar impurezas en solución, la operación se denomina sedimentación química asistida.

La sedimentación es un fenómeno netamente físico, ya que está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce la suspensión de partículas el resultado será siempre un fluido más clarificado y una suspensión más concentrada.

2.3.2. Tipos de Sedimentación:

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos distinguir los siguientes tipos de sedimentación:

- I. Sedimentación de partículas discretas:** Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída. Se denomina sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este procedimiento está destinado a eliminar partículas de diámetros mayores a 0,001 mm.
- II. Sedimentación de Partículas Floculentas:** partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) sí cambian durante la caída. Este tipo de sedimentación remueve la aglutinación de los coloides entre 0,001 y 0,00001 mm.
- III. Sedimentación por caída libre e interferida:** cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina depósito sedimentación zonal.

IV. Sedimentación por compresión: se refiere a la sedimentación donde las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación solo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura.

La compresión se produce por el peso de las partículas, que van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante. (Fuentes Llamas, Ana y Llorens Pascual De Riquelme, Mercedes; Universidad de Murcia)

Para efectos de experimentación, el tipo de sedimentación que experimenta la muestra de agua dentro del tanque es de Sedimentación de Partículas Discretas, debido a que las partículas de hierro disueltas en estado soluble no cambian sus características durante la precipitación. Además es de sedimentación simple debido a que precipita por gravedad, ya que su densidad (5,242 [ton/m³]) es mayor a la del agua.

$$\rho_{Fe_2O_3} > \rho_{H_2O}$$

En el tanque de aireación que se implementara para realizar la fase experimental, al ser llenado de muestras con aguas ferrosas, se tendrá inicialmente una muestra con concentración uniforme en toda la altura de la columna. Esta concentración ira variando en cada zona del tanque conforme pasa el tiempo.

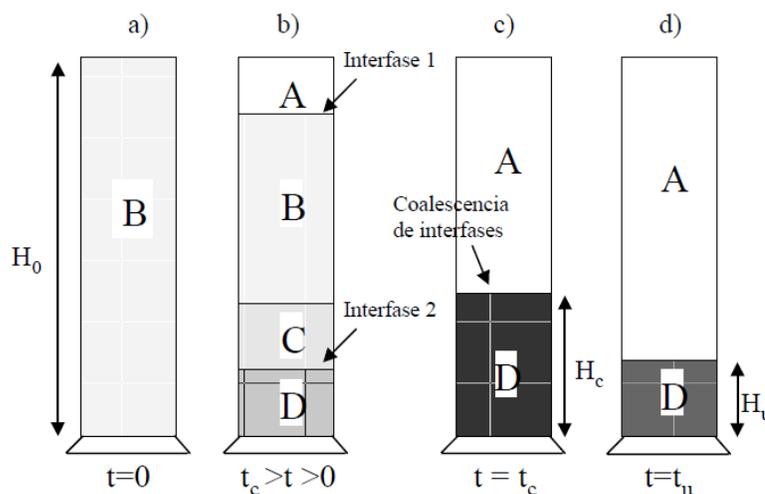


Figura 3: Tipos de Sedimentación dentro del Tanque.

La figura 3 representa el proceso de sedimentación por zonas en un tanque. Este proceso consta de las siguientes etapas:

- Figura a: en un principio, al terminar el proceso de aireación difusa, el agua se encuentra con una concentración inicial.
- Figura b: aquí las partículas comienzan a sedimentar, estableciéndose una interfase 1 entre la superficie de sólidos que sedimentan y el líquido clarificado de la zona A. La zona B se denomina zona interfacial. La concentración de sólidos en esta zona es uniforme, sedimentando toda ella como una misma capa de materia a velocidad constante.

Simultáneamente en el fondo de la probeta o zona D, se produce la compactación de los sólidos en suspensión, la cual se encuentra debajo de la zona de transición o zona C, formándose la interfase 2.

- Figura c: esta es una zona de coalescencia de las dos interfases anteriormente citadas, en el denominado momento crítico t_c , desapareciendo la zona de transición. En este momento el sólido sedimentado tiene una concentración crítica.
- Figura d: en esta etapa ocurre la compactación y se alcanza, posteriormente, la concentración final.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.

Este capítulo plantea la estructura metodológica que funciona como una guía, que describe la forma y pasos para llevar a cabo la investigación, especificando actividades necesarias para cada parte del estudio de manera sistemática, empírica y crítica.

Aquí se intenta entregar y exponer de forma clara, las principales consideraciones adoptadas para la correcta ejecución y luego medición de las variables involucradas en el estudio. También se explica la manera como se aborda la etapa experimental de manera de cumplir los objetivos propuestos, se definirá el equipo necesario para realizar la experiencia y la operación que se debe llevar a cabo en cada etapa.

El análisis de los datos que surjan a partir de la aplicación del sistema experimental que se lleva a cabo en esta etapa del proyecto, tanto como las conclusiones que resulten de este proceso, establecerán el fundamento a partir del cual podremos tener la certeza de que si se llegará a materializar la propuesta dada a la problemática establecida en un comienzo.

3.1. METODOLOGÍA CUANTITATIVA.

3.1.1. Variables experimentales.

El primer paso para llevar a cabo la descripción de metodología cuantitativa es el reconocimiento de las variables experimentales que se ven involucradas en el estudio. Por lo tanto, lo primero que se debe hacer es reconocer las variables independientes, las que controlan los efectos medidos y de las cuales dependerá el proceso experimental, y por consiguiente detectar las variables dependientes.

También es necesario tener conocimiento de las variables controladas, las cuales no se verán modificadas en ningún momento de la fase experimental.

Para efectos de este estudio, las variables de tipo independiente son las siguientes:

- **Tamaño de Burbuja:** la importancia de esta variable gravita en el área de contacto que proporciona cada una de las burbujas con la cual entra en contacto la muestra de agua durante el proceso de aireación. La concentración de oxígeno disuelto dependerá directamente de esta variable.
- **Tiempos de sedimentación:** esta variable es de suma importancia, ya que es la que mostrará los resultados directos de la disminución de concentración de hierro, debido a que según los tiempos utilizados las partículas oxidadas van decantando por efecto de la gravedad, es decir mientras mayor es el tiempo de sedimentación menor contenido de hierro encontramos en la muestra.

En consecuencia, la variable dependiente es la concentración de hierro presente en las aguas subterráneas tratadas, y se definirá según la eficiencia de la purificación obtenida.

3.1.2. Recolección de Datos

Una vez que hemos seleccionado las variables experimentales, la siguiente etapa consiste en recolectar los datos pertinentes involucrados en la investigación.

Para el desarrollo del trabajo investigativo, se consultaron fuentes de información tanto primarias como secundarias, es decir, se usaron libros y revistas de tipo científico, publicaciones, normas técnicas (Nch), proyectos de tesis externos. Esto permitió la generación de las bases y fundamentos del estudio realizado.

Por otra parte, los datos experimentales fueron extraídos a través de instrumentos. Los instrumentos utilizados para evaluar las variables anteriormente definidas, fueron:

- ✓ Oxímetro YSI 550: utilizado para la medición de la concentración de oxígeno disuelto en el agua.
- ✓ Cronómetro: para medir tiempos de contacto.

Mientras que la medición de la concentración de hierro se realiza con un espectrofotómetro de absorción atómica. La técnica de absorción atómica es una técnica espectroscópica empleada principalmente para la determinación de metales en diferentes tipos de muestras.

Generalmente la muestra debe ser tratada de forma tal que se liberen los metales en una forma soluble previa al análisis.

3.2. FASE EXPERIMENTAL.

3.2.1. Equipo experimental utilizado.

El sistema que se ocupa en el proceso de depuración a través de aireación por burbujeo establecido en escala de laboratorio, consta principalmente de un recipiente que desempeñe la función de un tanque de aireación, un sistema de aireación basado en difusores de burbujas, una bomba que proporcionara el aire necesario para el aumento de oxígeno del agua tratada y un Oxímetro que medirá estos valores.

Para efectos de describir el equipo utilizado se han considerado lo siguiente:

- 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.
- 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].
- c) *Difusores*: dispositivos de aireación que producen burbujas de distinto tamaño, ubicado generalmente en la base del tanque de aireación.
- d) *Oxímetro*: aparato que mide de manera indirecta la saturación de oxígeno en el agua. El modelo de instrumento utilizado es YSI 550A.
- e) *Otros instrumentos*: se utilizaran cables plásticos que conectará la bomba con los difusores dispuestos en el tanque de aireación para proporcionar el oxígeno.

3.2.2. Implementación y operación.

Para implementar el sistema de aireación, primero debemos instalar el sistema de aireación que consiste en difusores de burbujas. Estos serán dispuestos en distintas posiciones dentro

del recipiente, de manera de dispensar de oxígeno de la misma manera a toda la columna de agua.

Los difusores jugarán un papel importante en el sistema de aireación, debido a que proporcionarán diferentes Tamaños de Burbujas, lo que verá modificada la superficie de contacto entre el aire y el agua.

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 los difusores. Luego estos difusores transforman el aire en pequeñas burbujas las cuales ascienden hasta la superficie del agua contenida en el tanque, transfiriendo oxígeno a la masa líquida.

3.2.3. Descripción de Fases Experimentales.

- i) 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.
- ii) Fase de aireación: Posteriormente al llenado, se inyecta aire al sistema a través de la bomba y difusores de aire 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 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.
- iii) 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 oxidado del agua tratada.

- iv) *Fase de vaciado*: El agua tratada será utilizada como muestra de laboratorio en el análisis de concentración de hierro. Ésta se retirará 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.

3.3. METODOLOGÍA DE ENSAYOS.

Esta etapa consiste en hacer un plan de trabajo el cual permita precisar cómo se van a manipular las variables independientes seleccionadas, ver cómo reaccionan las variables dependientes y analizar de qué forma se medirán.

En este caso las variables independientes son el área de contacto según el tamaño de la burbuja proporcionada por el difusor en el proceso de aireación y los tiempos de sedimentación. La manipulación de estas variables se realiza utilizando el caudal máximo proporcionado por la bomba de aire que es de 9,2 [l/min], para un tiempo de aireación definido.

3.3.1. Proceso de Aireación.

El proceso de aireación tendrá una duración de 120 minutos, tiempo en el cual, en base a resultados experimentales se logra un 70% de remoción de la concentración de hierro soluble total de la muestra de agua. (Hernán Fuentes Alarcón, 2013).

Se pretende analizar el efecto del tamaño de las burbujas proporcionadas por los difusores y su relevancia directa con el área de contacto entre el agua y el aire, de manera de apreciar la eficiencia de cada tamaño de burbuja con relación al oxígeno transferido. Este procedimiento se llevara a cabo en dos modalidades, uno con burbuja fina de 3mm y otro con burbuja mediana de 6 mm. A través de las mediciones con el Oxímetro se podrá evaluar la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Luego se toma una medición en la superficie y otra en la mitad del volumen utilizado, promediando las dos concentraciones. Esto se realizara en intervalos de 5 minutos hasta los 30 minutos del proceso de aireación. Después de este tiempo los intervalos de medición cambian a 10 minutos hasta los 60 minutos, y por ultimo intervalos de 20 minutos hasta completar el tiempo total de aireación.

3.3.2. Proceso de Sedimentación.

El tiempo total de sedimentación que se ocupará para realizar los ensayos será de 3 horas y 30 minutos, ya que en base a estudios experimentales, se determinó que es el tiempo efectivo de sedimentación de este tipo de partículas. (Hernán Fuentes Alarcón, 2013).

3.3.3. Muestreo.

Las muestras que se enviarán a laboratorio, serán tomadas y almacenadas en envases de polipropileno de alta densidad que cumple con las normas de muestreo, ya que contiene preservantes que mantendrán las características del agua al ser extraídas para el análisis, y además tiene un volumen mínimo de un litro.

La primera muestra se realizará in situ, es decir, en el lugar donde se ubica el pozo de extracción de agua subterránea. Esta muestra será la referencia para comparar los contenidos de hierro inicial y los resultados obtenidos de cada ensayo después de haberse realizado la Aireación y posteriormente la Sedimentación.

Inmediatamente después de haber finalizado el proceso de aireación, se tomará a cada ensayo realizado, una muestra de condiciones iniciales correspondiente al proceso de sedimentación. Las demás muestras correspondiente a este proceso serán extraídas de la zona clarificada del tanque de aireación, es decir de la salida de agua ubicada en la parte superficial del Tanque de Aireación. Estas muestras serán tomadas en intervalos de 30 minutos, hasta completar el tiempo total de sedimentación designado, que según el tipo de sedimentación es de 3 horas y 30 minutos.

Luego de tener todas las muestras ensayadas, estas se enviarán al laboratorio para medir las concentraciones de hierro presente en el agua. Esto se realiza a través del ensayo de espectrofotometría por Absorción Atómica.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se dan a conocer los datos obtenidos en la fase experimental. Primero se analiza el efecto que provoca la variación del Tamaño de Las Burbujas sobre el oxígeno disuelto en la muestra de agua, y las variaciones de concentración de hierro en cada intervalo de tiempo medido en la Sedimentación. Luego se establece una relación entre ambas variables, para así dar a conocer y determinar los efectos colectivos que generan estas dos sobre la concentración final de hierro del agua tratada.

Como se menciona en el Capítulo III, las variables utilizadas para llevar a cabo las experiencias de laboratorio son el Tamaño de Burbuja y el Tiempo de Sedimentación, las cuales se analizarán y se expondrán sus efectos sobre la muestra de agua.

4.1. AREA DE CONTACTO AIRE – AGUA.

4.1.1. Oxígeno disuelto.

La cantidad de oxígeno disuelto presente instantáneamente en la muestra de agua ensayada se relaciona directamente con el tamaño de la burbuja proporcionada por el sistema de aireación que se detalla en el Capítulo II.

Tabla 1: Condiciones de Ensayo

Ensayo	Tiempo Contacto [min]	Caudal Aire [l/min]	Tamaño Burbuja [mm]	C.I.O.D. [mg/l]	C.M.O.D. [mg/l]
1	120	9,2	3	3,17	9,46
2	120	9,2	6	3,24	9,28

La tabla anterior muestra las condiciones de cada ensayo realizado, y además los datos medidos durante su ejecución.

Primero se muestra la Cantidad Inicial de Oxígeno Disuelto (en adelante C.I.O.D.) en cada muestra y luego la Cantidad Máxima de Oxígeno Disuelto (en adelante C.M.O.D.).

En el segundo ensayo realizado, se realizo proporcionando burbujas medianas de 6 mm aproximadamente, con una C.I.O.D. de 3,24 [mg/l] y obteniendo una C.M.O.D. de 9,28 [mg/l]. Mientras que en el primer ensayo el sistema de aireación proporcionaba micro burbujas de 3 mm de diámetro. En esta segunda experiencia la C.I.O.D. de 3,17 [mg/l] y llegando a una C.M.O.D. de 9,46 [mg/l], lo cual permite ver una pequeña diferencia entre las cantidades de oxígeno disuelto en cada ensayo, la cual favorece a la micro burbuja.

De la tabla anterior se desprende el siguiente gráfico comparativo:

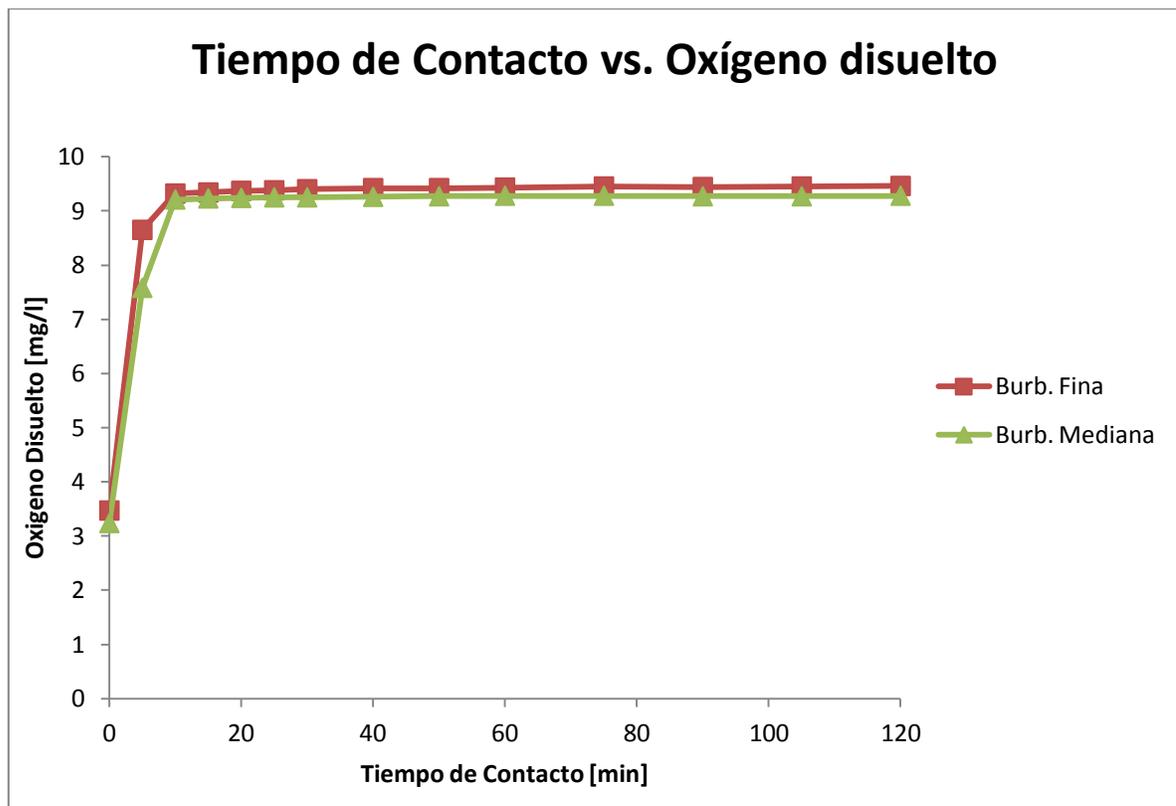


Gráfico 1: Tiempo de Contacto vs Oxígeno Disuelto.

Las curvas muestran el cambio de la concentración de oxígeno disuelto de cada muestra, el cual es proporcionado por la bomba de aire.

En un principio, los cambios de concentración de oxígeno se elevan bruscamente, hasta llegar a un punto en el cual la variación es ínfima y el valor es constante.

4.1.2. Remoción de Hierro.

Con respecto a la disminución del hierro disuelto en las muestras de agua tratada en el Proceso de Aireación, se detalla la siguiente tabla resumen.

Tabla 2: Resumen Concentraciones.

Concentraciones	Burbuja Fina	Burbuja Mediana
Hierro Inicial	0,856	0,856
Hierro Final	0,367	0,565
% Remoción	57,1	34,0

La tabla muestra el porcentaje de remoción logrado en el Proceso de Aireación. Se observa un mayor porcentaje de remoción en el Sistema de Aireación mediante Burbujas Finas con un 57,1%, por sobre el porcentaje de remoción logrado por el Sistema de Aireación de Burbujas Medianas que fue de 34,0%, lo que hace efectivo el estudio teórico realizado, ya que al disminuir el tamaño de burbujas inyectadas a la muestra de agua, aumenta el área de contacto entre las partículas de agua y el oxígeno contenido en las burbujas de aire proporcionados por la bomba.

La remoción lograda por el Sistema de Aireación mediante burbujas medianas sigue siendo considerable, pero menos óptimo que el de burbuja fina.

4.2. SEDIMENTACIÓN.

Después de la inyección de oxígeno realizada en el proceso de aireación, las partículas de hierro oxidadas y llevadas a su forma insoluble, precipitan en el proceso de sedimentación. (Hammer, 2001; citado por Samad, 2005).

El agua tratada fue medida en su concentración de hierro al momento de la extracción del pozo (in situ), con el fin de tener un patrón de referencia al analizar las concentraciones medidas después de haber realizado el proceso de Aireación – Sedimentación. La concentración de hierro inicial fue 0,856 [mg/l].

El tiempo de sedimentación fue tomado en intervalos de tiempos, los cuales permitieran distinguir las distintas fases que se llevan a cabo en las muestras de agua en dicho proceso y que fueron mencionadas en el Capítulo II.

Tabla 3: Concentración de Hierro en Proceso de Sedimentación.

Tiempo Sedimentación [min]	Concentración Hierro Burbuja Fina [mg/l]	Concentración Hierro Burbuja Mediana [mg/l]
0	0,367	0,565
30	0,356	0,561
90	0,343	0,545
150	0,330	0,529
210	0,295	0,522

La tabla anterior muestra las concentraciones de hierro que posee el agua, clasificando los datos según los distintos intervalos de tiempo medidos y el Sistema de Aireación proporcionado a cada uno.

Al unir los datos de las dos tablas anteriores, y llevar estos datos a un gráfico comparativo se puede observar lo siguiente:

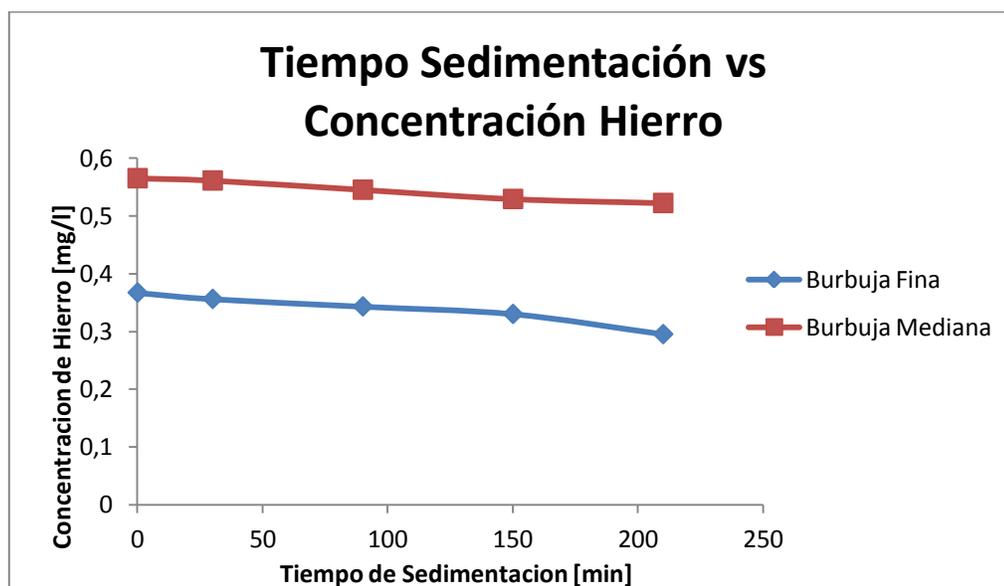


Gráfico 2: Tiempo de Sedimentación vs Concentración de Hierro.

El gráfico muestra un descenso en la cantidad de hierro presente en las muestras extraídas del tanque de aireación durante el proceso de sedimentación. Se observa que las curvas representadas por los datos obtenidos son casi lineales, es decir, las concentraciones de hierro descienden de manera constante a medida que pasa el tiempo.

4.3. CONTENIDO DE HIERRO FINAL.

Mediante el proceso de inyección de oxígeno al agua con partículas de hierro en forma disuelta, llevamos al metal a su forma oxidada, es decir, a su forma insoluble. Este estado de la partícula de hierro, en forma de precipitados, al ser expuesto al proceso de sedimentación decanta en el fondo del tanque de aireación. Esto permite ver una zona de agua clarificada en la parte superior del tanque, lo que permite la toma de muestra y obtener los resultados expuestos en los ítems anteriores. Al unir los resultados de los dos procesos antes mencionados se obtiene lo siguiente:

Tabla 4: Resultados Proceso Aireación - Sedimentación.

Proceso Utilizado	Tiempo Tratamiento [min]	Remoción Burbuja Fina % acumulado	Remoción Burbuja Mediana % acumulado
Aireación	0 - 120	57,1	34,0
Sedimentación	120 - 330	65,5	39,0

Al llevar estos datos a un gráfico comparativo se obtiene:

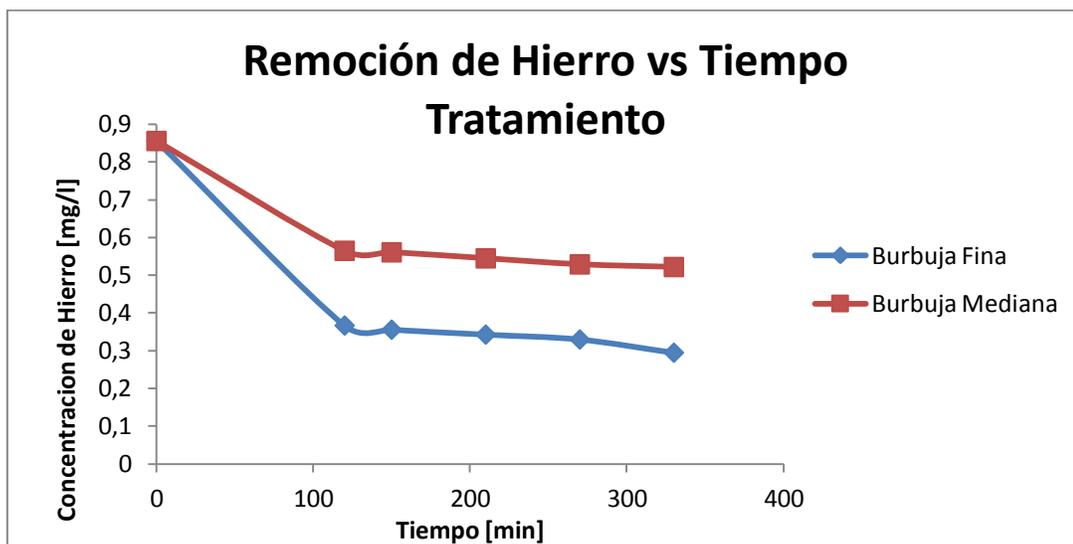


Gráfico 3: Remoción de Hierro vs Tiempo de tratamiento.

El proceso de aireación es el proceso en donde se remueve mayor cantidad de hierro del agua, llegando a un 57,1% en el proceso de tratamiento mediante Burbujas Finas, siendo este el mejor de los casos. Mientras que en el proceso de Sedimentación se llega a un porcentaje de remoción total de 65,5% en el mejor de los casos revisados.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Este capítulo final constituye el resultado total del trabajo investigativo realizado, es decir, entrega las conclusiones que se obtuvieron a través de las distintas etapas que se llevó a cabo el proyecto de tesis. También se exponen comentarios o recomendaciones a considerar con respecto al tema estudiado.

5.1. CONCLUSIONES EN BASE A LOS RESULTADOS.

- En primer lugar se concluye experimentalmente que mientras menor es el tamaño de las burbujas proporcionadas en el proceso de aireación, mayor es la cantidad de oxígeno y mejores resultados de remoción de hierro se logran.
- El mayor porcentaje de remoción de hierro se obtuvo en proceso mediante Burbujas Finas siendo de 65,5% por sobre el proceso de Burbujas Medianas que fue de 39%.
- El mejor rendimiento de purificación de agua se logró en el proceso de Aireación con un 57,1% de remoción, por encima del 8,4% logrado en el proceso de Sedimentación.
- A mayor Tiempo de Sedimentación se obtiene mejores resultados de remoción de hierro, siendo el punto máximo a las 3 horas de residencia.

5.2. CONCLUSIONES SOBRE LA VIABILIDAD DE PROPUESTA.

Como muestran los resultados, dentro del proceso de Aireación – Sedimentación, la mayor cantidad de remoción de hierro se logra en el primer proceso, y es ahí donde se debe realizar mejoras para optimizar el sistema de tratamiento.

Con respecto a esta tecnología, se puede decir que es perfecta para el sector de persona al cual quiere beneficiar, ya que es de operación sencilla, es un sistema de fácil mantenimiento y no es agresiva con el medio ambiente.

El proceso elegido para dar solución al problema propuesto es eficiente, ya que logra resultados de concentraciones que cumplen con la normativa Chilena de agua potable. Además el porcentaje de remoción que logra este sistema de depuración es alto, por lo que se considera que el proyecto es viable tanto teórica como técnicamente.

5.3. RECOMENDACIONES.

Al llevar a cabo las experiencias de laboratorio, se pudo observar otras variables que afectan la cantidad de oxígeno disuelto en las muestras dentro del proceso de Aireación. Dentro de las recomendaciones esta:

- Optimizar el proceso de aireación, experimentando con sistemas en base a burbujas ultra finas.
- Estudiar la incidencia del tamaño del diámetro del tanque de aireación y la altura de la columna de agua, sobre la efectividad de purificación.
- Estudiar y experimentar con otras variables que influyen en el traspaso de oxígeno al agua durante el proceso de aireación como el pH, la salinidad, la presión y la temperatura.

REFERENCIAS.

1. Casey, T J: Unit Treatment Processes in Water and Wastewater Engineering, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 1997.
2. Casey T. J.: Diffused air aeration systems for the activated sludge process Paper 4, 2009.
3. Manual de Aireación ABS-Nopol, 2009.
4. Ph. D. Fabián Yáñez: Transferencia de Oxígeno y Aireación.
5. J.M. Pérez: Avances en Sedimentación. Curso de tecnología de tratamientos de agua para países en desarrollo CEPIS-CIFCA, 1978.
6. Weber. Control de calidad de agua para consumo humano. Nueva York, John Wiley & Sons, 1978.
7. Ramalho, R.S. Tratamiento de aguas residuales. Ed. Reverté, S.A.
8. Alan Burris, Ph.D.: Discovery of factors affecting bubble size in water, 1999.
9. Robinson, R. B.: "State-of-the-Art: Iron and Manganese Control," Proceedings of the New England Water Works Association Conference and Exhibition. Marlborough, 1998.
10. McCarthy, J.: "Technology Assessment of Fine Bubble Aerators." U.S., 1982.
11. Egan-Benck, K.; G. McCarty; and W. Winkler. 1993. "Choosing Diffusers." Water Environment and Technology. Vol. 5. no. 2. pp. 54-59.
12. McGee. Wastewater Technology Fact Sheet Fine Bubble Aeration, Office of Water Washington, D.C., September 1999.
13. Bewtra, J. K. and W. R. Nichols, "Oxygenations from Diffused Air in Aeration Tanks", Journal of the Water Pollution Control Federations, Vol. 36, 1964.
14. Boon, A. G., "Energy Saving: Optimization of Fine Bubble Aeration", Application for Federal Assistance to EPA, 1980.
15. F.Cunill, M. Iborra, J.Tejero: "Apuntes: Ampliación de Reactores Químicos", Universitat de Barcelona, 2010.
16. Ramírez Cortina C. R., Alonso Gutiérrez M.S., Bruno Esparza R., Rodríguez Lepure A. L.: Caracterización de un contactor de gas-líquido mediante el coeficiente volumétrico de transferencia de masa a diferentes condiciones de operación.

17. Muñoz J. M.: “Componentes de los Sistemas convencionales de Depuración de Aguas Residuales”.
18. Xavier Domènech, Wilson F. Jardim y Marta I. Litter: Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes.
19. Mauricio Biron Narváez Hernández: Tesis de Grado: “Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes”, 2010.
20. Hernán Fuentes Alarcón: Tesis de Grado: “Estudio experimental del efecto de la aireación en la remoción de hierro en aguas subterráneas de abastecimiento”, 2013.

ANEXO A: DATOS CUANTITATIVOS FASE EXPERIMENTAL.

Este anexo define y detalla los datos cuantitativos que están involucrados en la realización de cada ensayo perteneciente a la etapa experimental, tantos datos de entrada como datos medidos. También se muestra de forma numérica las variables señaladas en la Fase de Metodología del proyecto de tesis.

A.1. Datos Experimentales de Entrada

Los datos utilizados para realizar la etapa experimental son los siguientes:

Ensayo	Tamaño Burbuja [mm]	Caudal de Aire [lt./min]	Tiempo Aireación [min]	Tiempo Sedimentación [min]
1	3	9,2	120	30, 90, 150, 210
2	3	9,2	120	30, 90, 150, 210
3	6	9,2	120	30, 90, 150, 210
4	6	9,2	120	30, 90, 150, 210

A.2. Datos Experimentales de Salida.

Los datos de salida constan de resultados obtenidos de las cuatro experiencias especificadas anteriormente, y además cuenta con los resultados tomados inicialmente de las muestras de agua que se utiliza para el desarrollo de esta etapa.

Muestra Inicial	Concentración Hierro [mg/lt.]	Temperatura °C
1	0,856	15,4
2	0,739	15,2

A.3. Ensayos de Aireación con Burbujas Finas

- Ensayo N° 1

El primer escenario muestra el Sistema de Aireación aplicando burbujas pequeñas de 3 mm de diámetro.

Tiempo de Aireación [min]	Oxígeno Disuelto [mg/lt.]	Temperatura °C
0	3,47	15,4
5	8,65	15,4
10	9,32	15,4
15	9,34	15,5
20	9,37	15,5
25	9,38	15,5
30	9,40	15,6
40	9,42	15,6
50	9,42	15,7
60	9,43	15,7
75	9,45	15,8
90	9,44	15,8
105	9,45	15,8
120	9,46	15,9

Tiempo de Sedimentación [min]	Concentración Hierro [mg/lt.]	Remoción %
0	0,519	39,4
30	0,511	40,3
90	0,509	40,5
150	0,501	41,5
210	0,422	50,7

- Ensayo N° 2

Sistema de Aireación aplicando burbujas pequeñas de 3 mm de diámetro.

Tiempo de Aireación [min]	Oxígeno Disuelto [mg/lit.]	Temperatura °C
0	3,17	16,1
5	8,42	16,1
10	9,01	16,1
15	9,04	16,2
20	9,07	16,2
25	9,09	16,3
30	9,10	16,3
40	9,12	16,4
50	9,12	16,5
60	9,14	16,5
75	9,14	16,6
90	9,15	16,6
105	9,16	16,7
120	9,15	16,7

Tiempo de Sedimentación [min]	Concentración Hierro [mg/lit.]	Remoción %
0	0,367	57,1
30	0,356	58,4
90	0,343	59,9
150	0,330	61,4
210	0,295	65,5

A.4. Ensayos de Aireación con Burbujas Medianas

- Ensayo N° 3

Sistema de Aireación aplicando burbujas medianas de 6 mm de diámetro.

Tiempo de Aireación [min]	Oxígeno Disuelto [mg/lit.]	Temperatura °C
0	3,24	15,2
5	7,58	15,3
10	9,21	15,3
15	9,23	15,4
20	9,24	15,4
25	9,25	15,5
30	9,25	15,5
40	9,26	15,6
50	9,27	15,6
60	9,28	15,7
75	9,28	15,7
90	9,27	15,7
105	9,27	15,8
120	9,28	15,8

Tiempo de Sedimentación [min]	Concentración Hierro [mg/lit.]	Remoción %
0	0,800	6,5
30	0,765	10,6
90	0,705	17,6
150	0,619	27,7
210	0,603	29,6

- Ensayo N° 4

Sistema de Aireación aplicando burbujas medianas de 6 mm de diámetro.

Tiempo de Aireación [min]	Oxígeno Disuelto [mg/lit.]	Temperatura °C
0	3,19	15,5
5	7,42	15,5
10	9,12	15,6
15	9,17	15,6
20	9,21	15,7
25	9,22	15,7
30	9,24	15,7
40	9,25	15,8
50	9,26	15,8
60	9,27	15,9
75	9,27	15,9
90	9,28	15,9
105	9,27	16,0
120	9,27	16,0

Tiempo de Sedimentación [min]	Concentración Hierro [mg/lit.]	Remoción %
0	0,565	34,0
30	0,561	34,5
90	0,545	36,3
150	0,529	38,2
210	0,522	39,0

A5. Representaciones Gráficas de los resultados del Proceso de Aireación.

1. Resultados del proceso de Aireación mediante Burbuja Mediana.

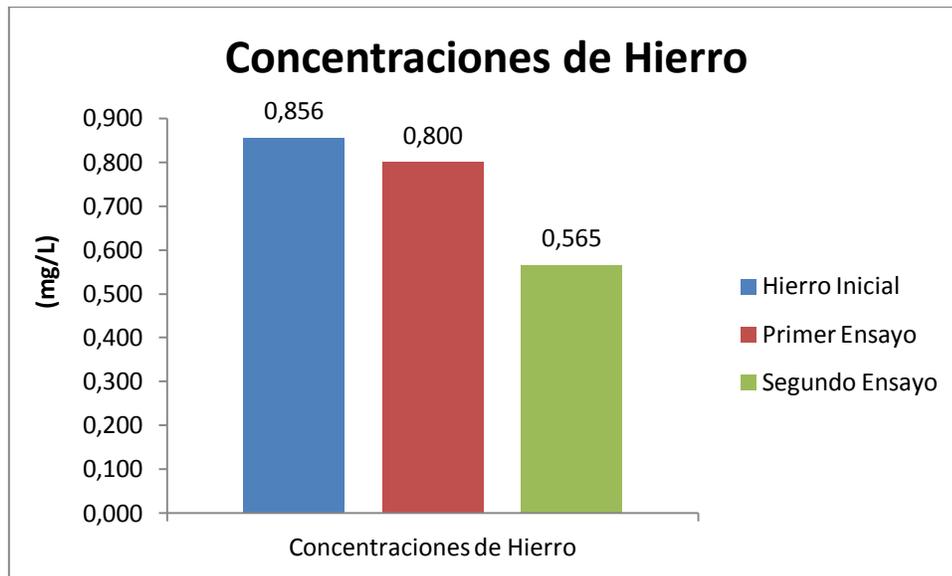


Ilustración 1: Gráfico de concentraciones de Hierro en el agua en proceso de aireación de burbujas medianas.

Este gráfico muestra la disminución del contenido de hierro que se logró en el proceso de aireación mediante Burbujas Medianas de 6 mm. Se observa que el segundo ensayo realizado obtuvo mejores resultados de remoción, llegando a un 39 % por sobre el 29,6 % logrado en el primer ensayo realizado.

2. Resultados del proceso de Aireación mediante Burbuja Fina.

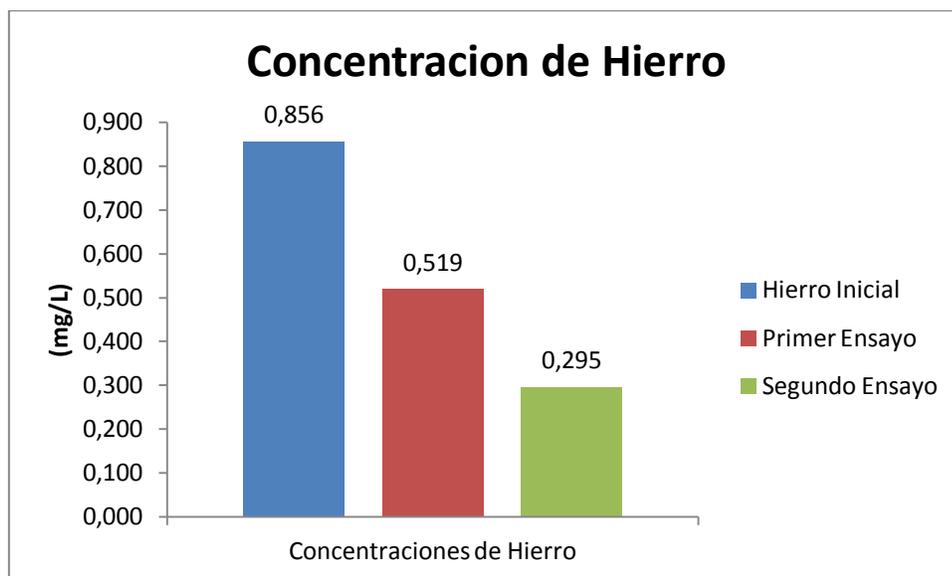


Ilustración 2: Gráfico de concentraciones de Hierro en el agua en proceso de aireación de burbujas finas.

Este gráfico anterior muestra la disminución del contenido de hierro que se alcanzó en el proceso de aireación mediante Burbujas Finas de 3 mm. En este caso también el segundo ensayo realizado obtuvo mejores resultados de remoción, alcanzando a un 65,5 % por sobre el 50,7 % logrado en el primer ensayo.

A6. Representaciones Gráficas de los resultados del Proceso de Sedimentación.

1. Resultados de la Sedimentación con Sistema de Aireación mediante Burbuja Fina.

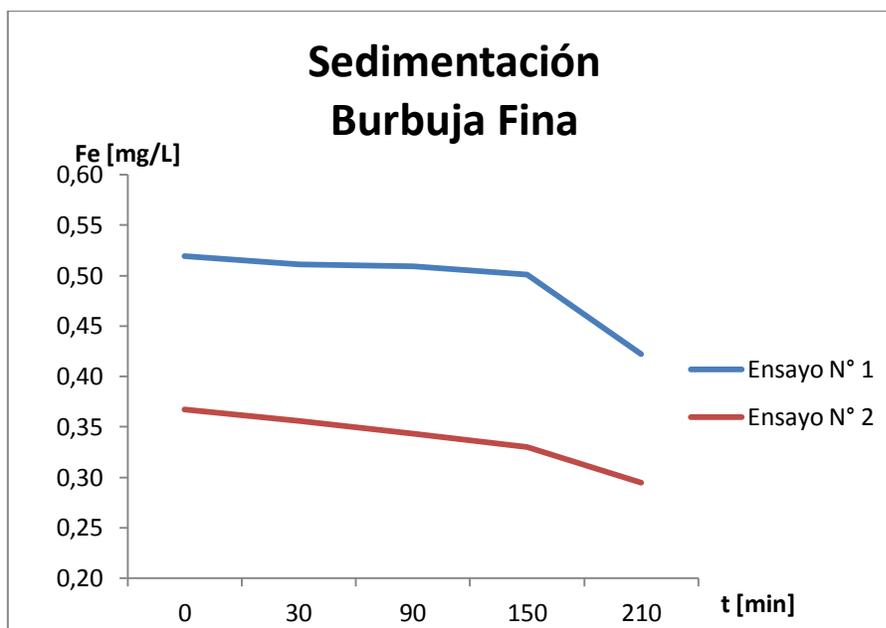


Ilustración 3: Gráfico de resultados del proceso de sedimentación con burbujas finas.

El gráfico muestra la curva de reducción del contenido de las muestras de aguas ensayadas con el sistema de aireación de burbuja fina (3 mm).

2. Resultados de la Sedimentación con Sistema de Aireación mediante Burbuja Mediana.

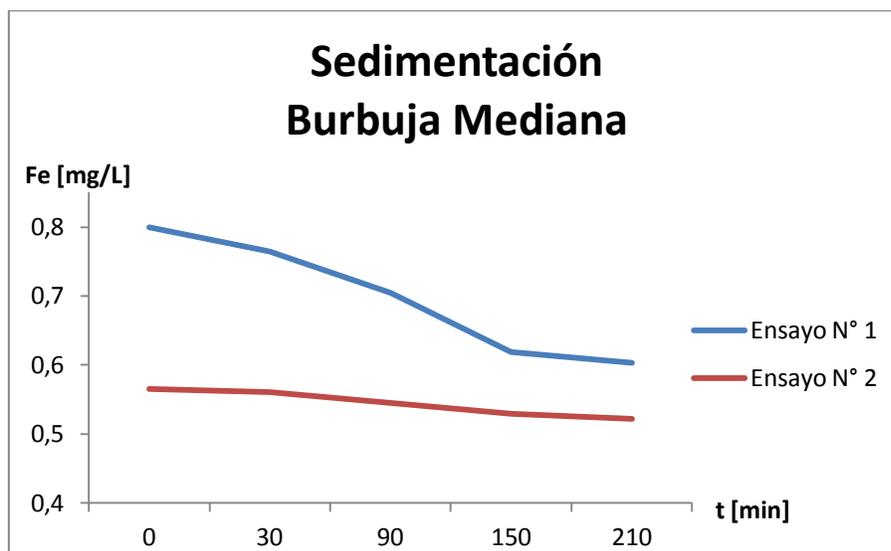


Ilustración 4: Gráfico de resultados del proceso de sedimentación con burbujas medianas.

El gráfico muestra la curva de reducción del contenido de las muestras de aguas ensayadas con el sistema de aireación de burbuja mediana (6 mm), en los distintos tiempos de sedimentación designados a inspeccionar.