



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**ELIMINACIÓN DE HIERRO FERROSO POR MEDIO DE OXIDACIÓN Y FILTRACIÓN  
MULTIMEDIA, DE AGUA DE POZO UTILIZADA EN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO.**

**Edward Mauricio Berríos Méndez**

Asesorado por la Inga. Evelyn Oliva de Rodríguez

Guatemala, julio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELIMINACIÓN DE HIERRO FERROSO POR MEDIO DE OXIDACIÓN Y FILTRACIÓN  
MULTIMEDIA, DE AGUA DE POZO UTILIZADA EN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDWARD MAURICIO BERRÍOS MÉNDEZ**  
ASESORADO POR LA INGA. EVELYN OLIVA DE RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA JULIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Orlando Javier Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Ramiro Monroy García
EXAMINADOR	Ing. Federico Roberto Salazar Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ELIMINACIÓN DE HIERRO FERROSO POR MEDIO DE OXIDACIÓN Y FILTRACIÓN MULTIMEDIA, DE AGUA DE POZO UTILIZADA EN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha mayo de 2011.



Edward Mauricio Berríos Méndez

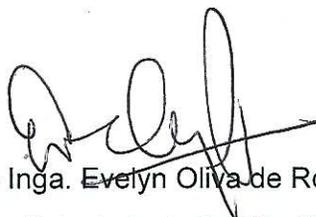
Guatemala 28 de febrero de 2012.

Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química  
Director de Escuela  
Msc. Ing. Williams Álvarez.

Estimado Msc Ing. Álvarez.

Por este medio me dirijo a usted para hacer constar que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación del estudiante: Edward Mauricio Berríos Méndez, titulado: "Eliminación de hierro Ferroso por medio de Oxidación y Filtración Multimedia, de agua de pozo utilizada en Sistema de Riego por Goteo". El tema resulto muy interesante y lo más importante es que resolvió una necesidad real en el área agrícola de Guatemala.

Atentamente,



Msc Inga. Evelyn Oliva de Rodríguez  
Colegiado Activo No. 893

*Evelyn J. Oliva P.*  
INGENIERA QUÍMICA  
COL. 893  
M.Sc. EN INGENIERIA SANITARIA



Guatemala, 23 de mayo de 2012  
Ref. EI.Q.TG-IF.025.2012

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-1412011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Edward Mauricio Berríos Méndez**

Identificado con número de carné: **1995-16222**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### ELIMINACIÓN DE HIERRO FERROSO POR MEDIO DE OXIDACIÓN Y FILTRACIÓN MULTIMEDIA, DE AGUA DE POZO UTILIZADA EN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera: **Evelyn Oliva**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Jaime Domingo Carranza  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.95.2012

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **EDWARD MAURICIO BERRÍOS MÉNDEZ** titulado: **"ELIMINACIÓN DE HIERRO FERROSO POR MEDIO DE OXIDACIÓN Y FILTRACIÓN MULTIMEDIA, DE AGUA DE POZO UTILIZADA EN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, Julio de 2012



Cc: Archivo  
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **ELIMINACIÓN DE HIERRO FERROSO POR MEDIO DE OXIDACIÓN Y FILTRACIÓN MULTIMEDIA, DE AGUA DE POZO UTILIZADA EN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO**, presentado por el estudiante universitario: **Edward Mauricio Berrios Méndez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, julio de 2012



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Emma Méndez**

Gracias querida mamá por todo el amor y apoyo que siempre me dio, gracias a su dedicación, ejemplo de lucha constante y tenacidad he logrado alcanzar esta meta; su arduo esfuerzo ha rendido frutos. Gracias por apoyarme, motivarme, acompañarme y siempre aconsejarme para seguir este camino que me condujo a este logro, esto se lo debo a usted, ya que nunca perdió la fe en mí.

**Wendy Villatoro**

A ti por estar siempre a mi lado, en las buenas y en las malas, iniciamos a caminar juntos hace más de 12 años y tu has sido parte importante de este proceso, me has apoyado para terminar la carrera, gracias por tu apoyo, por tu amor y por haberme dado dos lindos hijos.

**Gustavo y Julieta**

Amados hijos, ustedes son mi razón de ser, mi razón para luchar y seguir siempre hacia adelante, los amo y este logro se los dedico, siempre los voy a apoyar para que logren alcanzar prontamente esta meta y muchas más.

**Lilian Chávez**

Gracias por apoyarme en los momentos mas apremiantes de mi vida, gracias por creer en mí.

**Gustavo Sánchez**

Gracias por ser luz y guía en mi camino, por ser la mano amiga que siempre me ayudo a levantarme.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Evelyn Oliva**

Por todo tu apoyo para la realización de este trabajo de graduación, por tu apoyo como compañera de trabajo y como amiga, gracias de todo corazón por tu apoyo.

**R&M de C.A**

Por su apoyo en la realización de este trabajo de graduación, por darme la oportunidad de desarrollarme como profesional, gracias a R&M me he capacitado en diferentes áreas y he conocido lugares que jamás pensé conocer. En especial gracias a don Alberto Arguello y don Rodrigo Retana, gracias por confiar el inicio, desarrollo y crecimiento de su empresa, en aquel entonces era un joven de 29 años; he aprendido mucho con ustedes y espero haber cumplido y sobrepasado las expectativas puestas en mí. Gracias por su apoyo y confianza.

**Ruben Araya**

Por todo su apoyo a lo largo de mi carrera en la empresa, por ser maestro y amigo, lo que soy en la empresa se lo debo a su guía, gracias por todos los conocimientos que me ha transmitido, gracias maestro.

**Familia y amigos**

Por estar a mi lado todos estos años, por su amistad y cariño; gracias don Javier Villatoro, doña Julieta Cobón, don Alejandro Cobón, Magda de Cobón, Alejandrina Villatoro, Alberto Villatoro, don Juventino Berríos, doña Berta Cobón , Rudy, Marialejandra, Mariajose Karen, Ana Maria Rabé, Winston Rojas, Vladimir, Derick, Juan Carlos, Jorge Portillo, Ricardo y Julio.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS/HIPÓTESIS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	11
3.1. Variables.....	11
3.2. Delimitación de campo de estudio.....	11
3.3. Recursos humanos disponibles.....	12
3.4. Recursos materiales disponibles.....	12
3.5. Técnica cuantitativa o cualitativa.....	13
3.6. Recolección y ordenamiento de la información.....	13
3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	18
3.7.1. Tablas de ordenamiento y procesamiento de información .....	19
3.8. Análisis estadístico.....	22

4.	RESULTADOS.....	25
4.1.	Gráficas procesamiento de información.....	25
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	35
	CONCLUSIONES.....	43
	RECOMENDACIONES.....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	47
	APÈNDICES.....	49
	ANEXOS.....	57

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Ubicación geográfica finca señor Otto Donis.....	2
2.	Procedimiento toma de muestras agente NaClO.....	14
3.	Procedimiento toma de muestras agente caudal aire.....	15
4.	Concentración hierro (Fe+2) final versus diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio NaClO).....	26
5.	Concentración de hierro (Fe+2) final versus diferentes caudales de aire inyectado.....	27
6.	Concentración de hierro (Fe+2) removido versus diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio (NaClO).....	28
7.	Concentración de hierro (Fe+2) removido versus diferentes caudales de aire inyectado.....	29
8.	Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio (NaClO).....	30
9.	Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus diferentes caudales de aire inyectado.....	31
10.	Oxígeno disuelto en distintos caudales de aire inyectado.....	33
11.	Porcentaje de oxígeno disuelto utilizado en distintos caudales de aire inyectado.....	34

## TABLAS

I.	Concentración inicial de hierro.....	15
II.	Concentración de hierro (Fe+2) final agua tratada, respecto a hipoclorito de sodio en solución acuosa.....	16
III.	Concentración de hierro (Fe+2) final agua tratada, respecto a caudal de aire (GPM).....	16
IV.	Concentración de oxígeno disuelto inicial, agua de pozo sin tratamiento.....	17
V.	Concentración oxígeno disuelto respecto a caudal de aire inyectado.....	17
VI.	Cantidad de hierro (Fe+2) removido al utilizar distintas soluciones de hipoclorito de sodio (NaClO).....	19
VII.	Cantidad de hierro (Fe+2) removido al utilizar caudales (GPM) de aire.....	20
VIII.	Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus porcentaje solución en peso de hipoclorito de sodio (NaClO).....	20
IX.	Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus caudal de aire inyectado.....	21
X.	Comparación porcentaje de remoción hierro (Fe+2), soluciones hipoclorito de sodio versus caudal de aire (GPM).....	21
XI.	Porcentaje de oxígeno disuelto utilizado en cada caudal de aire inyectado.....	22
XII.	Costo por galón, agua tratada en planta Yammit.....	32

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Anhídrido Carbónico
<b>Fe<sup>+2</sup></b>	Ion ferroso
<b>Fe<sup>+3</sup></b>	Ion férrico
<b>Mn<sup>+2</sup></b>	Ion manganeso
<b>OH</b>	lón hidroxilo
<b>pH</b>	Escala acides, ion (OH)
<b>Ppm</b>	Partes por millón
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficiente de correlación



## GLOSARIO

- Absorbancia** Es la cantidad total de intensidad de luz que absorbe una muestra esta definida como:  $A = -\log(I/I_0)$  así se cambia una información, siendo  $I$  la intensidad de la luz que se hace incidir en la muestra.
- Aranceles** Es un impuesto o gravamen que se aplica a los bienes que son objeto de importación o exportación.
- CIF** *Incoterm*, acrónimo del término en inglés; *cost insurance and freight*; en español: costo, seguro y flete.
- Colorimetría** Es la ciencia que estudia la medida de los colores y que desarrolla métodos para la cuantificación del color, es decir la obtención de valores numéricos a partir de un color o escala de colores.
- Espectrofotómetro** Es un instrumento usado en la física óptica que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones.
- Ex – Works** *Incoterm*, acrónimo del término en inglés; en fábrica, lugar convenido.

<b>Fenantrolina</b>	La 1,10 fenantrolina es un compuesto heterocíclico, a temperatura ambiente se presenta en forma monohidratada como un solido blanco, inodoro, es un compuesto tóxico, peligroso para el ambiente.
<b>GPM</b>	Galones por minuto.
<b>IVA</b>	Impuesto al valor agregado, en Guatemala tiene el valor de 12 por ciento.
<b>Macromedidor</b>	Dispositivo de medición de agua, para caudales mayores a 2 metros cúbicos hora, y diámetros de tubería mayores a 2 pulgadas.
<b>Pirolox</b>	Marca comercial mundialmente conocida que envasa y comercializa arena volcánica de diferentes países, para ser utilizada en plantas filtradoras de agua.
<b>Venturi</b>	Conocido como tubo Venturi, consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad, después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido contenido en este segmento.
<b>Yammit</b>	Marca comercial de origen israelí, fundada en 1960 que se especializa en la manufactura y comercialización de plantas de tratamiento y filtración de agua.

## RESUMEN

El riego por goteo es una alternativa viable para optimizar el uso de agua en el sector agrícola, pero las altas concentraciones de hierro en los suelos, afectan considerablemente este tipo de riego; por lo cual se propone un tratamiento que reduzca la concentración de hierro presente en el agua, por medio de una planta eliminadora de hierro que utiliza un agente oxidante (hipoclorito de sodio u oxígeno) la cual oxida el hierro para luego retenerlo por medio de un filtro multimedia.

Este tratamiento será puesto a prueba en una finca al sur del país, en la cual los goteros ya están presentando taponamientos por el hierro; inicialmente se tomaran muestras para determinar la concentración inicial de hierro, para luego tratar el agua por medio de la planta tipo paquete marca Yammit, utilizando soluciones de hipoclorito de sodio y aire por medio de un dispositivo Venturi, al cual por medio de variación de la válvula de apertura inyectara el aire a máxima capacidad de saturación en agua.

Las diferentes soluciones de hipoclorito deben reducir el hierro presente, el agua tratada con cada solución será analizada en un laboratorio particular, serán distintas concentraciones lo cual servirá para determinar si la planta efectivamente reduce la cantidad de hierro al valor de 0,3 partes por millón y también se obtendrá la cantidad optima de hipoclorito de sodio; esto servirá para determinar los costos de operación de la planta.

Lo mismo sucederá con el aire, el cual al ser inyectado a la planta, deberá tener un efecto de reducción de hierro, las muestras de igual manera se

enviaran a un laboratorio de referencia; con los resultados se determinará cual es el mejor agente oxidante, en cuanto a capacidad de reducción y en cuanto a costo; sin olvidar que el buen funcionamiento de la planta resolverá el problema de taponamientos de goteros que actualmente tiene el agricultor, se demostrara que la planta es funcional, y esto servirá para seguir utilizando esta tecnología.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar planta tipo Paquete marca Yamit modelo F6020HM para la reducción de hierro ferroso a valores menores a 0,3 partes por millón según la norma ASEA 24, Tel Aviv, Israel; en agua que se utilizará en riego por goteo.

### Específicos

1. Determinar la eficiencia de remoción de hierro ferroso de diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio en solución acuosa.
2. Determinar la eficiencia de remoción de hierro ferroso de diferentes caudales de aire.
3. Comparar agente oxidante hipoclorito de sodio versus agente oxidante aire, y determinar que agente es mas efectivo para la remoción de hierro ferroso en agua para ser usada en riego por goteo.
4. Determinar el tiempo de saturación del medio filtrante (grava volcánica) en función de cada agente reductor.
5. Determinar los costos de operación de la planta tipo paquete, los cuales comprenden, el consumo de agente reductor, mano de obra de operario, eventual tiempo de cambio del medio filtrante.

## HIPÓTESIS

Es factible disminuir la concentración inicial de hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) de agua de pozo a niveles menores a 0,3 partes por millón para ser utilizada en riego por goteo, por medio del uso de la planta tipo paquete Yamit modelo F6020HM a caudal fijo o estable, que funciona bajo el principio de oxidación que disminuirá y/o eliminará el hierro ferroso del agua por inyección controlada de agente oxidante en un dispositivo Venturi de caudal regulado, en el cual se probará la eficiencia de dos agentes oxidantes del hierro ferroso los cuales se compararán entre sí: hipoclorito de sodio en solución acuosa y aire, a distintas concentraciones para su posterior filtración en tanques que contienen arena volcánica.

## INTRODUCCIÓN

El riego por goteo, igualmente conocido como riego gota a gota, es un método de irrigación utilizado en las zonas áridas o con menor cantidad de agua de nuestro país, este tipo de riego permite la utilización óptima de agua y abonos, el agua aplicada por este método de riego se infiltra hacia las raíces de las plantas, irrigando directamente la zona de influencia de las raíces a través de tuberías y emisores goteros, esta técnica es la innovación más importante en agricultura desde la invención de los aspersores en 1930.

En Guatemala son varias las regiones en las cuales se ha adoptado el riego por goteo, especialmente en las regiones de oriente: Zacapa, Chiquimula y parte de la región de Jutiapa, tomando un especial auge en la zona cañera de la costa sur, los cultivos en los cuales se utiliza con más frecuencia es; melón, sandía, hortalizas (tomate, chile pimiento, pepino), café, flores (especialmente rosas) y últimamente caña de azúcar; este tipo de riego es ideal en regiones con poco suministro de agua, debido a que necesita pequeños caudales a bajas presiones.

Es beneficioso para el cultivo por la proximidad del agua a las plantas por el número variable de emisores (goteros), al reducir el volumen de suelo mojado y por consiguiente la capacidad de almacenamiento, se debe operar frecuentemente a caudales pequeños, normalmente se 1 a 3 litros por hora por cada emisor. Muchos han sido los aciertos en el riego por goteo, pero también se cuentan muchos fracasos, esto debido al enemigo número 1 del riego por goteo, taponamientos de goteros por la formación de depósitos que con el tiempo llegan a obstruir totalmente el sistema; en Guatemala el mayor

elemento que tapona los goteros es el hierro ferroso, el cual se encuentra en la mayoría de regiones del país.

## 1. ANTECEDENTES

La precipitación de hierro que ocasiona taponamientos en los emisores o goteros, se origina por la presencia de hierro y manganeso bajo la forma de iones ferrosos y manganesos ( $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$ ) contenidos en la aguas de pozos profundos, a la presión del pozo, usualmente entre 20 y 60 atmósferas, el agua contiene gran cantidad de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) disuelto. Bajo estas condiciones el anhídrido carbónico forma ácido carbónico, el cual a las grandes presiones existentes en ese ambiente es un ácido relativamente fuerte, teniendo el agua normalmente un pH entre 3 y 4, además de lo anterior el agua subterránea, por estar en contacto con sedimentos orgánicos durante mucho tiempo casi no tiene nada de oxígeno disuelto.

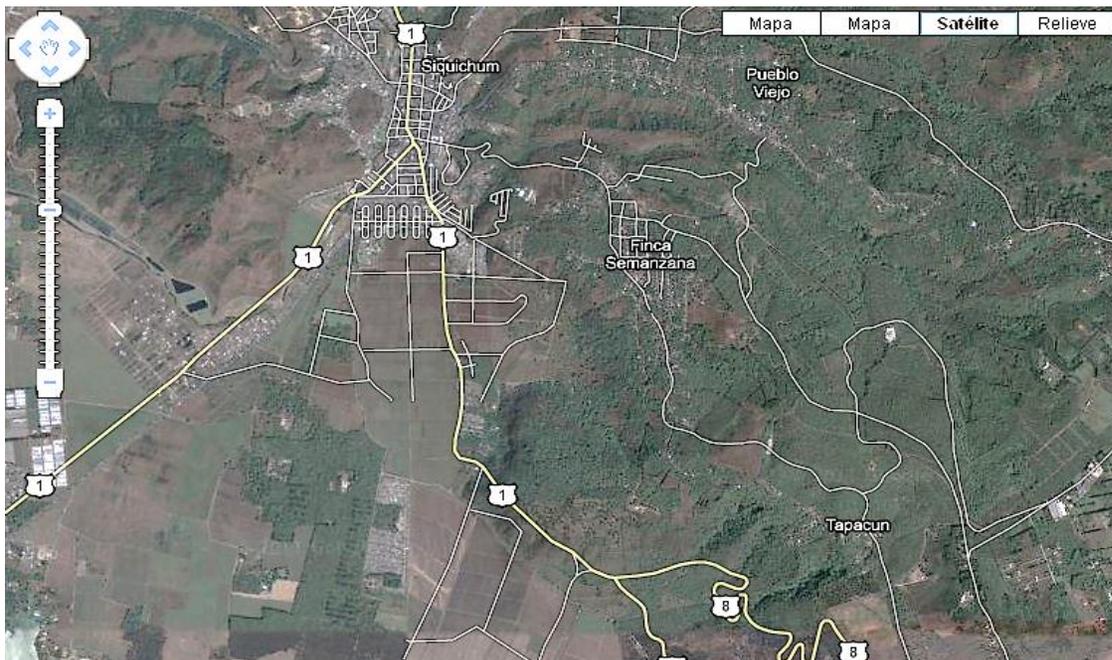
Por lo tanto su ambiente es altamente reductor, por ello las formas prevalecientes de los metales hierro y manganeso son  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$ . El hierro es el principal enemigo de los sistemas de riego por goteo; las regiones del sur del país por ser suelos de precedencia volcánica, son ricos en este tipo de elementos, el agua de pozo al salir al exterior sufre cambios espontáneamente, entre ellos sufre cambio de pH lo que favorece la formación de compuestos de hierro que son insolubles en agua, lo que conlleva a la precipitación en las mangueras y goteros de los sistemas de riego.

En Guatemala los pequeños y medianos agricultores están migrando al sistema de riego por goteo, ya que representa un menor consumo de agua, y se ha demostrado que los cultivos aprovechan mejor los nutrientes, esto debido a que se puede hacer también fertirrigación, también se han demostrado mejoras sustanciales en los rendimientos de los cultivos; pero es

muy frecuente el taponamiento de los emisores o goteros, por precipitados, por el tipo de suelos de Guatemala, el elemento común presente en la mayoría de aguas de pozos es el hierro, el cual se reconoce inicialmente por las manchas ocre ferruginosas que el agua deja a su paso; color amarillento en el agua estancada y sabor a óxido de hierro al ser consumida.

Actualmente en el parcelamiento Los Pocitos, municipio de Villa Canales, departamento de Guatemala, en la finca del Señor Otto Donis, ubicada entre la finca Esperanza y la Finca Pueblo Viejo, ruta hacia Santa Elena Barillas, exactamente a la entrada de la aldea Los Pocitos, parte posterior del Volcán de Pacaya, a unos 15 kilómetros de Villa Canales.

Figura 1. **Ubicación geográfica finca señor Otto Donis**



Fuente: [www.googleearth.com/guatemala](http://www.googleearth.com/guatemala). Consulta: 01 de 11 de 2011.

Esta instalado un proyecto de riego por goteo para 3 manzanas de puerro; dicho sistema fue instalado en agosto de 2010, y al tercer mes de trabajo esta presentando taponamiento de los goteros, lo que se puede observar en el gotero es una incrustación de color amarillento, lo cual hace ineficiente el riego en los sectores donde se muestra el taponamiento, de no hacerse un tratamiento efectivo para remover el hierro del agua, el sistema colapsara prontamente, el cultivo de puerro ha bajado su costo en el mercado, este ya no es interesante para el agricultor.

Por lo cual el señor Otto Donis quiere utilizar riego por goteo en caña de azúcar, la cual espera vender al ingenio San Diego; en la actualidad existen varios métodos para remover hierro del agua, el mas común y ampliamente utilizado por los agricultores es las piletas de aireación, los caudales en el riego por goteo suelen ser relativamente pequeños al ser comparados contra riegos de otro tipo; en piletas de gran tamaño captan agua de pozo, normalmente por gravedad o a veces impulsados por bombas de pequeño caudal, circulan el agua de una pileta a otra pileta, en el salto por diferencia de nivel de ambas piletas.

El agua tiene contacto con el aire, o se da el proceso de aireación del agua, lo que reduce el contenido de hierro en el agua, luego se tiene el cuidado de sumergir la succión de la bomba sin que toque el fondo de la pileta, esto con el fin de no succionar los precipitados o lodos de hierro, eventualmente al vaciar las piletas se remueve el material concentrado en el fondo, este método tiene el inconveniente que requiere mucho espacio y cierto tiempo de transito.

En el caso expuesto anteriormente no se cuenta con terreno adicional para hacer este tipo de tratamiento, por lo cual se hace necesario un

tratamiento tipo paquete; en el cual se pueda reducir el hierro ferroso a través de inyección de agentes oxidantes, para luego ser retenido por un medio filtrante, obteniendo agua útil para riego, la cual hará que el sistema de riego opere adecuadamente y no se generen taponamientos en los goteros.

Actualmente se esta impulsando en Guatemala, el tratamiento de este tipo de aguas, por medio de plantas tipo paquete, actualmente la empresa Regulación y Manejo de Fluidos S.A, tiene un planta tipo paquete marca Yamit modelo F6020HM la cual tiene un caudal nominal de (0,3 a 0,8) litros por segundo, tiene la capacidad de inyectar el agente oxidante y luego retiene el hierro precipitado por medio de filtración multimedia, en este caso grava volcánica de diámetro de 1 a 20 milímetros.

Entendiendo que la inversión que tiene que hacer el agricultor es alta, se hace necesario arrancar la máquina, la cual se encuentra nueva, no ha sido probada en Guatemala ni en otra parte de Centro América, se debe probar la efectividad de la planta, además de hacer una comparación de agente oxidante, debido a que la planta consumirá periódicamente dicho agente, según las horas de trabajo o el galonaje obtenido, el agente oxidante se vuelve un insumo que el agricultor debe adquirir constantemente, por lo cual se debe estudiar la funcionalidad de los agentes recomendados para oxidar hierro: aire o método de aireación.

El aire es un elemento que se encuentra en el ambiente y es totalmente gratis, el segundo agente es el cloro, este puede ser líquido por dilución de hipoclorito de sodio.

El hierro en el agua es un problema para los sistemas de riego por goteo, en la actualidad un agricultor tiene instalado un sistema de riego por goteo, el

cual esta presentando problemas de taponamiento por precipitación de hierro; este sistema fue instalado por el propio usuario, sin tomar en cuenta el tipo de agua que tiene en sus pozos, para instalar el sistema se debió hacer un análisis de la calidad de agua del lugar, a partir del resultado se tenía que plantear un método de remoción del hierro existente en el lugar, no se tiene ninguna cuantificación por análisis de laboratorio de la cantidad presente de hierro en el agua.

El problema existe y es grave, porque puede inutilizar el sistema y la inversión inicial en materiales para el sistema de riego la cual fue alta, esta cercana a ser una pérdida total; existe un método empírico o artesanal el cual consiste en tener lagunas o reservorios, este sistema requiere mucho espacio, el cual desafortunadamente no tiene el agricultor en mención; los sistemas de riego por goteo tienen una vida útil de más de 10 años, por lo cual la inversión en una solución de planta tipo paquete es viable, porque dará vida al proyecto durante los próximos 10 años.

Por ser un método hasta cierto punto desconocido por los agricultores de la región tienen cierta desconfianza en adquirir la tecnología, por lo cual se hará la prueba con la máquina Yamit modelo F6020HM en una plantación de caña de azúcar; y se hará un estudio comparativo en los agentes oxidantes, aire y cloro (líquido), luego el precipitado se debe retirar por medio de filtros multimedia, en el caso de la planta en mención el medio que tiene es grava volcánica con tamaños de 1 a 20 milímetros; luego de el tratamiento se debe determinar la cantidad de hierro en el agua producto de la planta, el cual como resultado final debe ser agua apta para ser usada en riego por goteo.

Se debe determinar el tiempo de saturación de los filtros, con ello determinar el tiempo de retrolavado; así como el costo de manejo y costo de galón de agua, datos importantes para la económica del agricultor.

Por medio de la planta Yamit modelo F6020HM, se determinará si es factible eliminar la cantidad de hierro que esta presente en el agua de pozo de la finca del señor Otto Donis; así como el tiempo de eliminación, se debe cuantificar la cantidad inicial presente de hierro por medio de análisis de laboratorio, para luego tomar agua de la finca y hacer corridas en la planta, en las cuales se comparará la efectividad de dos agentes oxidantes, aire y cloro, en cada agente oxidante, evaluando en conjunto la capacidad de retención de la grava volcánica, la cual variara su tiempo de saturación por la comparación de dos agentes oxidantes.

## 2. MARCO TEÓRICO

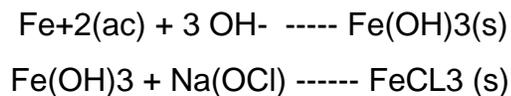
Los suelos de Guatemala en especial los de la parte sur del país, son de origen volcánico lo que representa alta cantidad de hierro y manganeso en suelos y en el agua que se encuentra en los mismo; el hierro es el elemento que presenta mayores problemas en los sistemas de riego por goteo, por lo cual será el elemento a perseguir y eliminar en los sistemas, el manganeso no será tomado en cuenta, porque los daños que este puede causar no son significativas en el problema que se analiza.

La presencia de hierro, la forma de ion ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) contenidos en la aguas de pozos profundos, a la presión del pozo, usualmente entre 20 y 60 atmósferas, el agua contiene gran cantidad de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) disuelto. Bajo estas condiciones el anhídrido carbónico forma ácido carbónico, el cual a las grandes presiones existentes en ese ambiente es un ácido relativamente fuerte, teniendo el agua normalmente un pH de entre 3 y 4, además de lo anterior el agua subterránea, por estar en contacto con sedimentos orgánicos durante mucho tiempo casi no tiene nada de oxígeno disuelto.

Por lo tanto su ambiente es altamente reductor, por ello la formas prevaleciente del hierro es  $\text{Fe}^{+2}$ ; cuando el agua es extraída a través de pozo mecánico, ocurren cambios espontáneamente, como la perdida del  $\text{CO}_2$  disuelto, lo cual da como resultado un incremento del pH, el agua al estar en la superficie, inicia a recuperar oxígeno, lo cual genera una pronta oxidación del hierro a forma  $\text{Fe}^{+3}$ , el cual con el nuevo pH forma  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , el cual se precipita y es completamente insoluble en agua, lo que presenta color

amarillento en el agua, incrustaciones de color amarilla o cobriza en mangueras y goteros.

Esta es la reacción que presente en el agua de pozo



Los niveles máximos de hierro en agua es 0,3 miligramos por litro, (Ref: Nakayama, F.S, and Bucks D.A (1981) Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity, Transactions of the ASEA 24, Tel Aviv, Israel. p. 77-80), por encima de estos niveles, el agua se torna amarillenta o color cobrizo, el método propuesto para eliminar el hierro presente en el agua utilizada en riego por goteo, es una planta tipo paquete la cual regula el PH, inyecta un agente oxidante, en este caso de análisis, se comparará la efectividad de dos agentes oxidantes, aire y cloro.

El aire se utiliza para oxidar o convertir el hierro disuelto a un estado que pueda ser filtrado, este agente oxidante, es introducido a un tanque de la planta por medio de bomba o dispositivo de inyección, el aire en contacto con el agua rica en hierro, precipita en el tanque, el agua con precipitados de hierro es llevada al segundo tanque, para ser retenido el precipitado de hierro por medio de filtro de grava volcánica.

El cloro se introduce de la misma manera por medio de una bomba, en este caso el cloro se debe preparar como hipoclorito de sodio, en este caso el agua con cloro pasa al primer tanque, luego precipita, para ser conducida el agua con precipitado al siguiente tanque para ser retenido por medio del filtro de grava volcánica.

El cloro no tiene movilidad a nivel del suelo, además de ser útil como desinfectante de las tuberías de goteo y del agua misma, por acción bactericida, las concentraciones que se utilizaran de hipoclorito de sodio, no serán mayores al 5 por ciento en peso; esta cantidad de cloro en solución puede ser útil para reducir el hierro, útil para desinfección y no afecta al cultivo como tal, en concentraciones mas altas, el cloro puede afectar a ciertos cultivos.

En el proceso propuesto es importante el control de pH, normalmente se debe aumentar el pH, esto favorece la precipitación del hierro, generalmente se logra con cal apagada o cal comercial, también se puede hacer con solución de hidróxido de sodio.

Antes de que el hierro pueda ser filtrado, necesita ser oxidado al estado en el cual pueda formar un complejo insoluble, la oxidación, no importando el agente que se utilice, comprende la transferencia de electrones del hierro por el agente oxidante; el hierro ferroso ( $Fe^{+2}$ ) es oxidado a óxido férrico ( $Fe^{+3}$ ), el cual forma fácilmente el complejo insoluble hidróxido de hierro  $Fe(OH)_3$ , la cloración es recomendable para la precipitación del hierro, la dosificación se determinará por medio de la fase experimental. Para luego ser retenido el precipitado por grava volcánica.

El oxígeno disuelto proviene de la mezcla del agua con el aire, ocasionada por el viento y/o en la mayoría de los casos, principalmente del oxígeno que liberan las microplantas acuáticas en sus procesos de fotosíntesis. La solubilidad del oxígeno como la de cualquier otro gas en el agua depende de la presión atmosférica imperante en cada sitio, de la temperatura media del cuerpo de aguas y de su contenido en sales disueltas. En términos generales, la solubilidad del  $O_2$  en el agua es directamente proporcional a la presión e

inversamente proporcional a la temperatura y a la concentración de sales disueltas.

La dependencia de la temperatura en la solubilidad de un gas puede observarse en hechos cotidianos tales como el de hervir agua en un recipiente, mediante el burbujeo que se desprende conforme va subiendo la temperatura, la dependencia de la presión puede observarse en el simple hecho de destapar una bebida carbonatada por la efervescencia que se produce cuando se equilibra la presión interna de la botella con la presión exterior.

Una consecuencia de la dependencia de la presión en la solubilidad de un gas en el agua la constituye el llamado mal de montaña, generado por el desprendimiento de oxígeno en la sangre cuando el cuerpo cambia bruscamente de presión. Esta dependencia se expresa matemáticamente por la Ley de Henry, aun cuando no existe una concentración mínima de oxígeno que cause efectos físicos importantes en las aguas de pozo, se toma como un valor promedio normal la cantidad de 5 miligramos por litro.

### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

- Cantidad de hierro en agua de pozo (mg/l), (partes por millón)
- Cantidad de hierro en agua después del tratamiento (mg/l) (ppm)
- Caudal agua ingreso a planta (GPM)
- Caudal agua egreso de planta (GPM)
- Concentración cloro (hipoclorito de sodio) (por ciento en peso)
- Caudal venteo aire (GPM)
- Tiempo para retrolavado (horas trabajo)
- Costo de operación planta (Q/mes)
- Costo galón agua tratada (Q/gal)

#### **3.2. Delimitación de campos de estudio**

La eliminación de hierro en agua para uso en sistema de riego por goteo, comprende la reducción de un elemento presente en el agua, por medio de un agente oxidante.

Para el agente oxidante debe calcularse la concentración a utilizar del mismo esto en base a la concentración final de hierro en el agua, esta concentración será determinada por medio de análisis de laboratorio designado, así mismo se determina el tiempo máximo de trabajo para la grava

volcánica, el cual dará como resultado el período en el cual se debe hacer el retrolavado de la misma.

Así mismo, hacer un estudio económico, del costo proyectado a un año de servicio de la planta, costo de insumo, costo de manejo de planta, costo de agua tratada.

### **3.3 Recursos humanos disponibles**

Para la realización de la práctica experimental se necesito mover la planta tipo paquete hacia la finca del señor Otto Donis, por lo compacto de la planta y su fácil manipulación, no fue necesario personal adicional para operarla.

- . Personal de Laboratorio designada para hacer las pruebas
- . Tesista

### **3.4 Recursos materiales disponibles**

Los materiales de apoyo para realizar la práctica experimental fueron comprados una semana antes de hacer la prueba, fueron adquiridos en almacenes especializados en manejo y control de agua.

- . Planta Yamit Modelo F6020HM
- . Macromedidores de turbina tipo Woltman (2)
- . Hipoclorito de sodio
- . Venturi. (Caudal nominal 0,80 GPM)
- . Pruebas rápidas determinación de hierro colorimétricas marca HATCH.
- . Pruebas rápidas determinación de oxígeno disuelto marca LaMotte

### **3.5 Técnica cuantitativa o cualitativa**

Existen varias pruebas para determinar hierro en agua, las hay con sensibilidad capaz de detectar 0,001 partes por millón, hasta las de amplio margen que detectan hierro en agua de 0,10 en 0,10 partes por millón, sensibilidad suficiente para este tipo de experimento.

El nombre de la prueba elegida para determinar el hierro en el agua es:

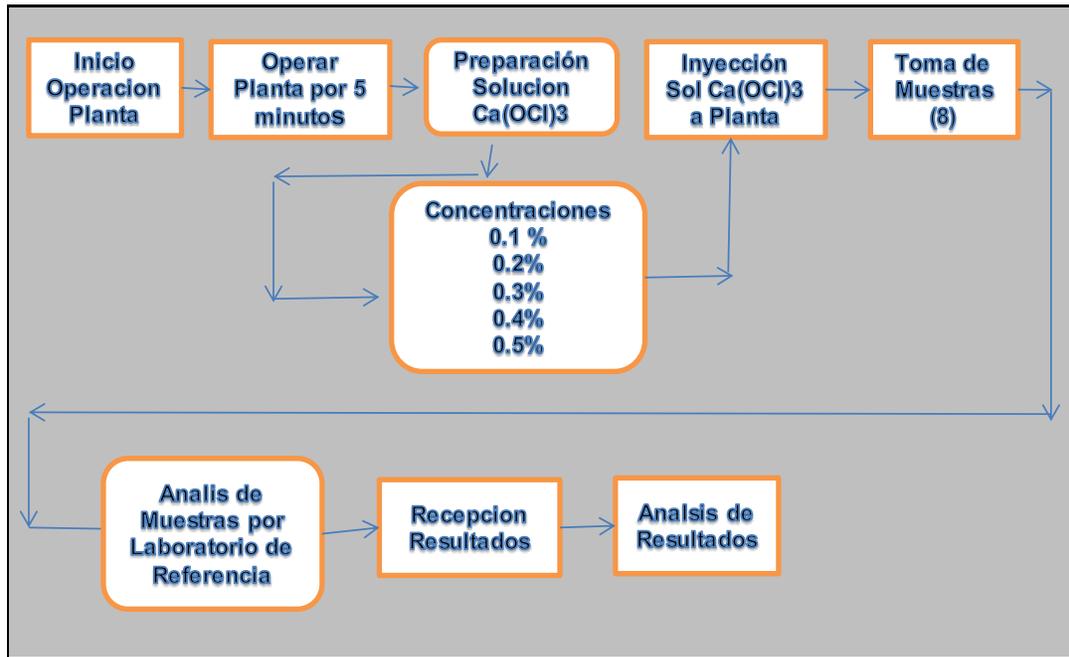
- Método Standard, colorimetría 1,10 fenantrolina, medición de absorbancia por espectrofotómetro. (Laboratorio privado)

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

En la finca del señor Otto Donis ubicada en el municipio de Villa Canales, se tomaran 8 muestras de agua de pozo, las cuales serán llevadas al laboratorio de referencia, para obtener los resultados iniciales de miligramos por litro de hierro en el agua, esta concentración será el punto de partida para el análisis.

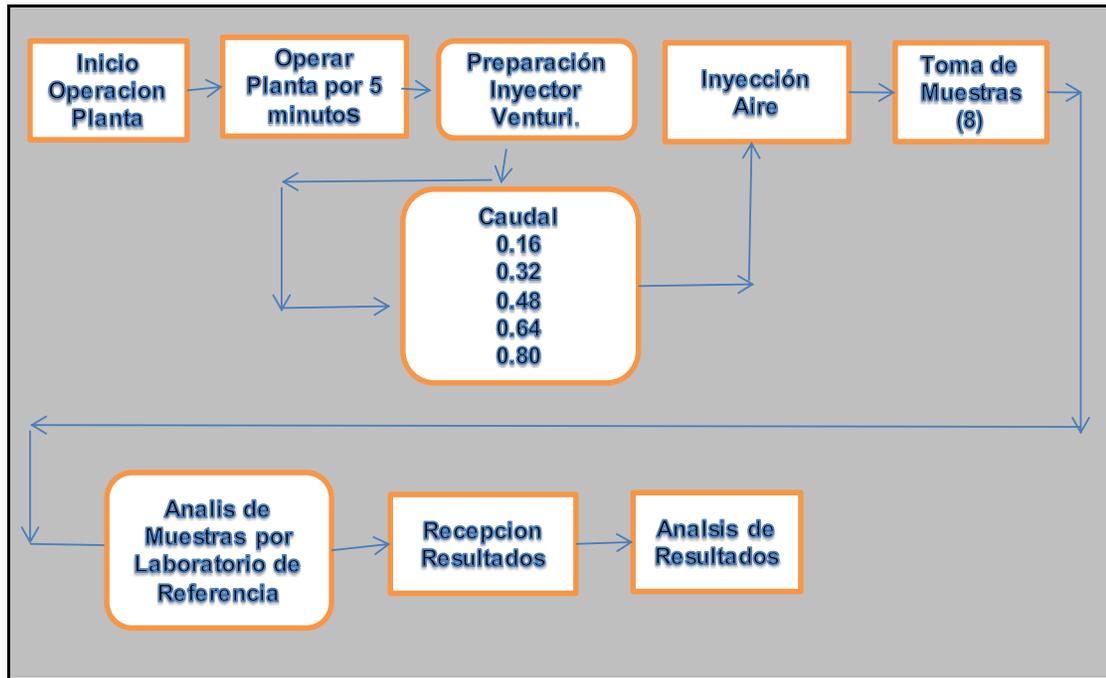
Las muestras se tomaran en recipientes adecuados, normalmente son proporcionados por los laboratorios, respetando los procedimientos para toma de muestras de agua; al hacer las pruebas con los dos agentes oxidantes, tanto aire inyectado por medio de dispositivo Venturi, como cloro (hipoclorito de sodio) en tres concentraciones diferentes, se tomara una muestra proveniente del proceso de eliminación, los cuales serán analizados en el laboratorio de referencia; se utilizará un solo laboratorio para las muestras tanto iniciales como finales.

Figura 2. Procedimiento toma de muestras agente NaClO



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Procedimiento toma de muestras agente caudal aire



Fuente: elaboración propia.

Tabla I. Concentración inicial de Hierro

No. de muestra	Concentración de Hierro
Número de Muestra: No. 1	() Concentración de Hierro de Agua sin Tratar. 0,8 partes por millón

Fuente: elaboración propia.

**Tabla II. Concentración de hierro (Fe+2) final agua tratada, respecto a hipoclorito de sodio en solución acuosa**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	% Solución Cloro	(Fe+3)final ppm							
1	0,1	0,80	0,70	0,70	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70
2	0,2	0,70	0,60	0,70	0,70	0,60	0,70	0,70	0,70
3	0,3	0,40	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50
4	0,4	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20
5	0,5	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,20	0,20	0,10

Fuente: elaboración propia, Analab.

**Tabla III. Concentración de hierro (Fe+2) final agua tratada, respecto a caudal de aire (GPM)**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	Caudal (GPM) Aire.	(Fe+2)final ppm							
1	0,16	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
2	0,32	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
3	0,48	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
4	0,64	0,70	0,70	0,80	0,70	0,80	0,70	0,70	0,70
5	0,80	0,70	0,70	0,70	0,70	0,80	0,70	0,70	0,70

Fuente: elaboración propia, Analab.

Tabla IV. **Concentración oxígeno disuelto inicial, agua de pozo sin tratamiento**

No. de Muestra	Concentración de oxígeno disuelto
Número de Muestra: No. 1	( ) Concentración de oxígeno disuelto, agua sin tratar. 5,15 mg/l

Fuente: elaboración propia, prueba rápida Hatch series Vic 300.

Tabla V. **Concentración de oxígeno disuelto respecto a caudal de aire inyectado**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	Caudal (GPM)	Oxígeno							
	Aire.	Disuelto (mg/l)							
1	0,16	5,10	5,05	5,00	5,15	5,00	5,05	5,10	5,10
2	0,32	5,05	5,00	5,00	5,10	5,15	5,15	5,00	5,00
3	0,48	5,10	5,10	5,10	5,00	5,10	5,15	5,00	5,00
4	0,64	5,05	5,00	5,05	4,95	5,00	5,00	5,05	5,00
5	0,80	4,95	5,00	4,95	4,95	5,00	5,00	4,95	5,00

Fuente: elaboración propia, prueba rápida Hatch series Vic 300.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Los datos provenientes de los análisis de laboratorio, son la información fundamental para el estudio, ya que estos determinaran la efectividad de la planta en cuanto a la remoción de hierro en el agua, los datos serán tabulados conforme se hagan las pruebas, es decir, la variable que ordena será el tipo y concentración de agente oxidante, esto último en el caso del cloro; en el caso del aire, se toma el caudal por minuto; en el caso puntual del aire, por ser esta una combinación de gases inertes y oxígeno, este último elemento es el que oxidara el hierro.

Para lograr la mayor eliminación posible de hierro, se graduara el soplador eléctrico a su máxima capacidad, esto para lograr en la inyección de oxígeno en el agua, la mayor cantidad de oxígeno disuelto, por lo cual se agregara una análisis en este procedimiento, el cual será análisis de oxígeno disuelto en el agua de salida, esto nos dará un parámetro mas confiable, porque se hará la comparación de concentración eliminada de hierro versus concentración de oxígeno en el agua.

Cuando se procesa la información se podrá concluir cual es el reactivo o si ambos son útiles para remover el hierro, esto concatenado al factor económico, ya que no se debe olvidar que este estudio va íntimamente relacionado con el factor costo, ya que evidentemente el agricultor tiene un problema, pero se debe ponderar económicamente la solución, la información servirá para justificar ante el afectado cual es la mejor solución para el riego de sus cultivos, esto hace importante el manejo de los resultados, ya que serán de suma utilidad para la toma de decisión por parte del afectado final.

### 3.7.1. Tablas de ordenamiento y procesamiento de Información

Se hicieron corridas experimentales, utilizando dos agentes oxidantes, se obtuvieron resultados de cantidad de hierro ferroso removido, esto permite analizar la efectividad de cada uno de los agentes utilizados en las corridas experimentales.

Tabla VI. **Cantidad de hierro (Fe+2) removido al utilizar distintas soluciones de hipoclorito de sodio (NaClO)**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	% Solución	(Fe+2)final Removido ppm							
1	0,1	0,00	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10
2	0,2	0,10	0,20	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10	0,10
3	0,3	0,40	0,30	0,30	0,40	0,40	0,30	0,40	0,30
4	0,4	0,60	0,60	0,60	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60
5	0,5	0,60	0,70	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,70

$$\text{Concentración (Fe+2) removido} = (\text{Fe+2 inicial} - \text{Fe+2final})$$

Fuente: elaboración propia.

**Tabla VII. Cantidad de hierro (Fe+2) removido al utilizar caudales (GPM) de aire**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	Caudal (GPM)	(Fe+2)final							
		Removido ppm							
1	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,64	0,10	0,10	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10
5	0,80	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10

Concentración (Fe+2)removido = (Fe+2 inicial – Fe+2final)

Fuente: elaboración propia.

**Tabla VIII. Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus porcentaje solución en peso de hipoclorito de sodio (NaClO)**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	% Solución Cloro	% (Fe+2)							
		Removido							
1	0,1	0,00	12,50	12,50	0,00	0,00	0,00	12,50	12,50
2	0,2	12,50	25,00	12,50	12,50	25,00	12,50	12,50	12,50
3	0,3	50,00	37,50	37,50	50,00	50,00	37,50	50,00	37,50
4	0,4	75,00	75,00	75,00	87,50	75,00	75,00	75,00	75,00
5	0,5	75,00	87,50	87,50	87,50	87,50	75,00	75,00	87,50

Porcentaje de Hierro Removido por ciento = ((Conc Hierro Inicial Agua sin tratar – Conc Hierro Final))/ Conc Hierro Inicial Agua sin tratar.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla IX. Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus caudal de aire inyectado**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	Caudal (GPM) Aire.	% (Fe+2) Removido							
1	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,64	12,50	12,50	0,00	12,50	0,00	12,50	12,50	12,50
5	0,80	12,50	12,50	12,50	12,50	0,00	12,50	12,50	12,50

Porcentaje de Hierro Removido por ciento = ((Conc Hierro Inicial Agua sin tratar – Conc Hierro Final))/ Conc Hierro Inicial Agua sin tratar.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla X. Comparación porcentaje de remoción hierro (Fe+2), soluciones hipoclorito de sodio versus caudal aire (GPM)**

Rep	1		2		3		4		5		6		7		8	
No de	% (Fe+2) Removido		% (Fe+2) Removido		% (Fe+2) Removido		% (Fe+2) Removido		% (Fe+2) Removido							
Muestra	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire	NaOCl	Aire
1	0,00	0,00	12,50	0,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,50	0,00	12,50	0,00
2	12,50	0,00	25,00	0,00	12,50	0,00	12,50	0,00	25,00	0,00	12,50	0,00	12,50	0,00	12,50	0,00
3	50,00	0,00	37,50	0,00	37,50	0,00	50,00	0,00	50,00	0,00	37,50	0,00	50,00	0,00	37,50	0,00
4	75,00	12,50	75,00	12,50	75,00	0,00	87,50	12,50	75,00	0,00	75,00	12,50	75,00	12,50	75,00	12,50
5	75,00	12,50	87,50	12,50	87,50	12,50	87,50	12,50	87,50	0,00	75,00	12,50	75,00	12,50	87,50	12,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Porcentaje de oxígeno disuelto utilizado en cada caudal de aire inyectado**

	No de Repetición	1	2	3	4	5	6	7	8
No. Muestra	Caudal (GPM)	% Oxigeno							
	Aire.	Disuelto Utilizado							
1	0,16	0,97	1,94	2,91	0,00	2,91	1,94	0,97	0,97
2	0,32	1,94	2,91	2,91	0,97	0,00	0,00	2,91	2,91
3	0,48	0,97	0,97	0,97	2,91	0,97	0,00	2,91	2,91
4	0,64	1,94	2,91	1,94	3,88	2,91	2,91	1,94	2,91
5	0,80	3,88	2,91	3,88	3,88	2,91	2,91	3,88	2,91

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

El análisis comparativo de los agentes oxidantes tanto en caudal como concentración dará inicialmente una serie de resultados, siendo la concentración de hierro final una variable dependiente de la concentración de agente oxidante, hipoclorito de sodio o aire, siendo estas últimas las variables independientes.

[Fe] agua =  $f$  [Na(OCl)] ( en diferentes concentraciones)

[Fe] agua =  $f$  (O<sub>2</sub> (disuelto)) (a saturación en inyección)

Evidentemente lo mas importante es el concentración de hierro a la salida de la planta, esto unido a la concentración y agente utilizado de prueba, se tomaran ocho muestras por cada concentración de hipoclorito de sodio o caudal de aire, este número de muestras dará un límite de confianza esperado por encima del 90 por ciento, se considera que estará por encima del 95 por ciento las muestras se enviaran a analizar al laboratorio de referencia,

tomando ocho muestras se busca establecer o comprobar que la máquina trabaja de manera estable y uniforme.

Al obtener ocho muestras se tiene la posibilidad de descartar algún resultado que se salga de la media establecida por los mismos ocho resultados, el tema de costo por análisis será absorbido por la empresa que proporciona la planta tipo paquete marca Yamit.



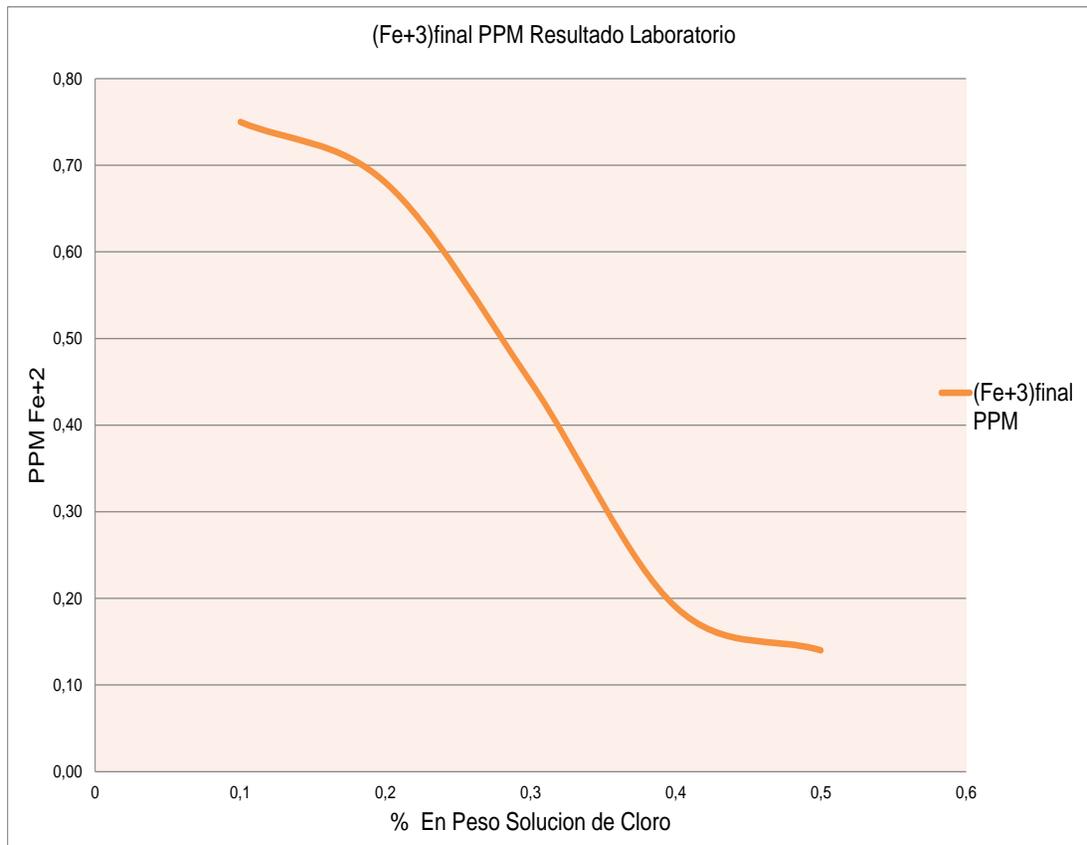
## **4. RESULTADOS**

Al ser comparados los dos agentes oxidantes se obtuvieron diferentes resultados de concentración final de hierro ferroso tanto para hipoclorito de sodio en solución acuosa, como para caudales de aire inyectados por dispositivo Venturi.

### **4.1. Gráficas procesamiento de información**

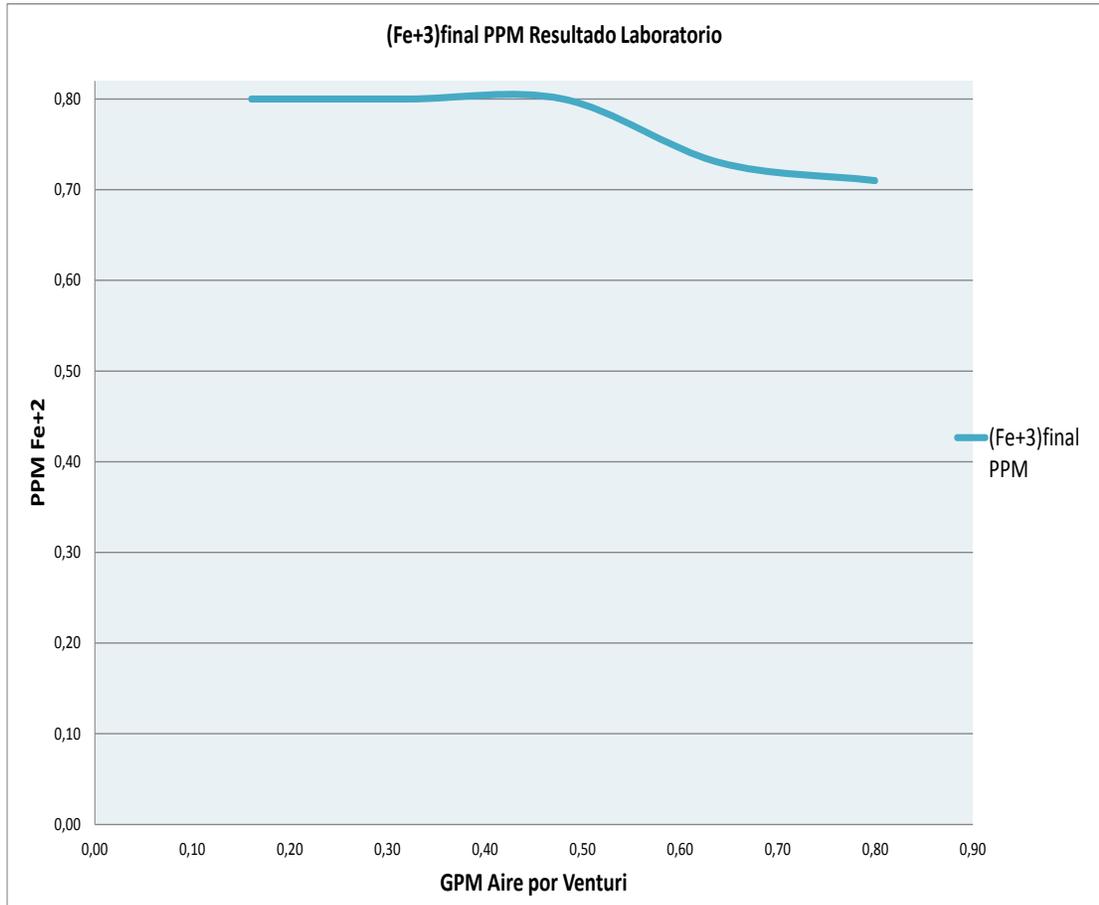
Con las concentraciones obtenidas de hierro ferroso de agua final tratada con la planta Yammit, utilizando hipoclorito de sodio y aire como agentes oxidantes, se obtiene el comportamiento de los mismos al ser comparados con los caudales de operación.

Figura 4. **Concentración hierro (Fe+2) final versus diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio (NaClO)**



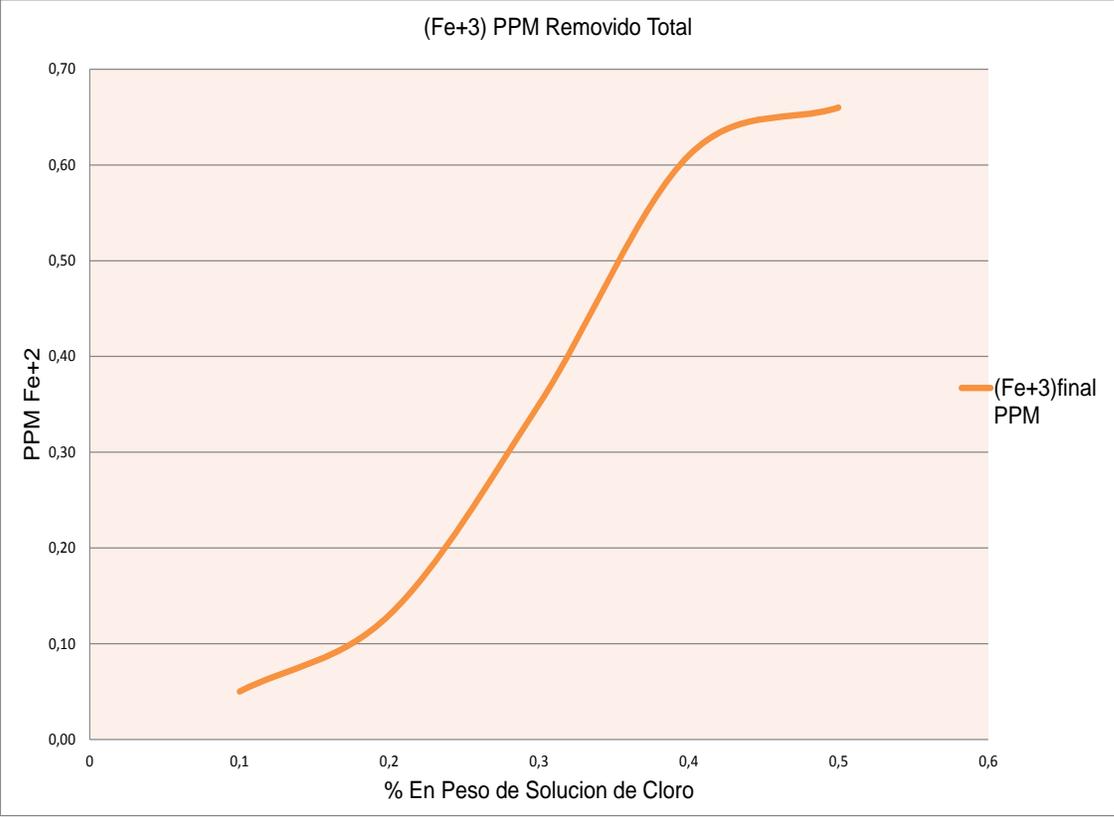
Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla II.

Figura 5. **Concentración hierro (Fe+2) final versus diferentes caudales de aire inyectado**



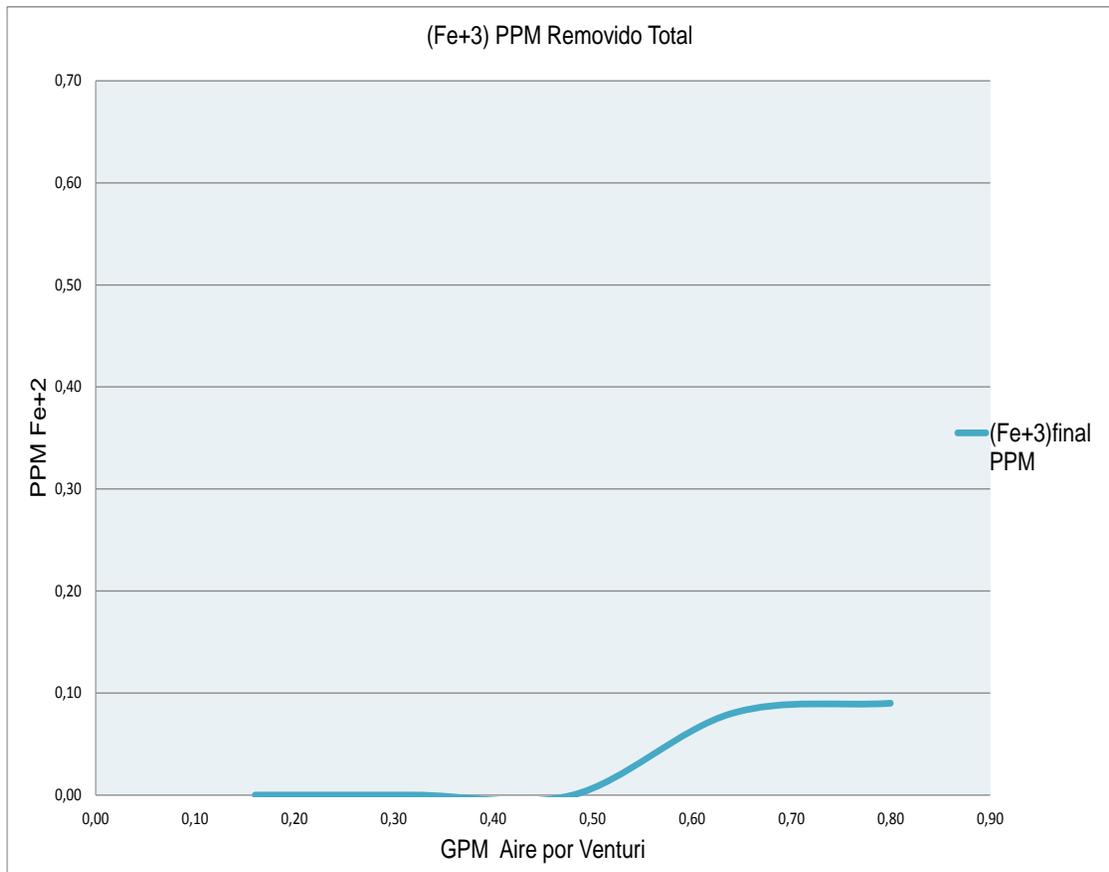
Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla III.

Figura 6. **Concentración de hierro (Fe+ 2) removido versus diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio (NaClO)**



Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla VI.

Figura 7. **Concentración de hierro (Fe+ 2) removido versus diferentes caudales de aire inyectado**



Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla VII.

Por medio de las figuras 5 y 6 se puede determinar el comportamiento de los dos agentes oxidantes, versus su capacidad de remoción, este comportamiento se ajustara a las ecuaciones matemáticas conocidas.

Agente oxidante: hipoclorito de sodio

$$[\text{Fe}+2]_{\text{eliminado}} = 1,7[\text{Na}(\text{OCI})]^*X - 0,15$$

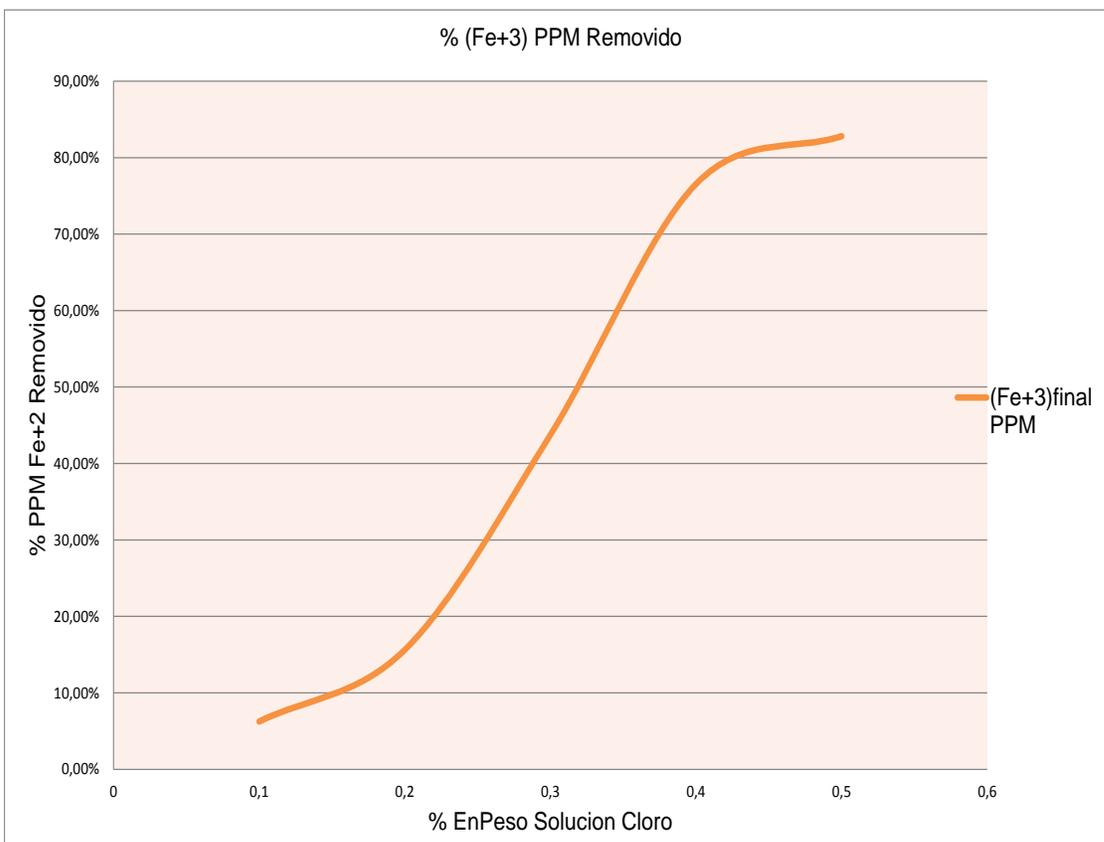
$$R^2 = 0,9582$$

Agente oxidante: aire

$$[\text{Fe}+2]_{\text{eliminado}} = 0,1625^*[\text{Na}(\text{OCI})]^*X - 0,044$$

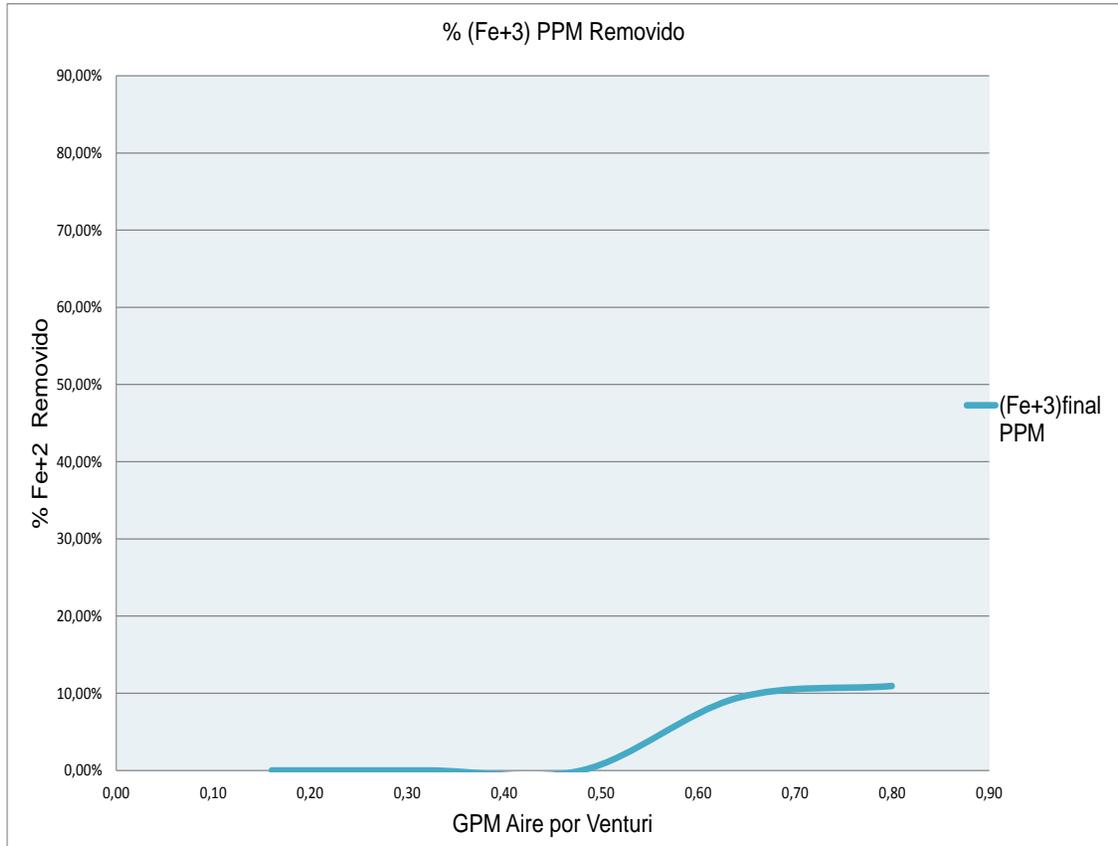
$$R^2 = 0,7752$$

Figura 8. **Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio (NaClO)**



Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla VIII.

Figura 9. **Porcentaje de hierro (Fe+2) removido versus diferentes caudales de aire inyectado**



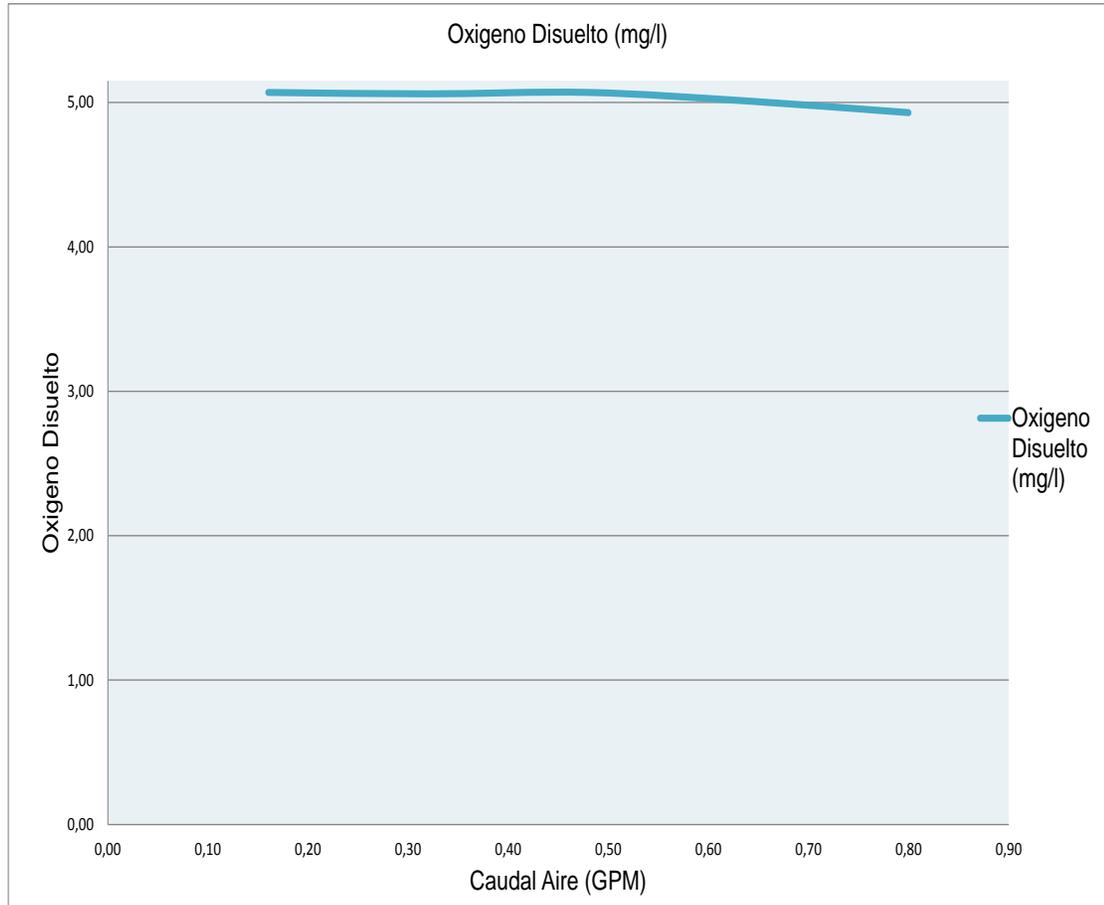
Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla IX.

Tabla XII. **Costo por galón, agua tratada en planta Yammit**

Ítem No. 1	Costo (\$) galón de agua tratada
Agua tratada tomando como base días de 10 horas y 365 días de trabajo por año	\$ 0,0032

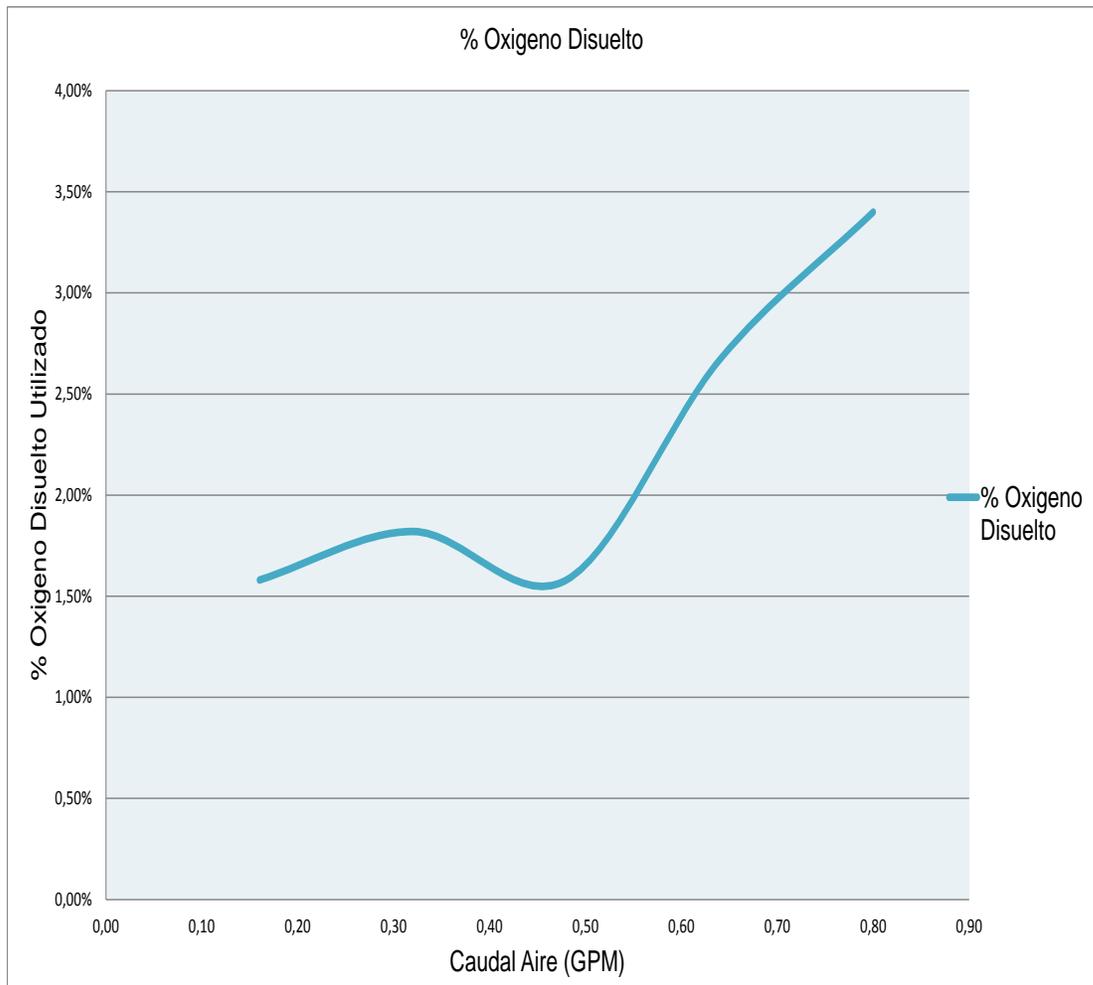
Fuente: elaboración propia, anexos.

Figura 10. **Oxígeno disuelto en distintos caudales de aire inyectado**



Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla XI.

Figura 11. **Porcentaje de oxígeno disuelto utilizado en distintos caudales de aire inyectado**



Fuente: elaboración propia, datos provenientes de tabla XI.

## 5. INTERPRETACION DE RESULTADOS

Luego de la fase experimental, recolección de datos y sobre todo la comprobación de la fase experimental por análisis de laboratorio certificado, en este caso Analab, se comprueba la efectividad de la planta para reducir los niveles de hierro presentes en el agua de pozo de la Finca del Señor Otto Donis, esta eficacia de la planta se circunscribe a los niveles iniciales de hierro en el agua, y caudal inicial, ya que esta planta es de tipo compacto para caudales limitados, pero se ha comprado que bajo los principios que opera la planta, esta fue exitosa para reducir el nivel de hierro.

La planta hace una reducción de hierro por dos simples pasos, oxidación por un agente, el cual es inyectado por medio de un accesorio Venturi de caudal establecido, el caudal de ingreso fue el máximo permitido bajo la especificación de la planta, 6 metros cúbicos por hora, eso fue regulado por medio de un hidrómetro de chorro múltiple colocado a la salida de la planta, se permitió el ingreso de agua a la planta por medio de una derivación de la línea de bombeo del pozo.

El pozo tiene una capacidad de mas de 1 500 galones por minuto, con la derivación y una válvula de compuerta de 2 pulgadas se regulo el caudal, esto con ayuda del hidrómetro colocado a la salida, se hizo circular agua por la planta, y se midió el caudal a prueba y error, cuando el hidrómetro marco un caudal de salida de 6 metros cúbicos, en ese punto se dejo aperturada la válvula.

Este fue el punto de partida para las corridas, se inicio con la solución de cloro (Hipoclorito de sodio, NaClO) en soluciones acuosas al 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 y 0,5 por ciento en peso. Esta solución fue inyecta a la planta por medio de un dispositivo Venturi de caudal 0,80 galones por minuto, este caudal se logra con el dispositivo Venturi totalmente abierto, con la solución inicial de 0,1por ciento de NaClO se hizo trabajar la planta, pasando un caudal fijo de 6 metros cúbicos por hora, e inyectando 0,80 galones por minuto de solución de NaClO, se dejo circular el agua por 15 minutos, esto para estabilizar el proceso.

Se tomo agua de inicio, esto como indicador de la cantidad de hierro ferroso  $Fe^{+2}$  presente al inicio, luego se tomo una muestra a la salida de la planta, que previo circulo por 4 contenedores con arena volcánica en flujo compartido es decir luego de ser inyectada la solución de cloro, el caudal se dividió en dos, esto por una tee, el 50 por ciento del flujo paso por 2 contenedores con arena volcánica la cual funciona como filtro y retiene el hierro ferroso precipitado, el caudal proveniente de cada par de contenedores de arena volcánica se unen y pasan por el hidrómetro, para salir al ambiente, este procedimiento se hizo para cada solución propuesta de NaClO.

Por cada corrida se tomaron 8 muestras, cada muestra con un lapso de 10 minutos, por lo cual la corrida por solución fue de 120 minutos promedio, se tomo un alto número de muestras por corrida, con la finalidad de tener una amplia base de resultados.

Si los resultados eran muy similares esto podría implicar que el proceso es estable, que la planta funciona establemente, adicional nos indica que el agua de pozo también tiene una concentración estable de hierro, adicional un amplio número de muestras nos ayudaría a minimizar el error humano al tomar la muestra, error al hacer las pruebas, ya que al analizar los datos

estadísticamente se podría detectar alguna irregularidad en el procedimiento, pero los resultados fueron muy similares, en este caso los resultados de laboratorio Analab fueron muy consistentes, repetitivos no hubo ningún resultado de análisis que se saliera del promedio o de la tendencia.

La concentración inicial para esta corrida fue de 0,8 partes por millón, un contenido alto de hierro que afecta directamente un sistema de riego por goteo, el alto contenido de hierro se puede apreciar en los distintos accesorios del pozo, todas las válvulas y tubería que tiene contacto con el agua tiene un color amarillento o cobrizo profundo, el agua tiene un aspecto amarillo con fuerte olor ferroso o metálico.

Los resultados para la primer solución de cloro al 0,1 por ciento no fueron satisfactorios, ya que solo redujo a 0,75 partes por millón de hierro ferroso en promedio, pero dio indicios que el tratamiento podría tener éxito, porque lo que se busca es llegar a concentraciones menores de 0,2 partes por millón. En la segunda corrida se observa un mejor desempeño de la planta, en función de la reducción de hierro en el agua, reduciendo a un promedio de 0,68 partes por millón. En la tercer corrida continua la mejoría reduciendo a un promedio de 0,45 partes por millón, en la cuarta corrida se alcanza un promedio que ya es aceptable, de 0,19 partes por millón, lo cual nos indica que la planta con el caudal de 6 metros cúbicos por hora, con una inyección de una solución de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) al 0,4 por ciento en peso.

Es exitosa para reducir el nivel del agua de pozo de la finca en cuestión, ya que los niveles de hierro son aceptables para ser utilizada en riego por goteo, en esta corrida hay un resultado de laboratorio de 0,10 partes por millón, cuando el resto dio 0,20 partes por millón, este resultado de 0,10 partes por millón mejora el promedio y no afecta al toma de decisión en cuanto la

elección del porcentaje de solución de cloro a utilizar, si el dato hubiera sido mayor a 0,20 partes por millón, con base el promedio se pudiera justificar utilizar una solución un poco mas fuerte, el resultado de esta agua es satisfactorio, mejora hasta el aspecto físico del agua, siendo inicialmente un agua de color amarillento y olor metálico, el agua de esta corrida fue transparente y de olor neutro.

La quinta corrida y final fue con una solución de 0,5 por ciento de NaClO, la cual dio un promedio de 0,14 partes por millón, de igual manera muy satisfactorio aunque este parámetro es menor al limite establecido de 0,2 partes por millón, esto genera una toma de decisión en cuanto a la cantidad de NaClO a utilizar, ya que hay un costo económico inmerso entre utilizar mas o menos hipoclorito de sodio, aunque por lo barato que es este insumo, puede ser despreciable versus la tranquilidad de la operación de la planta, o que repercute en taponamientos futuros, siendo el cultivo a tratar una graminia, conocida en nuestro medio como caña de azúcar, esta no se ve afectada por los niveles de cloro en el agua, ya que dentro de los nutrientes o fertilizantes que los agricultores el agregan esta el Cloruro de Potasio.

Por lo cual el nivel de cloro en la salida del agua no es tema de discusión porque no afectará a la planta mas bien será parte de abono. El porcentaje de remoción de hierro en las corridas 4 y 5 fue de 76 y 86 por ciento en promedio, porcentaje satisfactorio y suficiente para que el agua tratada se útil para riego por goteo. Este porcentaje indica que de nueva cuenta que la plata utilizando agente reductor NaClO es efectiva para reducir el hierro y el agua pueda ser utilizada en riego por goteo.

El segundo agente reductor sometido a prueba fue el oxígeno, este mediante inyección de aire por el dispositivo Venturi, con el cual se reguló el caudal de ingreso de aire ambiente, el dispositivo en mención totalmente abierto tiene, deja ingresar un caudal de 0,80 galones por minuto a la línea de conducción de agua, por lo cual se graduaron los caudales, eso por aproximación de apertura de válvula del Venturi, por ejemplo abierto a su totalidad el Venturi deja ingresar un caudal de 0,80 galones por minuto, con la válvula aperturada a un 20 por ciento, el caudal que deja ingresar será 0,16 galones por minuto, y así sucesivamente se estimaron caudales de 20 en 20 por ciento, así estos quedaron: 0,16, 0,32, 0,48, 0,64 y 0,80.

El resultado del análisis de laboratorio para este agente reductor no fueron satisfactorios, en las primera tres corridas los resultados finales fueron los mismos que el inicial, es decir el agua de salida de la planta contiene las mismas 0,80 partes por millón del inicio, en las corridas cuatro y cinco, ya en caudales cercanos a 0,80 galones por minuto, se noto una reducción mínima, el agua de salida de la planta bajo a 0,70 partes por millón de hierro.

El agua de las primeras corridas seguía teniendo un color amarillento, no tan fuerte como la inicial, esto por efecto del paso del agua por los contenedores de arena, que se puede considerar como una filtración primaria, pero el color amarillo o amarillento seguía presente en el agua de salida de la planta, este nivel de hierro en el agua, no es útil para ser utilizada en riego por goteo, ya que provocaría en mediano plazo el taponamiento de los goteros.

Adicional se tomaron lecturas de cantidad de oxígeno disuelto tanto de agua inicial como de agua tratada en cada corrida, correspondiente a cada caudal de inyección de aire estudiado, se tomaron lecturas por medio de un kit de reacción marca LaMotte, los resultados de oxígeno disuelto final en cada

corrida están en concordancia con el resultado final de hierro ferroso, dado que de la cantidad inicial de oxígeno disuelto promedio 5,15 miligramos por litro, al ser agregado mas aire por medio del dispositivo Venturi, el resultado final en las diferentes corridas no fue menor a 4,95 miligramos por litro esto indica que la diferencia entre inicial y final fue el aire que se estuvo disponible para la reducción del hierro ferroso en el agua, el cual fue poco utilizado o poco efectivo en la reacción de reducción.

El costo de operación de la planta es algo muy importante a determinar, dado que esto determinara la viabilidad del proyecto, la solución propuesta puede ser la mejor, pero al analizarla económicamente sea algo desproporcionado que no permita la implementación de la misma, para la determinación del costo de operación, inicialmente se ha tomado el costo *Ex works* de la planta en su fabrica de origen en Israel, flete de lugar de origen a Guatemala, impuestos, aranceles, gastos de desalmacenaje, lo cual nos deja un precio de la planta puesta en Guatemala.

Además se consideran los costos del cloro comercial, Hipoclorito de sodio NaClO, costo de arena volcánica inerte marca Pirolox, así como el costo de un operario que este al tanto y con el control de la planta, esto debido a que la planta es totalmente manual, adicional se requiere que el operario haga análisis de hierro al menos tres veces al día, al inicio, al medio día y al final de la jornada, adicional el operario debe hacer la solución de hipoclorito de cloro NaClO al 0,4 por ciento al menos una vez al día.

El costo por galón tratado tomando como base una jornada de 10 horas al día y 365 días de riego al año, da como resultado un costo de \$ 0,0032 por galón de agua tratada, si el análisis se hiciera para 5 años de trabajo, el costo por galón tratada seria mucho menor, este valor de agua tratada es bastante

bajo, lo cual hace factible el uso de este tratamiento en el agua, ya que en efecto reduce la cantidad de hierro en el agua, a los rangos deseados, además que el costo por galón de agua tratada es bastante bajo.



## CONCLUSIONES

1. La planta tipo paquete Yammit modelo F6020HM es efectiva en la reducción de hierro ferroso, a los niveles menores de 0,3 partes por millón requeridos para utilizar el agua en riego por goteo; siendo una solución compacta, de relativo bajo costo de inversión, así como bajo costo de insumos y operación.
2. El agente reductor hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) a demostrado su alta efectividad en la reducción de hierro ferroso de agua cruda; en solución de 0,4 por ciento en peso, reduce un 76,56 por ciento el contenido inicial de hierro ferroso en el agua y la solución de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) al 0,5 por ciento en peso reduce un 86,56 por ciento el contenido inicial de hierro ferroso en el agua.
3. El agente reductor aire en sus distintos caudales de análisis demostró su poca o nula efectividad en la reducción de hierro ferroso del agua cruda, en caudal de ingreso de 0,64 galones por minuto redujo solamente un 8,45 por ciento el contenido inicial de hierro ferroso en el agua y en el caudal de 0,80 galones por minuto alcanzo a reducir solo un 10,94 por ciento del contenido inicial de hierro ferroso en el agua.
4. El agente reductor hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) al 0,4 por ciento al ser comparado con el agente aire inyectado a un caudal máximo de 0,80 galones por minuto a demostrado ser mucho mas eficiente en la reducción de hierro, por lo cual para la planta cumpla su objetivo, debe utilizar el agente reductor hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ).

5. El tiempo de saturación del medio filtrante en este caso arena volcánica se determinará por diferencial de presiones, cuando la diferencia entre los manómetros de entrada y salida sea igual o mayor a 28 pulgadas sobre libra cuadrada, este será el momento de limpiar la arena volcánica por medio de retrolavado.

## RECOMENDACIONES

1. Para reducir la concentración de hierro en agua de pozo que se utilizara para riego por goteo a concentraciones menores a 0,3 partes por millón se recomienda utilizar la planta Yammit F6020HM, con el agente reductor hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) en solución del 0,4 por ciento en peso, con un caudal de ingreso por medio del Venturi de 0,80 galones por minuto, manteniendo un caudal de ingreso estable de agua cruda de 6 metros cúbicos por hora.
2. La planta debe ser monitoreada las 10 u 12 horas de trabajo diario, lo cual requiere de un operario que este al pendiente de la operación, preparación de la solución de hipoclorito de sodio, así como hacer los análisis de determinación de hierro en campo.
3. El agente reductor aire, demostró tener un porcentaje bajo de reducción de hierro, pero se podría colocar un segundo dispositivo Venturi el cual inyectara mayor caudal de aire, esto podría beneficiar la eliminación de hierro ferroso por parte del agente reductor hipoclorito de sodio, lo cual podría bajar el costo de operación por menor compra de hipoclorito de sodio.



## BIBLIOGRAFÍA

1. American Water Works. *N-USA 1903 of 27: American Society of Enviromental Engineers – Water treatment plant desing*. Atlanta: INN, 2007. 59 p.
2. Israel Water Works and Safety. *N-IT 2706 of 06: Emitter clogging effects on trickle irrigation – Drip irrigation*. Tel Aviv: INN, 1992. 301 p.
3. PERRY, Robert H. *Manual del Ingeniero Químico*. 6a ed. Barcelona: McGraw-Hill, 1999. 2850 p.
4. TREYBAL, Robert E. *Operaciones de transferencia de masa*, 2a ed. Barcelona: McGraw-Hill, 1996. 380 p.
5. Removing Minerals from drinking Water. Atlanta: 7-12. 2010. 25 p.



## **APÉNDICES**

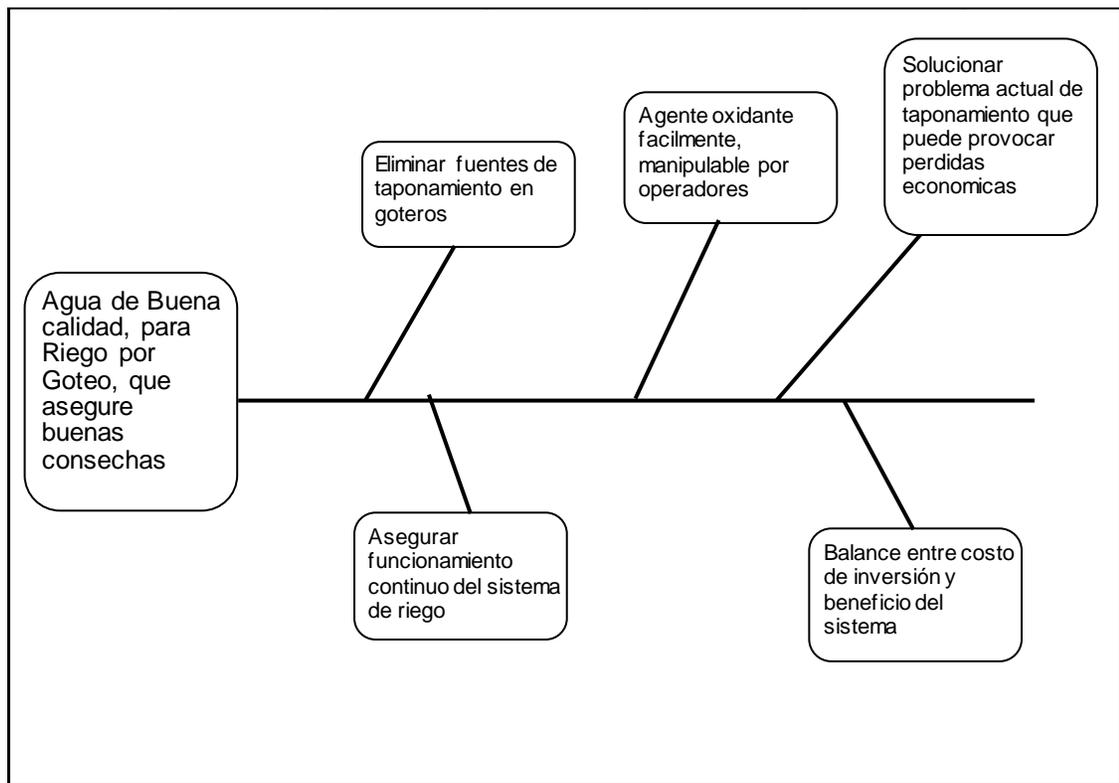
Diagrama de Ishikawa

Fotografías de práctica experimenta

Análisis de costos



## Diagrama de Ishikawa

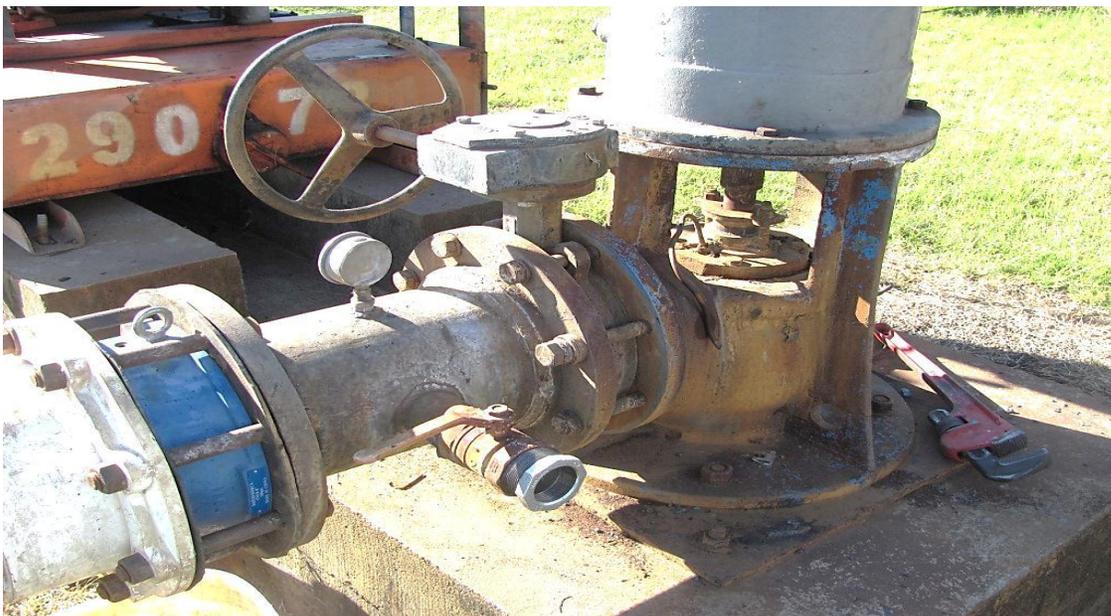


Fuente: elaboración propia.

## Fotografías de práctica experimental



Fuente: Finca Trinidad, Villa Canales, Guatemala.



Fuente: Bombeo, Finca Trinidad, Villa Canales, Guatemala.



Fuente: Finca Trinidad, Villa Canales, Guatemala.



Fuente: Finca Trinidad, Villa Canales, Guatemala.

### Análisis de Costos

Costo de Planta EX Works Haifa Israel	\$ 6 000,00
Flete Marítimo Israel-Guatemala	\$ 2 500,00
Precio CIF Planta, Santo Tomas de Castilla, GUA.	\$ 8 500,00
IVA 12porciento	\$ 1 020,00
Aranceles 5 por ciento	\$ 0,00
Gastos Aduanales y Transporte Final	\$ 800,00
Precio Planta Sin Utilidad	\$ 10 320,00
Costo Arena Volcánica Inerte, Marca Pirolox 4 contenedores 8 kilogramos por tarro Precio por Kilogramo= \$ 2.50	\$ 80,00
Costo Promedio Solución de Cloro NaClO	
Galones por día solución Cloro NaClO al 0,4 porciento	
Caudal Venturi 0,80 GPM*60 min. * 10 horas al día	480,00
Galones de Cloro NaClO por día Cloro marca Comercial: Magia Blanca.	2,00
Costo Cloro por día.	\$ 4,20
Galones de agua cruda a tratar por día de 10 horas	15 860,00
Galones de agua cruda tratados en 365 días	5 788 900,00

Costo Galón Agua Tratada por un año de trabajo Día de trabajo	365
Costo Cloro marca Comercial Magia Blanca 2 galones por día	\$ 1 533,00
Costos por un año de trabajo	
Planta	\$ 10 320,00
Arena	\$ 80,00
Cloro NaClO	\$ 1 533,00
Salario por Persona que opera la planta Incluye Bono 14, Aguinaldo y Liquidación	\$ 4 519,23
Kit Análisis de Hierro HATCH	\$ 2 000,00
Total	\$ 18 452, 23
Costo por Galón tratado	\$ 0,0032

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

## Análisis de agua



Ruta. Calle 0-50, Zona 14 Edificio de ANACAFE  
 Teléfono: 2311-1869 Exts. 1132/1133 y 1135  
 E-mail: analab@anacafe.org  
 www.laboratorioanalab.com

### ANALISIS DE AGUAS

ORDEN:	19-447
FINCA:	OTTO DOMIS
PROPIETARIO:	REGULACIÓN Y MANEJO DE FLUIDOS
LOCALIZACIÓN:	Managua, ESCUINTLA

	Hierro (ppm)
No. de Lab.	Identificación
2430	MUESTRA INICIAL POZO
	PPM
	0.8

Los resultados de este informe son válidos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su impresión ORIGINAL.  
 El laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le pueda dar a este informe.  
 La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.

Fecha Ingreso : miércoles 07 de diciembre 2011

Fecha Entrega : lunes, 19 de diciembre 2011

Ing. Humberto Jiménez G.

Fuente: elaboración propia.



5ta. Calle C-50, Zona 14 Edificio de ANACAFE  
 Teléfono: 2311-1869 Exts. 1132/1133 y 1135  
 E-mail: analab@anacafe.org  
 WWW.LABORATORIOANALAB.GOV

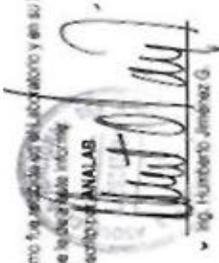
**ANALISIS DE AGUAS**

**ORDEN:** 19-447  
**FINCA:** OTTO DONIS  
**PROPIETARIO:** REGULACIÓN Y MANEJO DE FLUIDOS,  
**LOCALIZACIÓN:** Masaguis, ESCUINTLA

No de Lab	Hierro (PPM)								
2431	0,80	0,70	0,70	0,80	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70
2432	0,70	0,60	0,70	0,70	0,70	0,60	0,70	0,70	0,70
2433	0,40	0,50	0,50	0,40	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50

Los resultados de este informe son válidos únicamente para la muestra como fue enviada al laboratorio y en su impresión ORIGINAL.  
 El laboratorio ANALAB no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a este informe.  
 La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.

Fecha Ingreso : miércoles 07 de diciembre 2011  
 Fecha Entrega : lunes 19 de diciembre 2011

  
 Ing. Humberto Jiménez G.

Fuente: elaboración propia.



Sra. Calle 0-50, Zona 14 Edificio de ANACAFE  
 Teléfono: 2311-1969 Exts. 1132/1133 y 1135  
 E-mail: analab@anacafe.org  
 www.laboratorioanalab.com

## ANALISIS DE AGUAS

**ORDEN:** 19-447  
**FINCA:** OTTO DONIS  
**PROPIETARIO:** REGULACIÓN Y MANEJO DE FLUIDOS,  
**LOCALIZACIÓN:** Masagua, ESCUINTLA

No de Muestra	Hierro (PPM)								
2436	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
2437	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
2438	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

Los resultados de este informe son válidos únicamente para la muestra como fue recibida en el laboratorio y en su impresión ORIGINAL.  
 El Laboratorio ANALAB no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a este informe.  
 La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.

Fecha Ingreso: martes 07 de diciembre 2011  
 Fecha Entrega: lunes 12 de diciembre 2011

Ing. Humberto Jiménez G.

Fuente: elaboración propia.