



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

DIRECCIÓN DE CARRERA: MEDIO AMBIENTE

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MEDIO AMBIENTE**

MODALIDAD:

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE TUBERÍAS USADAS EN
TRATAMIENTOS MAGNÉTICOS PARA REDUCCIÓN DE
CONCENTRACIONES DE CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS
DURAS

AUTOR:

VERA SALTOS RONALD DONALD

FACILITADOR:

Q.F. PATRICIO JAVIER NOLES AGUILAR, M.Sc.

CALCETA, NOVIEMBRE 2018

DERECHOS DE AUTORÍA

RONALD DONALD VERA SALTOS, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

RONALD DONALD VERA SALTOS

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

Q.F. PATRICIO JAVIER NOLES AGUILAR, certifica haber tutelado el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE TUBERÍAS USADAS EN TRATAMIENTO MAGNÉTICO PARA REDUCCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DURAS**, que ha sido desarrollada por **RONALD DONALD VERA SALTOS**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

Q.F. PATRICIO JAVIER NOLES AGUILAR, M.Sc.

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el trabajo de titulación **EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE TUBERÍAS USADAS EN TRATAMIENTO MAGNÉTICO PARA REDUCCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DURAS**, que ha sido propuesto, desarrollado por **RONALD DONALD VERA SALTOS**, previa la obtención del título de Ingeniero en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

ING. JORGE CEVALLOS BRAVO MSC.
MIEMBRO

ING. CARLOS VILLAFUERTE VÉLEZ MG. C.A.
MIEMBRO

ING. RICARDO DELGADO VILLAFUERTE MG. C.A.
PRESIDENTE

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me dio la oportunidad de crecer como ser humano a través de una educación superior de calidad y en la cual he forjado mis conocimientos profesionales día a día;

A mis padres, quienes mantuvieron durante toda mi etapa de estudiante, su apoyo moral, económico y humano incondicional para hoy poder gozar de este sueño realizado;

A mi tutor, el Q.F. Patricio Noles, que supo compartir sus conocimientos conmigo para lograr el anhelado objetivo;

A los miembros del tribunal, quienes fueron un aporte fundamental para encaminar el proyecto que hoy presento;

A mis compañeros y actuales colegas que durante el tiempo que compartimos en las aulas vivimos experiencias inolvidables que nos atan en un lazo de amistad eterna;

A todos los profesores de la carrera de ingeniería ambiental que estuvieron y aún están impartiendo sus conocimientos para forjar profesionales de provecho para la sociedad;

A las personas que conforman el personal de guardianía y servicio de la carrera de ingeniería ambiental que durante esta carrera estudiantil siempre estuvieron predisuestos a ayudar en el mínimo que uno precisara;

A Lalo Zambrano y Aracely Espinoza, mis segundos padres, quienes desde que comenzó mi carrera universitaria me trataron como uno más de su familia y supieron dar un apoyo importante para conseguir mis objetivos estudiantiles.

EL AUTOR

DEDICATORIA

A los pilares fundamentales en mi vida:

A Dios, divino creador de todas las cosas y el que hace posible que todo se dé;

A mi hijo, mi mayor fortaleza e inspiración para todas las metas que me propongo;

A mis padres, quienes han permanecido junto a mí durante toda mi vida incondicionalmente;

A Daniela Guevara, que ha estado a mí lado durante mi vida universitaria y que ha cuidado de nuestro hijo como nadie más lo pudiera hacer.

CONTENIDO GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA	ii
CERTIFICACIÓN DE TUTOR	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
CONTENIDO GENERAL.....	vii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.3.3. Hipótesis	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Agua.....	5
2.2. Aguas duras	5
2.2.1. Clasificación de las aguas según su dureza	6
2.2.2. Diferencia entre dureza temporal y permanente	6
2.2.3. Impactos de las aguas duras	6
2.3. Incrustaciones	8
2.3.1. Origen de las incrustaciones	8
2.3.2. Incrustaciones en las tuberías	8
2.3.3. Tipos de incrustación.....	9
2.3.4. Problemas generados por las incrustaciones	10
2.3.5. Constituyentes iónicos y propiedades principales.....	11
2.4. Tratamientos para la remoción de dureza en aguas.....	13
2.4.1. Procesos de membranas.....	13
2.4.2. Evaporación-condensación	14
2.4.3. Efecto del campo magnético	14

2.5. Tratamiento magnético en aguas duras.....	15
2.5.1. Factores influyentes en el tratamiento magnético de aguas duras.....	16
2.6. Influencia del tipo de material de la tubería en el tratamiento magnético de aguas duras	18
2.6.1. Tipo de tubería según el material constituyente.....	19
2.7. Aplicación del tratamiento magnético en industrias	20
2.7.1. Aplicación de un campo magnético ortogonal al flujo en sistemas de agua para reducir la formación de incrustaciones	20
2.7.2. Efecto del campo magnético sobre la formación de incrustación en sistemas de conducción de agua	21
2.7.3. Efecto del tratamiento magnético del agua en la precipitación del carbonato de calcio: influencia del material de la tubería	23
2.8. Variables físico-químicas evaluadas	23
2.8.1. Alcalinidad.....	24
2.8.2. Dureza del agua	24
2.8.3. Potencial de hidrógeno (ph)	25
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO	26
3.1. Ubicación	26
3.2. Duración.....	26
3.3. Métodos y técnicas.....	26
3.3.1. Métodos	26
3.3.2. Técnicas.....	26
3.4. Factores en estudio	26
3.5. Diseño experimental.....	27
3.5.1. Selección de muestra	27
3.5.2. Factores experimentales	27
3.5.3. Sistema experimental	28
3.5.4. Operación de los experimentos	28
3.5.5. Evaluación de los experimentos	28
3.6. Unidad experimental.....	28
3.7. Variables a medir	28
3.7.1. Variable independiente	28
3.7.2. Variable dependiente.....	28
3.8. Manejo experimental.....	29

3.9. Análisis estadístico	29
3.10. Otros aspectos	29
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1. Conclusiones	40
5.2. Recomendaciones	40
BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXOS	45

GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Eficiencia catiónica del ablandador.	21
Gráfico 4.1 Diagrama de cajas de la alcalinidad.....	35
Gráfico 4.2 Diagrama de cajas de la dureza total.....	36
Gráfico 4.3 Variación de la dureza total de los tres tipos de tuberías en los diferentes tiempos de exposición.....	36
Gráfico 4.4 Diagrama de cajas de la dureza cálcica.....	37
Gráfico 4.5 Variación de la dureza cálcica de los tres tipos de tuberías en los diferentes tiempos de exposición.....	37
Gráfico 4.6 Diagrama de cajas de la dureza magnésica	38
Gráfico 4.7. Variación de la dureza magnésica de los tres tipos de tuberías en los diferentes tiempos de exposición.....	39

CUADROS

Cuadro 2.1. Clasificación del agua según su dureza.....	6
Cuadro 2.2. Intensidades de campo magnético aplicadas en diferentes investigaciones	16
Cuadro 2.3. Influencia de la velocidad de flujo sobre t_s y t_n	17
Cuadro 2.4. Rangos de alcalinidad	24
Cuadro 2.5. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza.....	25
Cuadro 3.1. Factores experimentales que se usarán en el experimento.	27
Cuadro 3.2. Tratamientos.....	29
Cuadro 4.1. Parámetros físico-químicos de la muestra de agua correspondiente al Tubo de aluminio.....	32
Cuadro 4.2. Parámetros físico-químicos de la muestra de agua correspondiente al Tubo de cobre	33
Cuadro 4.3. Parámetros físico-químicos de la muestra de agua correspondiente al Tubo de PVC.....	34

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar tres tuberías de diferentes materiales (cobre, aluminio, Policloruro de vinilo) utilizadas en el tratamiento magnético de aguas duras. El agua utilizada para la experimentación fue del pozo de la zona agroindustrial de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí que mantiene promedios de dureza de 350 mg/L. Para muestra general se consideraron 7 litros y se precisó de una bomba de agua de 40 L/min para las recirculaciones. Cada tubería se utilizó por 5 minutos, teniendo puesta la tecnología magnética que consistió en dos imanes cerámicos de 1295,8 gauss cada uno, dispuesto uno por cada lado de la sección por un sostén plástico; en intervalos de 1 minuto se tomaron las muestras para realizar los análisis de dureza total, dureza cálcica y alcalinidad. El pH y la temperatura del agua dura, fue examinada en cada intervalo en donde la bomba era apagada para tomar las muestras. Los resultados reflejaron que la tecnología magnética es efectiva para disminución de la dureza del agua, pero no existió diferencias significativas en el material de las tuberías utilizadas. A diferencia de la muestra inicial, que no tuvo presencia de carbonatos, todas las muestras la tuvieron. Se pudo determinar que la temperatura y el pH al pasar los minutos tuvieron (1, 2, 3, 4 y 5 minutos) un aumento, esto debido a la agitación del agua en la recirculación.

Palabras clave: Agua dura, tratamiento magnético, dureza, tubería.

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate three pipes of different material (copper, aluminum, PVC) that are used in magnetic treatment of hard water. The hard water used for the experimentation was from the well of the agroindustrial zone of the Polytechnic Superior School of Agriculture of Manabí that maintains averages of hardness of 350 mg / L. As a general sample, 7 liters were considered and a water pump of 40 L / min was required for recirculation. Each pipe was used for 5 minutes, with the magnetic technology consisting of two ceramic magnets of 1295.8 gauss each, arranged one on each side of the pipe by a plastic band; at 1 minute intervals samples were taken to perform the total hardness, calcium hardness and alkalinity tests. The pH and temperature of the hard water was examined at each interval where the pump was turned off to take the samples. The results dictated that the magnetic technology is effective to decrease the hardness of the water, but there was no noticeable difference in the material of the pipes used. Unlike the initial sample, which had no presence of carbonates, all samples had it. It was possible to determine that the temperature and the pH during the minutes had an increase, this due to the agitation of the water in the recirculation.

Keywords: Hard water, magnetic treatment, hardness, tubing.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua, recurso vital para la vida de los seres vivos, disponible en la mayor parte del planeta, varía sus características, tanto físicas como químicas, de acuerdo al uso que se le dé o las cualidades del suelo que la contengan.

Espinoza (2005) manifiesta que, el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), son iones presentes en el agua, que marcan su dureza. En altas concentraciones, estos iones se vuelven problema, de acuerdo al uso que se dé al agua, siendo en otros, inobjetable. En ocasiones forman precipitados con los detergentes, evitando que los mismos creen la espuma necesaria para cumplir su función de saneamiento (Rodríguez, 2009). En las industrias, el agua dura incide de manera negativa en la transferencia de calor y disminuye la eficiencia del sistema permanentemente (Neira, 2006).

Un estudio elaborado en México, determinó que las poblaciones que consumían agua muy dura (>400ppm), provocaba a los habitantes «litiasis urinaria», contradiciendo a teorías que determinaban que el agua dura no causa afectaciones a la salud de las personas (Medina *et al.*, 2002). Según Sengupta (2013), científicos taiwaneses determinaron que existe una asociación estadística negativa de diversas clases de mortalidad por cáncer y la dureza del agua en concentraciones mayores a 200 ppm/Lt.

En Ecuador, un estudio realizado por el Ministerio de Salud Pública (2008), estableció que uno de los problemas observados en cuanto al saneamiento básico, fue el taponamiento de tuberías de la red de distribución de agua potable, causado por las incrustaciones, que por lo general son provocados por acumulaciones de carbonato de calcio (CaCO_3), con esto se establece que en el país puede suceder casos como los anteriormente mencionados.

De acuerdo con investigaciones del INIAP (1983), los suelos manabitas mantienen altas concentraciones de potasio (12,83 mg/L), calcio (122 mg/L), y magnesio (23 mg/L), los mismos contribuyen a que las aguas, principalmente subterráneas, incrementen su dureza (425 ppm CaCO₃).

¿Cuál de las tuberías usadas en el tratamiento magnético tiene mayor efectividad para reducción de las concentraciones de calcio y magnesio en aguas duras?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La composición química del agua subterránea es controlada principalmente por factores como tiempo de residencia, recorrido, mineralogía, geología del acuífero, concentración de sales (como el Magnesio) y pH del suelo (Roback *et al.*, 2001).

El artículo 12 de la Constitución de la República establece que: “el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida”, además el SENPLADES a través del PNBV (2013) en sus lineamientos territoriales literal b.2, menciona: “Promover una gestión integral y corresponsable del patrimonio hídrico para precautelar su calidad, disponibilidad y uso adecuado, con acciones de recuperación, conservación y protección de las fuentes de agua, zonas de recarga, acuíferos y agua subterránea, considerando el acceso equitativo de agua para consumo”.

Conociendo que en Ecuador existen familias que aún no cuenta con el servicio de agua potable, la cual es regida por normas de calidad, y que para adquirir el líquido vital tienen que abastecerse de fuentes inseguras, que muchas veces mantiene concentraciones altas de calcio y magnesio, es fundamental la creación de tecnologías que mitiguen el problema y así evitar enfermedades en la población y daños en las tuberías que transportan del agua.

El art. 14 de la Constitución de la República del Ecuador (2008), menciona: el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. Al mismo tiempo el objetivo 7 del PNVB (Plan Nacional del Buen Vivir) implica garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global (SENPLADES, 2013).

En la actualidad existen tecnologías químicas y físicas que permiten disminuir la dureza del agua, pero es importante que las tecnologías sean accesibles para la población en lo económico y lo material, y amigables con el ambiente. Con la evaluación de la eficiencia de las tecnologías, se pudo conocer cuál es la idónea para el tipo de agua en un lugar determinado.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar tres tipos de tuberías usadas en tratamiento magnético para la reducción de concentraciones de calcio y magnesio en aguas duras.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar una tecnología magnética para la reducción de las concentraciones de calcio y magnesio en aguas duras.
- Analizar el agua, antes y después del tratamiento con la tecnología magnética.
- Comparar los resultados obtenidos con las condiciones iniciales de la muestra de agua.

1.4. HIPÓTESIS

La tubería de cobre obtuvo mayor eficiencia en la reducción de concentraciones de calcio y magnesio en comparación con las tuberías de aluminio y PVC.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. AGUA

Fernández (2012) afirma que el agua ocupa más del 70 % de la superficie del planeta; se la encuentra en océanos, lagos, ríos; en el aire, en el suelo. Los recursos hídricos son la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Posee propiedades únicas que la hacen esencial para la vida.

2.2. AGUAS DURAS

Según Mora y Alfaro (1999) la dureza del agua es causada por el calcio y, en menor grado, el magnesio, disueltos en ella. Generalmente se expresa por la cantidad equivalente de carbonato de calcio. Se caracteriza porque su ablandamiento se logra con la ebullición, que consiste en que el bicarbonato se precipita desprendiendo dióxido de carbono y disminuyendo el valor del pH por las formaciones de ácido carbónico. (Soto, 2010).

Según la clasificación de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se define como agua blanda la que presenta concentraciones inferiores a 60 mg/L de carbonato de Calcio (CaCO_3), medianamente dura entre 61 y 120 mg/L, dura entre 121 y 180 mg/L y muy dura aquella con valores superiores a 180 mg/L (Instituto Nacional de Higiene Epidemiológica y Microbiología, 1992).

Rodríguez (2010) afirma que el agua obtiene su dureza al pasar por formaciones geológicas ricas en los materiales que causan su dureza, gracias a su poder solvente se incorporan al agua, como se expresa en la siguiente igualdad.



2.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS SEGÚN SU DUREZA

Según la OMS, citada por Mora y Alfaro (1999) las aguas duras se clasifican de la siguiente manera:

Cuadro 2.1. Clasificación del agua según su dureza

Concentración de CaCO ₃ (mg/L)	Tipo	Codificación*
0 - 60	Blanda	Azul
61 - 120	Moderadamente dura	Verde
121 - 180	Dura	Amarillo
180	Muy dura	Rojo

Fuente: OMS

2.2.2. DIFERENCIA ENTRE DUREZA TEMPORAL Y DUREZA PERMANENTE

Según Belín (2015), en la dureza temporal los bicarbonatos y carbonatos de calcio y magnesio, poseen características de fácil ablandamiento cuando el agua está en ebullición, ya que el carbonato de calcio es más soluble en agua fría y por lo tanto en la ebullición se precipita. La dureza permanente es relativa a la presencia de sulfatos de calcio (CaSO₄) y magnesio (MgSO₄) y cloruros (Cl⁻) en el agua, los mismos son más solubles al incrementar la temperatura del agua y se la conoce como «dureza no carbonatada».

2.2.3. IMPACTOS DE LAS AGUAS DURAS

Sarabia *et al.* (2011) mencionan que en relación con la dureza y los contenidos de Ca y Mg (grados hidrotimétricos franceses), al estar relacionados entre sí, se observa que casi un 70% de las muestras son clasificadas como aguas duras al exceder de 180 mg/L de CaCO₃.

Uno de los efectos del agua dura que más frecuentemente se observa en el quehacer doméstico, se manifiesta sobre la acción de los jabones. Cuando se utiliza jabón, el cual es una sal de sodio de un ácido graso superior (generalmente de 16 a 18 átomos de carbono por molécula), en aguas duras, se forman precipitados debido a la presencia de calcio, magnesio y hierro. Los iones de

calcio de esta agua se unen con los iones disueltos del jabón para formar sales insolubles. Este proceso gasta el jabón impidiendo la formación de espuma y produce un sólido grumoso indeseable, el cual no presenta ninguna utilidad.

Con el agua dura se pueden perder hasta $2/3$ partes del detergente usado y, además de producirse un mayor desgaste de la ropa por la rugosidad de los tambores de las lavadoras, se producen manchas de cal en las vajillas, griferías y sanitarios (Monraval y Grau, 2003).

El agua muy dura, además puede empeorar las características de las bebidas o de los alimentos preparados con ella; por ejemplo, se produce una capa en la superficie del café o del té, se pierde gran parte de las sustancias aromáticas de los alimentos y bebidas (debido a la unión con el carbonato de calcio) y muchos consumidores han reportado un sabor desagradable en aguas con durezas elevadas (el umbral de sabor del calcio está entre 100 a 300 mg/L, el sabor desagradable se reporta con niveles sobre los 500 mg/L; contenidos de magnesio sobre los 170 mg/L, asociados además a aniones cloruro y sulfato, son responsables del sabor amargo del agua). Según algunos registros, el tiempo de cocción de los vegetales y de la carne aumenta con el agua dura.

El agua con niveles de dureza superior a los 200 mg/L puede causar la aparición de incrustaciones en los sistemas de distribución, dependiendo además de la interacción con otros factores, como el pH y la alcalinidad. Estas incrustaciones afectan a las redes de distribución tanto domésticas como industriales y se producen principalmente por una descomposición térmica de los bicarbonatos de calcio y magnesio solubles en el agua por calentamiento, en donde se elimina el dióxido de carbono y se precipitan los carbonatos (CaCO_3) que son insolubles, los que luego se depositan sobre las superficies de tuberías y calderas. Las incrustaciones están compuestas principalmente por calcita en mayor proporción, y por aragonita en menor proporción. Ambos son carbonatos de calcio con igual composición química, sin embargo, la calcita tiene una capacidad incrustante superior a la aragonita (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2004).

2.3. INCRUSTACIONES

Las incrustaciones son compuestos resultantes de la cristalización y precipitación de iones minerales presentes en el agua que está asociada en los yacimientos de petróleo; estos iones tienden a unirse por la continua variación de las condiciones a que se ven sometidos por la depleción de líquidos (Castro y Gamez, 2009).

2.3.1. ORIGEN DE LAS INCRUSTACIONES

Las incrustaciones se originan cuando los iones presentes en el agua asociada al fluido, sobrepasan el límite de solubilidad que tiene el agua para mantenerlos en solución, de esta manera se unen y se precipitan formando depósitos sólidos, al tener agua supersaturada de iones positivos y negativos, al estar en permanente contacto y movimiento, tenderán a atraerse; al unirse forman clusters o racimos, que irán uniéndose y formando un cristal (partícula microscópica) (Valencia y Tarache, 1992).

Fernández y Vargas (2001) afirman que estos cristales crecen y forman estructuras más grandes que se van uniendo y llegan a formar las incrustaciones o costras, las cuales se pueden apreciar a simple vista y se adhieren a la estructura que las contiene.

2.3.2. INCRUSTACIONES EN LAS TUBERÍAS

Al hacer fluir el agua por las tuberías de instalaciones intercambiadoras de calor y equipos de sistemas de conducción de agua, las condiciones ya son favorables para que los minerales se mantengan disueltos, sin embargo, debido a factores que causan su sobresaturación y posterior precipitación como: aumento de la presión, incremento en la temperatura y aumento del pH de la solución, hacen que los bicarbonatos de calcio que alguna vez fueron solubles se descompongan por la acción del calor, convirtiéndose en carbonatos insolubles, los cuales precipitan y se adhieren fuertemente a las paredes de la tubería. Luego se crea una capa aislante de difícil remoción, llamado incrustación. Aunque el CaCO_3 forma la

mayor parte de las incrustaciones, se requiere de otros componentes como la sílice (SiO_2) y la alúmina (Al_2O_3) para que actúen como agentes de cementación y se retengan sobre las paredes (Del Toro y Berenguer, 2001).



Ilustración 2.1. Ejemplo de incrustación en las tuberías.

Con base en Dobersek y Goricanec (2014), el carbonato de calcio es uno de los compuestos que causa mayores problemas de incrustación en los sistemas de conducción de agua y existe en tres diferentes estructuras cristalinas:

- a) **Calcita:** Tiene una estructura romboédrica-hexagonal es la forma más estable a condiciones normales y es también la forma más común encontrada en la naturaleza. Los cristales romboédricos tienen grandes áreas de conexión y es por eso que la capa que forman es más densa.
- b) **Aragonita:** Es la que tiene menor simetría con estructura ortorómbica en forma de agujas con revestimientos menos densos.
- c) **Vaterita:** Es la forma menos estable y casi nunca se presenta. Esta forma cristalina eventualmente sufre una transición de fase a aragonita o a calcita (MengChun y Clifford, 2010).

2.3.3. TIPOS DE INCRUSTACIÓN

La estructura de las incrustaciones depende de las aguas que las producen, entre las más comunes se encuentran:

- a) **Carbonato de calcio.-** Es el principal constituyente de la piedra caliza, siendo bastante insoluble en agua. A elevadas temperaturas y presiones, la solubilidad del carbonato de calcio disminuye. Produce un tipo de

incrustación difícil de remover sobre las paredes de los equipos que están en contacto con el agua.

- b) **Cloruro de calcio.**- Se localiza en salmueras naturales, depósitos salinos, etc. Esta sal es altamente soluble en agua. En los sistemas de generación de vapor la presencia de cloruro de calcio es altamente corrosiva.
- c) **Sulfato de calcio.**- Se presenta en diferentes minerales debido a su baja solubilidad a temperaturas elevadas y a que produce una incrustación dura y adherente. No se pueden tolerar grandes cantidades de esta sal en los sistemas de enfriamiento y su presencia en las calderas debe ser nula.
- d) **Carbonato de magnesio.**- Se encuentra presente en el agua de mar en concentraciones de 1300 ppm. Los ríos contienen aproximadamente 4 ppm de magnesio. Los iones de calcio y magnesio forman precipitados de sales insolubles que causan incrustaciones en las tuberías.
- e) **Cloruro de magnesio.**- Se localiza en el agua de mar, salmueras naturales, depósitos salinos, etc. Se presenta en la naturaleza bajo la forma de diferentes minerales. Es bastante soluble en agua.
- f) **Sílice.**- En todos los suministros de agua naturales se encuentra presente en cantidades variables, dependiendo de la procedencia del agua. La sílice es una impureza perjudicial en las calderas de alta presión y en los sistemas de enfriamiento en donde presenta tendencia a depositarse. Las incrustaciones producidas son adherentes y muy duras, de aspectos vidriados y difíciles de remover.
- g) **Sólidos suspendidos.**- Se refiere al material insoluble que puede estar suspendido en el agua y cuya naturaleza es heterogénea. Pueden ser de origen inorgánico como las arcillas, carbonato de calcio, sílice, hidróxido férrico, etc., pueden ser de naturaleza orgánica como algas, bacterias, materia vegetal finamente dividida como aceites (Kobe *et al.*, 2002).

2.3.4. PROBLEMAS GENERADOS POR LAS INCRUSTACIONES

Las incrustaciones producen muchas dificultades, aumentando los costos en la producción, cambiando variables como la presión y dificultando el tránsito normal

de los fluidos por todas las facilidades de producción. Algunos problemas específicos se presentarán a continuación.

- Taponamiento en la cara de la formación.
- Interferencias en la recuperación primaria y terciaria.
- Creación de la necesidad del uso de tratamientos costosos y frecuentes de estimulación de pozos (trabajos de acidificación).
- Restricción de flujo a través de las tuberías (taponamiento del tubing y líneas de superficie).
- Cambios totales o parciales de líneas y accesorios.
- Necesidad de perforar nuevos pozos inyectores y productores.
- Problemas de corrosión por picadura causados por el depósito irregular sobre las superficies metálicas debido a que se crean zonas anódicas y zonas catódicas.
- Incrementos desmesurados de la presión de los sistemas que pueden causar rupturas y fugas en los empaques, líneas de flujo y tubing, ocasionando fugas que pueden ocasionar daños al medio ambiente (Castro y Gamez, 2009).

2.3.5. CONSTITUYENTES IÓNICOS Y PROPIEDADES PRINCIPALES

En operaciones que requieren el manejo de agua producida, la principal preocupación son los iones y propiedades físicas; los cuales son importantes desde el punto de vista del taponamiento o corrosión.

2.3.5.1. CATIONES

- **Ion Sodio:** es el mayor constituyente en las aguas de formación, pero no causa problemas, excepto por la precipitación de cloruro sódico en aguas extremadamente saladas.
- **Ion Calcio:** es el mayor constituyente en formaciones saladas y puede alcanzar valores de hasta 30,000 mg/L, aunque su concentración normalmente es más baja. El ion calcio es importante debido a su

capacidad de combinación con los iones bicarbonato, carbonato o sulfato y precipita para formar incrustaciones adherentes o sólidos suspendidos.

- **Ion Magnesio:** se presenta usualmente en concentraciones inferiores a las de calcio. Tiende a aumentar los problemas de incrustaciones de carbonato de calcio por coprecipitación con el ion calcio. Los iones magnesio disminuyen la cantidad de incrustaciones de CaSO_4 , BaSO_4 y SrSO_4 . Los iones sulfato que están ligados al magnesio no están disponibles para formar incrustaciones de sulfato.
- **Hierro:** el contenido natural del mismo en aguas de formación normalmente es muy bajo y su presencia es un indicativo de corrosión. Puede estar presente como ion férrico Fe^{+++} , o ferroso Fe^{++} , también se lo puede encontrar en suspensión como un compuesto de hierro precipitado.
- **Bario:** es de gran importancia debido a su habilidad para combinarse con el ion sulfato y así formar sulfato de bario, el cual es extremadamente insoluble. Aún la presencia de pequeñas cantidades puede causar daños severos.
- **Estroncio:** puede combinarse con el ion sulfato y así formar sulfato de estroncio insoluble que a menudo se encuentra en incrustaciones mezcladas con el propio sulfato de bario.

2.3.5.2. ANIONES

- **Ion cloruro:** es el mayor constituyente en aguas de formación producida y su ausencia es notoria en aguas dulces. La mayor fuente del ion cloruro es el NaCl , de modo que la concentración del ion cloruro es usada como una medida de la salinidad del agua. El principal problema que presenta el ion cloruro es la relación del grado de corrosión con el incremento de la salinidad en el agua, es decir, mientras más salada es el agua de formación mayor es la corrosión. Así, la determinación de la concentración de cloruro es una de las formas más fáciles para identificar el tipo de agua
- **Ion sulfato:** su presencia es un problema debido a su habilidad para reaccionar con el calcio, bario o estroncio y formar incrustaciones

insolubles. Sirve además como alimento para las bacterias reductoras de sulfato

- **Ion bicarbonato:** está presente en casi todas las aguas de formación, puede reaccionar con los iones calcio, magnesio, hierro, bario y estroncio para formar incrustaciones insolubles. La concentración del ion bicarbonato es algunas veces llamada alcalinidad al anaranjado de metilo.
- **Ion carbonato:** puede también reaccionar con los iones calcio, magnesio, hierro, bario y estroncio para formar incrustaciones insolubles. Los iones carbonato están rara vez presentes en aguas producidas porque el pH es usualmente muy bajo (menor 8,3). La concentración del ion carbonato es a veces llamada alcalinidad a la fenolftaleína (Lorenzo, 2011).

2.4. TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA LA REMOCIÓN DE DUREZA EN AGUAS

2.4.1. PROCESOS DE MEMBRANAS

En el tratamiento de aguas duras a través de la separación por membranas, el agua pasa a través de una membrana en virtud de una fuerza impulsora dejando atrás una porción de impurezas originales que se presentan como un concentrado (NALCO CHEMICAL COMPANY, 1982). Los procesos de membrana más empleados son la ósmosis inversa y nanofiltración.

- **Ósmosis inversa:** la ósmosis Inversa (OI) está basada en la búsqueda fundamental del equilibrio. Si dos fluidos que contienen diferente concentración de sólidos disueltos son puestos en contacto, éstos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Cuando estos fluidos están separados por una membrana semipermeable, uno de ellos (el de menor concentración) se moverá a través de la membrana hacia el fluido que tenga una mayor concentración de sólidos disueltos (Valenzuela, 2004). Por este método se eliminan el calcio y el magnesio en un 94- 98%,

pero también se eliminan el sodio en un 87-93%, los nitratos en 60-75% y los iones de cloruro y fluoruro (87-93%) (Vitoria, 2002).

- **Nanofiltración:** la nanofiltración (NF), también denominada ósmosis inversa a baja presión o ablandamiento por membrana, en términos de la selectividad de la membrana se encuentra entre las membranas de la ósmosis inversa y la ultrafiltración y posee un tamaño de poros típicamente entre 0.001 y 0.01 μm . Este método normalmente elimina en un 80% a 95% de la dureza total y 70 % de iones monovalentes (Anselme, 1998).

2.4.2. EVAPORACIÓN-CONDENSACIÓN

Valenzuela (2004) menciona que el proceso de evaporación – condensación constituye un proceso térmico, por medio del cual el agua se somete a calentamiento hasta llegar a su punto de ebullición, colectando posteriormente el vapor en un condensador para obtener agua pura. A medida que se evapora el agua de la solución y el líquido se vuelve más concentrado, se llega a un punto en que se rebasa la solubilidad de la sal, esto provoca la precipitación por lo común en forma de incrustaciones sobre las superficies de transferencia de calor donde el agua es evaporada, las incrustaciones pueden consistir en sales de calcio, magnesio y sílice.

2.4.3. EFECTO DEL CAMPO MAGNÉTICO

En los últimos años se ha desarrollado una nueva técnica para el tratamiento de aguas duras que se conoce como Tratamiento Magnético del agua, el cual consiste en hacer pasar el agua dura por un campo magnético alto (del orden de 500 Gauss) con un caudal medio del orden de algunos litros por minuto, luego de lo cual el agua adquiere una propiedad singular: no produce incrustaciones. El mecanismo por el cual el tratamiento magnético afecta las propiedades del agua dura no ha podido hasta la fecha ser explicado satisfactoriamente, existiendo sí, ciertos criterios que tratan de explicar de modo cualitativo el proceso.

Experimentos efectuados en torno a este fenómeno indican una clara dependencia a la intensidad del campo magnético aplicado y la velocidad del fluido, pero existe duda en el efecto del campo con respecto a la estructura del agua surgiendo dos alternativas, una que implica un reforzamiento del poder de atracción de los iones diluidos u otra que actúa sobre las moléculas de agua rompiendo el fuerte encapsulamiento de los iones. En esta última actúa rompiendo directamente en la solución el enclaustramiento de las impurezas (iones), propiciando así que se liberen en la misma solución micro cristales no ligados al recipiente (arenilla fina), los cuales más tarde precipitan (Zavaleta y Varela, 1998).

2.5. TRATAMIENTO MAGNÉTICO EN AGUAS DURAS

Gálvez (2010) indica que el tratamiento magnético del agua consiste en un método no químico para tratar aguas duras, es usado extensivamente en todo el mundo con importantísimos efectos económicos.

Por su parte Tamari *et al.* (2001) indican que el tratamiento magnético de aguas, consiste en aparatos magnéticos, generalmente en forma de tubos, en donde se hace pasar el agua por campos magnéticos, los mismos que son emitidos por imanes permanentes colocados dentro de los aparatos magnéticos. Existen varios diseños en cuanto a la ubicación de los imanes con relación a la tubería, aunque los estudios indican que aquello dependerá de las necesidades y fines del tratamiento.

Salman *et al.* (2015) afirman que el tratamiento de agua magnética es un método propuesto de tratamiento de agua. Los fabricantes de dispositivos de tratamiento han afirmado que los campos magnéticos potentes pueden afectar las propiedades de los solutos que pasan a través del campo magnético eliminando la necesidad de agentes de tratamiento químico como ablandadores o agentes antiescalantes.

2.5.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TRATAMIENTO MAGNÉTICO DE AGUAS DURAS

- Diamagnetismo:** La mayoría de los sólidos que forman las incrustaciones son diamagnéticos; por ejemplo, el carbonato y el sulfato de calcio. Las sustancias diamagnéticas no poseen un momento magnético permanente; es decir, que puede perder su polaridad ante variaciones de la temperatura y presión. Cuando ellas no se someten al campo magnético se agrupan en grandes flóculos que precipitan formando incrustaciones. Si estas sustancias se someten al campo magnético, adquieren la polaridad del campo y por lo tanto se repelen y se mantienen suspendidas en el fluido. Como resultado de esta interacción se elimina la formación de incrustación y también la ya existente (Del Toro y Berenguer, 2001).
- Intensidad de campo magnético:** En la información analizada no se encuentra una recomendación para seleccionar la intensidad de campo magnético que se debe aplicar al agua en función de alguna característica; como, por ejemplo, el contenido de dureza. En el cuadro 2.2, se muestran algunas intensidades magnéticas aplicadas en algunas investigaciones que se revisaron.

Cuadro 2.2. Intensidades de campo magnético aplicadas en diferentes investigaciones

INVESTIGACIÓN	INTENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO	COMENTARIO
Gabrielli <i>et al.</i> , 2001	1,600 G.	Observaron remoción de calcio.
Cefalas <i>et al.</i> , 2008	6,000 y 12,000 G.	82% y 93.5% de formación de aragonita.
Clifford <i>et al.</i> , 2008	356 G.	La aragonita se incrementó en 24 horas.
Meng-Chun y Clifford, 2010	212 y 1,800 G.	Observaron crecimiento de aragonita.

Se puede apreciar que desde bajas intensidades magnéticas hay un efecto en la cristalización del carbonato de calcio. Clifford *et al.* (2008) se encontraron

con intensidades magnéticas muy bajas (356G) observaron crecimiento de aragonita. Al incrementar el campo magnético a valores mayores de 1,000 G, observaron una mejor respuesta. Gabrielli *et al.* (2001), observaron un incremento en la remoción de calcio al utilizar una intensidad magnética de 1,600 G y la eficiencia se incrementó al aumentar el tiempo de contacto o número de ciclos. Meng-Chun y Clifford (2010), observaron que la velocidad de crecimiento de aragonita fue mayor en la medida que incrementó el campo magnético. También observaron que el tiempo de premagnetización (tiempo de contacto del agua con el campo magnético antes de la cristalización) influye en la velocidad de crecimiento. Cefalas *et al.* (2008) afirman que al utilizar mayores intensidades de campo magnético entre 6,000 y 12,000 G observaron una precipitación del 82 y 93.5% del carbonato de calcio y mayor formación de aragonita.

- **Influencia de la velocidad de flujo:** Otro factor importante a considerar es la velocidad de flujo. Gabrielli *et al.* (2001), también estudiaron diferentes velocidades de flujo. En el cuadro 2.3, se muestra la influencia de la velocidad de flujo, con respecto al tiempo para formar incrustación y al tiempo de nucleación, con y sin tratamiento magnético. Se observa que la formación de incrustación es más rápida cuando no se aplica campo magnético.

Cuadro 2.3. Influencia de la velocidad de flujo sobre t_s y t_n

	SIN TRATAMIENTO	V= 0.074 m/s	V=0.885 m/s
Tiempo para formar incrustación " t_s " (min)	75	180	225
Tiempo de nucleación " t_n " (min)	5	30	50
Fuente: (Gabrielli <i>et al.</i> , 2001)			

- **Potencial de hidrógeno (pH):** Los cambios de pH en un sistema expuesto a campo magnético han sido reportados en varias investigaciones y la tendencia no está todavía muy clara. Algunos trabajos reportan reducción en el pH después de aplicar el campo magnético. Parsons (1999), observó

una reducción del pH de 9,2 a 8,5 después de la aplicación del campo magnético a una solución de hidróxido de calcio. Observó que este cambio dependía de la intensidad del campo magnético. Al medir el pH sobre la superficie de un equipo de tratamiento magnético intrusivo, observó al inicio del experimento una reducción del pH de 7,0 a 6,5 y posteriormente un incremento gradual con el tiempo hasta valores de pH de 7,5 a 8,0. Al comparar estos resultados con los obtenidos de un blanco, observó que en este sistema no hubo cambios en el pH. De estas observaciones, propuso que los cambios en el pH se deben a reacciones electroquímicas que resultan de las corrientes eléctricas generadas por la fuerza de Lorentz y lo relacionó con una reducción en la incrustación.

2.6. INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL DE LA TUBERIA EN EL TRATAMIENTO MAGNÉTICO DE AGUAS DURAS

Gabrielli *et al.* (2001), estudiaron la influencia de la naturaleza del material de las tuberías, aplicaron el tratamiento magnético utilizando diferentes tuberías: acero inoxidable, cobre y dos tipos de cloruro de polivinilo (PVC), uno transparente y flexible; y el otro rígido y opaco del tipo de PVC usado en trabajos de plomería. Después de cinco ciclos de operación, obtuvieron reducción del contenido del ion Ca^{2+} de un 28% para el acero y el cobre, mientras que para el PVC rígido fue del 18% y prácticamente cero para el PVC flexible. Observaron que al aumentar el tiempo de tratamiento no aumentó mucho la eficiencia del campo magnético. Tan solo mejoró un 5% al aumentar el número de ciclos de 5 a 150.

Alimi *et al.* (2009) realizaron experimentos utilizando tuberías de teflón, tygon, policloruro de vinilo, cobre y acero inoxidable, y observaron que el campo magnético influye en la nucleación homogénea y en la precipitación total en las tuberías de materiales no conductores. Con la tubería de tygon lograron obtener mayor tasa de precipitación homogénea. También la rugosidad de la tubería influye en la nucleación del carbonato de calcio en presencia del campo magnético.

Explican el fenómeno a partir de la existencia de potenciales de flujo en la tubería que dependen de la velocidad y de la perturbación del perfil de flujo al aplicar el campo magnético. El efecto combinado podría hacer variar la distribución de carga en las cercanías de las superficies de contacto, alterando el equilibrio iónico local en las paredes y creando núcleos por precipitación. El potencial de flujo depende tanto de la velocidad como del material de la tubería, esto podría explicar las diferencias que se observan cuando el material de la tubería varía (Berlín, 2015).

2.6.1. TIPO DE TUBERÍA SEGÚN EL MATERIAL CONSTITUYENTE

Los elementos que conforman este sistema circulatorio están elaborados en diversos materiales, gracias a la evolución de las tecnologías de producción.

- **Tubería de cobre:** Denominado técnicamente tubo de cobre estirado de precisión sin soldadura, su proceso de fabricación se basa principalmente en la extrusión y el laminado. Es una de las tuberías más utilizadas para la conducción de fluidos. Para su uso en instalaciones de refrigeración, se fabrica tubería de cobre deshidratada y limpia interiormente, la cual se nombra de manera diferente a la de fontanería.
- **Tubería de aluminio:** Aleación de aluminio y magnesio o manganeso. Se utiliza para instalaciones de riego por aspersión: móviles y semifijas. Entre las principales ventajas de este tipo de tubería es que son ligeras, tienen gran duración y son resistentes a la oxidación.
- **Tubería de PVC:** Esta tubería ha dado magníficos resultados en instalaciones hidráulicas de diferentes tipos, desde edificaciones residenciales hasta extensas redes de distribución de agua potable y alcantarillado. Está diseñada para transportar agua servida, residual doméstica, industrial, agua lluvia y ventilación. Los tubos vienen con extremo liso y los accesorios con campana, para ser unidos con cemento solvente. Entre las principales ventajas se encuentran el costo, la resistencia, la ligereza y la facilidad de montaje (Revista de Logística, 2015).

2.7. APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO MAGNÉTICO EN LAS INDUSTRIAS

El tratamiento magnético del agua en la industria tiene como efecto inmediato el ahorro de energía, ya que el sarro o caliche es un aislante térmico que reduce la transferencia de calor desde los tubos de una caldera hacia el agua (Coe y Cass, 2000).

De acuerdo con López (2010) el mayor número de problemas cotidianos causados por el agua dura en nuestro país son: formación de sarro en los conductos, corrosión generalizada, aumento del número de reparaciones, mayores costos de mantenimiento y funcionamiento, reposición prematura de maquinarias y equipos. Esta situación causa pérdidas de eficiencia, con el consecuente aumento en el uso de energía, lo que genera el impacto de mayores emisiones gaseosas en el ambiente. A continuación, se muestran las investigaciones realizadas acerca de la efectividad del tratamiento magnético en aguas duras:

2.7.1. APLICACIÓN DE UN CAMPO MAGNÉTICO ORTOGONAL AL FLUJO EN SISTEMAS DE AGUA PARA REDUCIR LA FORMACIÓN DE INCRUSTACIONES

Para Vaca (2014), las sales que se encuentran disueltas en el agua que se utiliza para los procesos productivos tienen un gran impacto en las instalaciones y equipos. La característica incrustante del agua se da debido a la presencia de carbonatos de calcio y magnesio. Estas sales se depositan en las paredes del recipiente que contiene el fluido, generando sarro, en esta investigación se buscó determinar el alcance de un sistema magnético que evite la deposición de estas sales y su posible eliminación. Mediante la definición de dos etapas experimentales se realizaron las pruebas con el objetivo de comprobar la disminución de las deposiciones dentro de tuberías y equipos, la existencia de la memoria magnética en el fluido y su reducción superficial. Durante la primera etapa (en un banco de pruebas) se observó la disminución del espesor de sarro en

una tubería de acero, indicando que el campo magnético ortogonal aplicado sobre el fluido genera un cambio en las características del mismo. En la segunda etapa se evaluó la aplicación del sistema a la entrada de agua de calderas y sus respectivos ablandadores. Observándose una reducción en las incrustaciones existentes dentro de la caldera y un aumento en la eficiencia catiónica del ablandador.

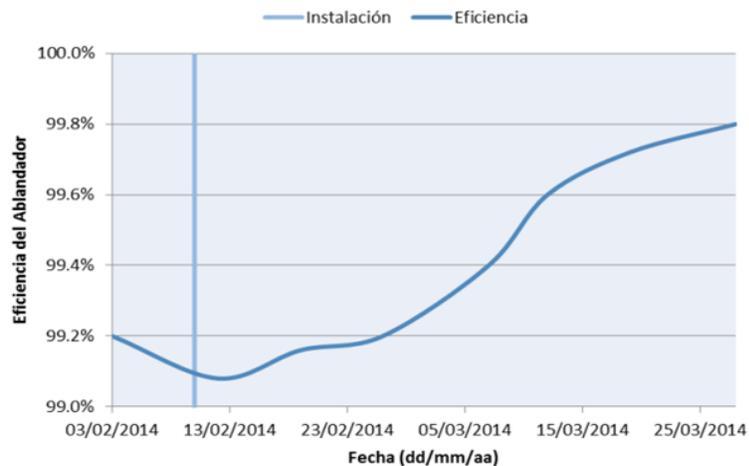


Gráfico 2.1 Eficiencia catiónica del ablandador. Fuente: Vaca (2014)

2.7.2. EFECTO DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE LA FORMACIÓN DE INCRUSTACIÓN EN SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA

Según Belín (2015), el experimento se realizó a escala laboratorio utilizando 6 circuitos de flujo continuo, 4 con campo magnético y 2 sin campo magnético (blancos) que operaron durante 60 días. El montaje de los experimentos, estuvo integrado por una bomba peristáltica para transportar el flujo y mantener una velocidad constante; una resistencia eléctrica para elevar la temperatura a 36°C y simular la temperatura de un circuito de enfriamiento; un recipiente de vidrio con un volumen útil de 9L; manguera tygon para la conducción del agua con una longitud total de 3.25 m; imanes de neodimio para obtener las intensidades de campo magnético colocados en el circuito de enfriamiento en posición ortogonal (campo magnético perpendicular al flujo del agua) y en atracción (polo norte- polo sur) y por último, se colocaron (sobre la manguera después de los imanes) dos

testigos de incrustación uno de cobre y otro de acero inoxidable 304 con dimensiones de 3"x1/2"x1/16" cada uno, con el fin de determinar la cantidad de incrustación formada. Se operaron en dos etapas y las condiciones experimentales fueron: intensidades de campo magnético de 2,500 G (0.25 T) y 5,000 G (0.5 T), velocidad de flujo de 0.43 m/s y 0.80 m/s, caudal de 300 mL/min y 550 mL/min y tiempo de contacto de 0.20 s y 0.11 s. Los circuitos fueron alimentados con agua de pozo con alta dureza (678 mg/L de CaCO_3). Durante los días de operación se monitorearon los cambios en las características del agua midiendo pH, conductividad, dureza total, dureza de calcio y alcalinidad. Se dio seguimiento a los cambios en la estructura del cristal del carbonato de calcio, mediante el análisis cristaloóptico, la microscopia electrónica de barrido y la difracción de rayos X.

Los resultados de la calidad del agua, mostraron que el campo magnético no influyó en los cambios de los parámetros más importantes del agua. Los resultados obtenidos del análisis cristaloóptico comprobaron que el campo magnético cambia la estructura cristalina del carbonato de calcio (CaCO_3) de calcita a aragonita y que esta transformación es mayor cuando se aumenta la intensidad de campo magnético.

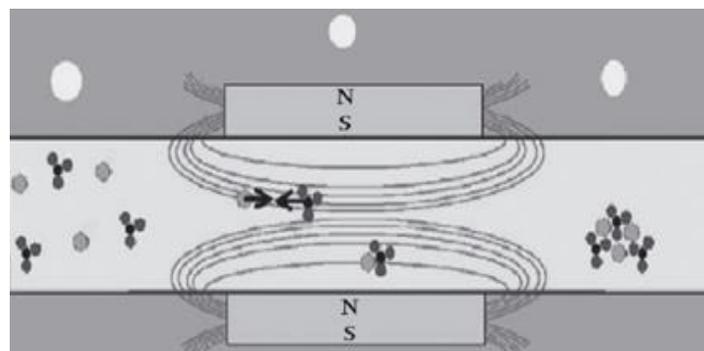


Ilustración 2.2. Influencia del campo magnético en el calcio y magnesio.
Fuente: Zuñiga *et al.* (2016).

2.7.3. EFECTO DEL TRATAMIENTO MAGNÉTICO DEL AGUA EN LA PRECIPITACIÓN DEL CARBONATO DE CALCIO: INFLUENCIA DEL MATERIAL DE LA TUBERIA

El objetivo principal de este trabajo fue investigar la influencia del material de la tubería, a través del cual se trató el agua escamosa (4 mM de CaCO_3) magnéticamente, en el proceso de precipitación de carbonato de calcio. Las soluciones probadas se expusieron a un campo magnético (MF) de 0,16 T durante 15 minutos con diferentes caudales (0,54-0,94 L min^{-1}) y pH (6-7,5). Los efectos del tratamiento magnético del agua y del material de la tubería (PTFE, Tygon, PVC, cobre y acero inoxidable) sobre la cristalización de CaCO_3 se evaluaron mediante una prueba de precipitación basada en el método de desgasificación de CO_2 disuelto. Se demostró que el tratamiento magnético (MT) afecta la cristalización del carbonato de calcio al aumentar la cantidad total de precipitado y al favorecer su formación en la solución a granel en lugar de incrustación en las paredes. Esto se observó para todos los materiales de tubería usados pero, es fuertemente dependiente de sus propiedades físico-químicas. Se encontró que las relaciones de precipitación homogénea y total se vieron significativamente influenciadas cuando se aplicó MF a través de materiales no conductores. También se encontró que para el mismo material de tubería, la rugosidad de la superficie juega un papel importante en el efecto de MT sobre la cristalización de CaCO_3 . Además, se demostró que el material de la tubería influye fuertemente en el proceso de nucleación de CaCO_3 incluso en ausencia de MF.

2.8. VARIABLES FÍSICO-QUÍMICAS EVALUADAS

Existen tres factores principales para determinar si un agua es o no incrustante, los cuales son: la dureza del agua, la alcalinidad y el pH. Algunas veces, la presencia de otros materiales disueltos (como sólidos disueltos totales) puede propiciar o no la formación de incrustaciones y/o corrosión mediante el aumento de la conductividad eléctrica del agua (Nalco, 2009).

2.8.1. ALCALINIDAD

La alcalinidad en el agua juega un papel clave, debido a que actúa como amortiguadora a los cambios de acidez o basicidad. La alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. La alcalinidad se expresa como alcalinidad a la fenolftaleína y la alcalinidad al anaranjado de metilo o alcalinidad total. Estas caracterizaciones se deben a los virajes o cambios de color de estos indicadores al llegar al punto final en la determinación por titulación con un ácido mineral fuerte (H_2SO_4 o HCl). La titulación para la determinación de la alcalinidad se hace en dos fases: en la primera fase se mide la alcalinidad a la fenolftaleína, titulando la muestra hasta un pH de 8.3 y en la segunda, se determina la alcalinidad al anaranjado de metilo o la alcalinidad total, titulando la muestra hasta un pH de 4.5 (Guerra *et al.*, 2008).

Cuando un agua superficial presenta alcalinidad a la fenolftaleína, es un indicio de que el agua está contaminada, ya que un agua natural no debe tener hidróxidos. Existen diferentes rangos de alcalinidad, el cuadro 2.4, muestra la clasificación de la alcalinidad en mg/L de $CaCO_3$.

Cuadro 2.4. Rangos de alcalinidad (Kemmer y McCallion, 1989)

CLASIFICACIÓN	ALCALINIDAD (mg/L de $CaCO_3$)
BAJA	< 75
MEDIA	75 - 150
ALTA	> 150

2.8.2. DUREZA DEL AGUA

La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y esto está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. Forma incrustaciones en recipientes y tuberías lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales como las unidades de transferencia de calor. El grado de dureza es una medida de la concentración total en peso, del contenido de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , expresada como equivalente de carbonato de

calcio, debido a que es el principal causante de las incrustaciones y usualmente es medida en partes por millón o miligramos por litro (Rodríguez, 2010).

Existen diversas clasificaciones de dureza del agua. En el cuadro 2.5, se muestra una clasificación de dureza del agua con sus correspondientes valores en mg/L de CaCO₃.

Cuadro 2.5. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza. (Klely, 1999)

CLASIFICACIÓN	DUREZA (mg/L de CaCO₃)
BLANDAS	0 - 75
MODERADAMENTE DURA	75 - 150
DURA	150 - 300
MUY DURA	Mayor a 300

2.8.3. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

El pH indica el grado de acidez o basicidad de una solución. El químico Danés Sorensen originalmente definió el pH como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno de acuerdo a la ecuación 7. Los valores de pH están comprendidos en una escala de 0 a 14, el valor medio es 7, el cual corresponde a una solución neutra; los valores que se encuentran por debajo de 7 indican las soluciones ácidas y valores por encima de 7 corresponde a las soluciones básicas o alcalinas. (Berlín, 2015).

Nalco (2009), afirma que la alcalinidad y el pH están íntimamente relacionados, porque aumentos en el pH indican aumentos en la alcalinidad y viceversa. El control del pH es de vital importancia para la mayoría de los programas de tratamiento del agua de enfriamiento. En general, la corrosión de los metales aumenta cuando el pH es inferior a lo recomendado; la formación de incrustaciones puede empezar o aumentar cuando el pH es superior a lo recomendado; y un alto o bajo pH puede permitir el crecimiento y desarrollo de problemas microbianos. Al igual que con el pH, cuando la alcalinidad se encuentra por debajo de los valores recomendados, aumenta las posibilidades de corrosión; cuando la alcalinidad es superior a los rangos recomendados, aumenta las posibilidades de formación de incrustación.

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

El trabajo se realizó en los laboratorios de la ESPAM MFL, ubicados en el área agroindustrial. Las muestras de agua dura se consideraron de los pozos existentes en la carrera de ingeniería ambiental.

3.2. DURACIÓN

La duración del trabajo experimental se dividió en 2 periodos. El primero, de planificación (proyecto de titulación), y el segundo el de ejecución (tesis). Cada periodo tuvo una duración de 6 meses.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.3.1. MÉTODOS

- **Método experimental:** Este método consiste en la manipulación de variables independientes y estudiar los efectos que determinan la variación de una variable dependiente (Aveiga, 2012).
- **Cuantitativo:** Este método se fundamenta en los números y su interpretación, considera una realidad existente que solo necesita ser comprobada (Guanipa, 2011).

3.3.2. TÉCNICAS

- **Observación científica:** el investigador tiene claro lo que observa y las razones por la que lo hace (Aveiga, 2012).
- **Fuentes de datos secundarios:** hace referencia a la recopilación bibliográfica en fuentes digitales o físicas, para complementar los datos primarios extraídos por el investigador del trabajo realizado (Pulido, 2015).

3.4. FACTORES EN ESTUDIO

Tuberías (cobre, aluminio, PVC)

3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el diseño experimental, se siguió con la secuencia que muestra la imagen a continuación.



Ilustración III.1 Metodología experimental del proyecto.
Elaboración propia.

3.5.1. SELECCIÓN DE MUESTRA

Para la realización del experimento, se seleccionó un agua con alta dureza, se analizó las aguas de pozo de la ESPAM MFL indicando si tiene idoneidad para el proyecto. Los análisis que hicieron son los de: dureza total, dureza cálcica, alcalinidad y pH.

3.5.2. FACTORES EXPERIMENTALES

Tomando relación a lo planteado por Belín (2015), se planteó el trabajo experimental para trabajar con la misma velocidad para los experimentos y una misma intensidad de campo magnético, teniendo como variables experimentales, el material de los tubos (cobre, aluminio, PVC) por donde pasará el fluido.

Cuadro 3.1. Factores experimentales que se usarán en el experimento.

VARIABLES	TUBOS			
	Blanco (Gauss)	Cobre (Gauss)	Aluminio (Gauss)	PVC (Gauss)
Factores Experimentales				
Campo Magnético	0	2100	2100	2100
Velocidad del Flujo (l/min)	40	40	40	40

3.9.3. SISTEMA EXPERIMENTAL

Fue el diseño de la tecnología magnética, la misma contó con imanes cerámicos de iguales intensidades, colocados por fuera de tuberías de diferentes materiales, comprobando cual fue el material más idóneo para que la tecnología sea más eficiente en la disminución de la dureza total del agua.

3.9.4. OPERACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

El agua dura pasó por cada uno de los tratamientos, que tuvieron diferente tipo de material, manteniendo una velocidad constante al pasar por la tubería.

3.9.5. EVALUACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Una vez que el agua ha sido tratada con las tecnologías magnéticas, se analizaron en laboratorio con los parámetros de dureza total, alcalinidad y pH, para comprobar la eficacia de las tecnologías magnéticas y la relación existente entre los 3 parámetros.

3.10. UNIDAD EXPERIMENTAL

- Dureza total
- Dureza cálcica
- Alcalinidad
- PH

3.11. VARIABLES A MEDIR

- **VARIABLE INDEPENDIENTE:**

Tratamiento magnético

- **VARIABLE DEPENDIENTE:**

Concentraciones de calcio y magnesio

3.12. MANEJO EXPERIMENTAL

Cuadro 3.2. Tratamientos

Tratamiento	Descripción
T1	1 Minuto - tubo de aluminio
T2	2 Minutos - tubo de aluminio
T3	3 Minutos - tubo de aluminio
T4	4 Minutos - tubo de aluminio
T5	5 Minutos - tubo de aluminio
T6	1 Minuto - tubo de cobre
T7	2 Minutos - tubo de cobre
T8	3 Minutos - tubo de cobre
T9	4 Minutos - tubo de cobre
T10	5 Minutos - tubo de cobre
T11	1 Minuto - tubo de PVC
T12	2 Minutos - tubo de PVC
T13	3 Minutos - tubo de PVC
T14	4 Minutos - tubo de PVC
T15	5 Minutos - tubo de PVC
TA	Inicial Aluminio
TC	Inicial Cobre
TP	Inicial PVC

3.13. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Análisis de la varianza (ANOVA)

3.14. OTROS ASPECTOS

Para redacción del proyecto se utilizará el software: Microsoft Word.

3.15. PROCEDIMIENTOS

- **FASE I. IMPLEMENTAR UNA TECNOLOGÍA MAGNÉTICA PARA LA REDUCCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE Ca Y Mg EN AGUAS DURAS**

Los experimentos se realizaron en columnas hechas de tubos de PVC, aluminio y cobre (figura 3.1), que se orientaron horizontalmente y se saturaron lentamente con agua de pozo hasta que alcanzaron la capacidad de retención en el campo

(Zlotopolski, 2017). El diámetro de la columna era de 2 pulgadas y la longitud fue de 6 pulgadas.

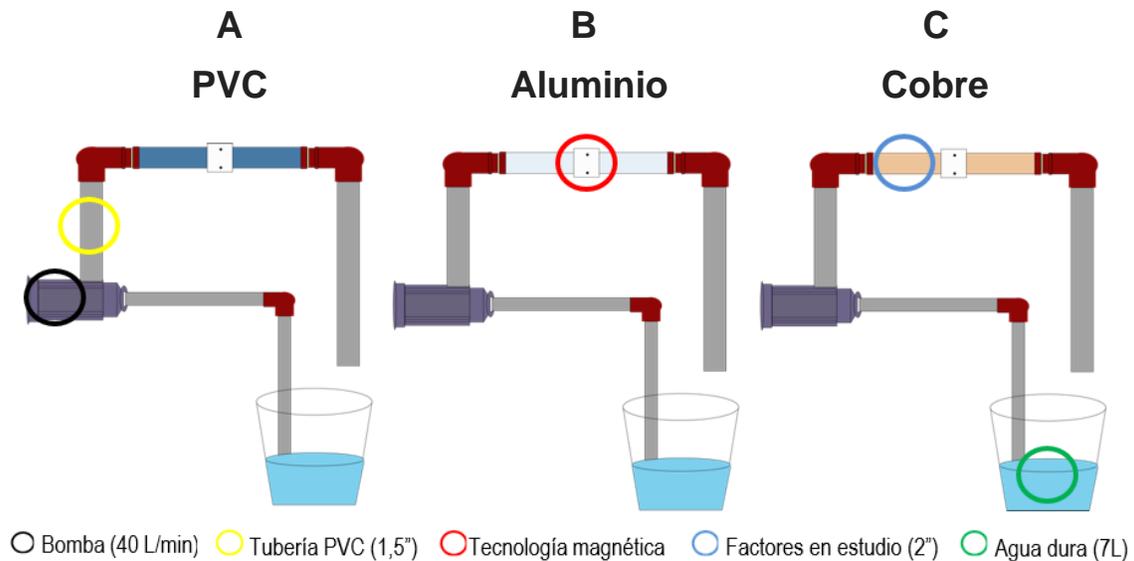


Figura 3.1. Diseño de los tres tipos de tecnología empleados en los tratamientos.

El agua tratada se recogió en depósitos que se ubicaron debajo del tubo. La duración del experimento fue de 1 mes con tres tratamientos y cinco repeticiones. De acuerdo a Fathi *et al.* (2006) para fines de comparación, los experimentos también se llevan a cabo sin pasar por la tecnología magnética (testigo). El componente magnético del sistema se ubicó alrededor de los tubos, en forma de anillo, orientado con sus respectivas polaridades en oposición entre sí.

Estos criterios fueron analizados a través de las especificaciones demostradas por Quinn *et al.* (1997) quienes indican que el acondicionamiento magnético del agua proporciona las siguientes funciones:

- Evita la deposición de incrustaciones.
- Descalcificación, reconociendo que el proceso de desincrustación es lento y puede llevar varios meses completarlo.
- Control de corrosión.
- Control de óxido blanco.

Los acondicionadores de agua magnéticos se han empleado en más de 300.000 aplicaciones. Más de 700 sistemas están instalados en cinco plantas de acero principales. Su operación se caracteriza por:

- Mantenimiento mínimo.
- Ligera caída de presión.
- Ausencia de adiciones químicas y, por lo tanto, sin efectos ambientales adversos.
- Vida de servicio indefinida.
- Integrado fácilmente en instalaciones existentes.

▪ **FASE II. ANALIZAR EL AGUA, ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON LA TECNOLOGÍA MAGNÉTICA**

En el experimento, se comprobó a través de parámetros relacionados a la dureza del agua (alcalinidad, dureza total, dureza cálcica y dureza magnética) para considerar el proceso de sedimentos en los sistemas de flujo de agua. Esta medición se realizó en los laboratorios del área agroindustrial de la ESPAM MFL. El objetivo de este trabajo fue estudiar la concentración de la dureza del agua a tratar. Un caudal de 0,20 L/s de agua circuló a través del circuito, desde un recipiente, gracias a una bomba. El caudal fue moderado para tener un régimen laminar.

▪ **FASE III. CONTRASTAR LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO**

En esta fase se aplicaron análisis y pruebas estadísticas con la finalidad de realizar una comparación entre los datos obtenidos previo tratamiento y post tratamiento, en las diferentes repeticiones experimentales.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. FASE II. ANALIZAR EL AGUA, ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON LA TECNOLOGÍA MAGNÉTICA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del tratamiento magnético de muestras de agua subterránea con altas concentraciones de calcio y magnesio, en función al material de la tubería que contenía el agua de pozo.

Cuadro 4.1. Parámetros físico-químicos de la muestra de agua correspondiente al tubo de aluminio

Tratamiento	Alcalinidad (1)		Dureza total (2)		Dureza cálcica (3)	Dureza magnésica (diferenciación)	pH	Temperatura °C
	Tiempo	Carbonatos mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
TA	Inicial	Ausencia	30	360	200	160	7,66	25,9
T1	1 minuto	Presencia	30	330	200	130	7,82	26
T2	2 minutos	Presencia	30	330	210	120	7,95	26,2
T3	3 minutos	Presencia	30	330	210	120	8,04	26,4
T4	4 minutos	Presencia	30	330	210	120	8,12	26,6
T5	5 minutos	Presencia	30	340	220	120	8,14	26,7

En el cuadro 4.1., podemos observar que la muestra de agua de pozo del tubo de aluminio antes de ser tratada presento una dureza total de 360 mg/L, una dureza cálcica de 200 mg/L, la dureza magnésica fue de 160 mg/L y una alcalinidad de 30mg/L. Conforme se observa en el cuadro, la aplicación del tratamiento magnético en función del tiempo, para la disminución de la concentración de calcio y magnesio en muestras de agua de pozo en un tubo de aluminio fue eficiente, debido a que la dureza total y magnésica disminuyen. Por otro lado, la dureza cálcica no fue afectada por el campo magnético.

De acuerdo con Viltre *et al.* (1999) cuando la temperatura es de 30°C un aumento de la inducción de campo magnético con una disminución del tiempo de exposición favorece la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio. En la medida que aumenta la temperatura, la influencia del tratamiento magnético es más notable sobre la variación de la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio.

En la investigación realizada por Viltre *et al.* (1999) la muestra de incrustación presenta como componentes mayoritarios los carbonatos de calcio y magnesio, con 2,69 % de Ca^{2+} , 31,36 % de Mg^{2+} y 62,25 % de carbonatos, mientras los iones aluminio, hierro y manganeso se encuentran en el orden de trazas. El tratamiento magnético del agua (TMA) incrementa significativamente la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio presentes en la muestra, siendo este efecto más evidente a la temperatura (T) de 70 °C, inducción del campo magnético (B) de 120 G y tiempo de exposición (t_{exp}) 2,76 s.

Cuadro 4.2. Parámetros físico-químicos de la muestra de agua correspondiente al tubo de cobre

Tratamiento	Tiempo	Alcalinidad (1)		Dureza total (2)	Dureza cálcica (3)	Dureza magnésica (diferenciación)	pH	Temperatura °C
		Carbonatos	mg/L					
TC	Inicial	Ausencia	30	360	200	160	7,41	27,4
T6	1 minuto	Presencia	30	310	180	130	7,49	27,5
T7	2 minutos	Presencia	30	340	220	120	7,63	27,7
T8	3 minutos	Presencia	30	340	210	120	7,75	27,9
T9	4 minutos	Presencia	40	330	190	120	7,86	27,9
T10	5 minutos	Presencia	30	330	210	120	7,94	28,1

En el cuadro 4.2., se puede observar que la dureza total y dureza magnésica disminuyeron considerablemente después de la aplicación del tratamiento magnético en la tubería de cobre. Durante 5 minutos de exposición de la muestra de agua subterránea contenida en un tubo de cobre al tratamiento magnético la dureza magnésica presentó una menor concentración correspondiente a 120 mg/L. Considerando el pH y la temperatura, estas variables fueron proporcionales al tiempo de exposición del tratamiento magnético, es decir que al aumentar el tiempo el pH y la temperatura aumentaron.

Según Neira (2006) el tiempo durante el cual, mediante circulación profunda, el agua interactúa o está en contacto directo con el medio poroso (tiempo de residencia), ejerce un claro efecto sobre la concentración de las sales en las aguas minerales: a mayores tiempos de residencia se generan aguas con mayores concentraciones de sales disueltas.

Cuadro 4.3. Parámetros físico-químicos de la muestra de agua correspondiente al Tubo de PVC

Tratamiento	Alcalinidad (1)		Dureza total (2)		Dureza cálcica (3)	Dureza magnésica (diferenciación)	pH	Temperatura °C
	Tiempo	Carbonatos	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
TP	Inicial	Ausencia	30	360	200	160	7,24	27,3
T11	1 minuto	Presencia	40	330	190	130	7,45	27,3
T12	2 minutos	Presencia	30	330	210	120	7,6	27,3
T13	3 minutos	Presencia	30	330	200	120	7,72	27,5
T14	4 minutos	Presencia	30	330	200	120	7,83	27,6
T15	5 minutos	Presencia	30	330	220	120	7,89	27,7

Al igual que los demás tratamientos, los resultados obtenidos en la remoción de calcio y magnesio a través de un campo magnético en una muestra de agua subterránea contenida en un tubo de PVC demuestran que la aplicación de este tratamiento fue eficiente. La dureza total del agua disminuyó de 360 mg/L a 330 mg/L. Por otro lado, la dureza magnésica disminuyó de 160 mg/L a 120 mg/L. En lo que respecta al pH y la temperatura, estas variables fueron proporcionales con la duración del tratamiento, a medida que aumentaba el tiempo de la exposición del agua al campo magnético el pH y la temperatura aumentaron.

La efectividad del tratamiento magnético se encuentra en la prevención de las incrustaciones, no en la remoción de dureza, ya que prácticamente no remueve dureza.

En la investigación realizada por Viltre *et al.* (1999) el tratamiento magnético del agua (TMA) incrementa significativamente la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio presentes en la muestra, siendo este efecto más evidente a la temperatura (T) de 70°C, inducción del campo magnético (B) de 120 G y tiempo de exposición (t exp) 2,76 s.

4.2. FASE III. CONTRASTAR LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO

ALCALINIDAD

De acuerdo al gráfico 4.1, los valores de alcalinidad del testigo y tubo de aluminio permanecieron constantes durante el experimento, con valores promedios de 30mg/l de alcalinidad. No obstante, en los tubos de cobre y PVC, se observó incrementos hasta llegar a valores promedios de 32mg/l y 34mg/l, respectivamente. El p-valor: 0,26 del ANOVA indica que no hay diferencia significativa entre tratamientos con respecto al testigo. Gabrielli (2001) encontró que la potencia magnética y el diseño geométrico de los imanes tienen un rol preponderante en la eficiencia de un sistema de tratamiento magnético de agua. Esto puede explicar la poca variabilidad en el efecto de los tratamientos en los niveles de alcalinidad.

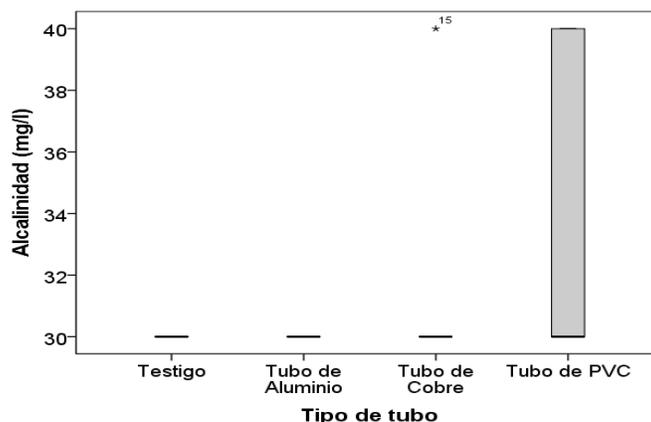


Gráfico IV.1 Diagrama de cajas de la alcalinidad.

DUREZA TOTAL

La dureza total se redujo considerablemente con los tres tratamientos en comparación con los valores obtenidos en el testigo. Se encontró diferencia muy significativa entre los tratamientos estudiados (p-valor: $2,51 \times 10^{-6}$) con respecto al testigo, sin embargo, no existió evidencia de diferencias entre tratamientos debido a que los valores promedios de dureza total fueron de 332mg/l, 330mg/l y 330mg/l, en las tuberías de aluminio, cobre y PVC, respectivamente.

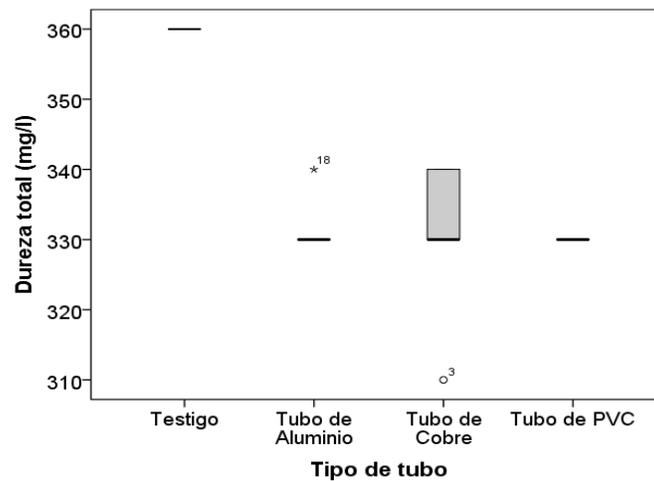


Gráfico IV.2 Diagrama de cajas de la dureza total

Alimi *et al.* (2007) también encontraron reducciones significativas en los niveles de dureza total usando campos magnéticos en muestras de agua. En su estudio, se utilizó campos magnéticos para incrementar la precipitación de CaCO_3 en agua estacionaria.

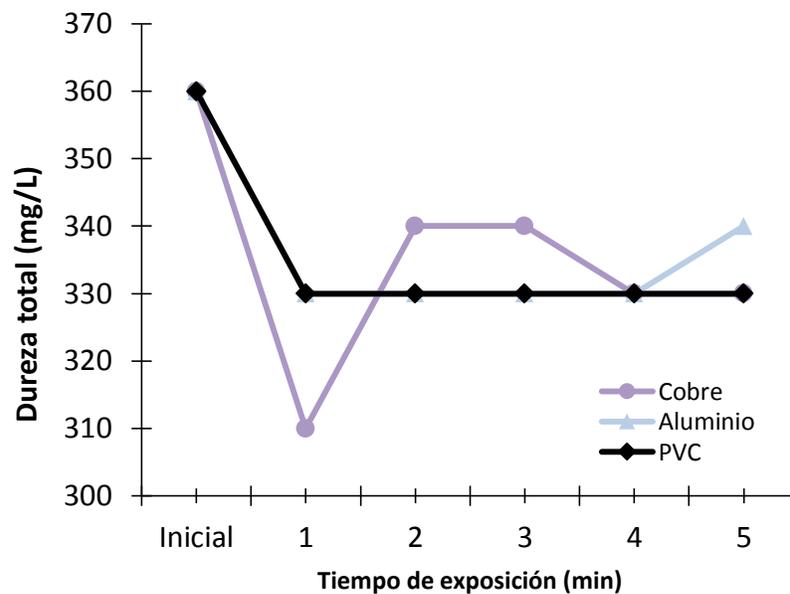


Gráfico IV.3. Variación de la dureza total de los tres tipos de tuberías en los diferentes tiempos de exposición.

En el gráfico 4.3., se evidencia que, con las tres tuberías desde el primer minuto de exposición a la tecnología magnética, la dureza total disminuye, siendo la tubería de cobre la más notable.

DUREZA CÁLCICA

El p-valor: 0,49 obtenido en el ANOVA muestra que no hay diferencia significativa entre tratamientos con respecto a la dureza cálcica. Aunque como lo muestra el siguiente gráfico, se obtuvo un aumento en los promedios de la dureza cálcica en el tratamiento con tubo de aluminio (210mg/l), tubo de cobre (202mg/l) y tubo de PVC (204mg/l).

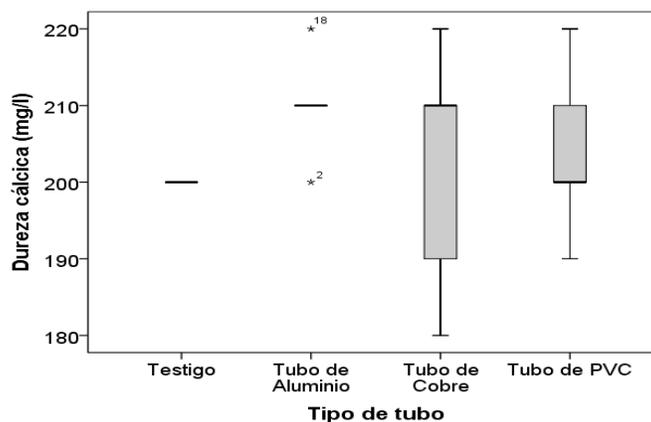


Gráfico IV.4. Diagrama de cajas de la dureza cálcica

Se logró identificar que los tres tipos de tuberías siguen patrones de comportamiento similares, en los diferentes tiempos de exposición. Los tres tipos de tuberías coincide que el tiempo de 1 minuto es el que registra los valores más bajos de dureza cálcica, a pesar de que ésta fluctúa entre rangos superiores después del 2 minuto (gráfico 4.5.).

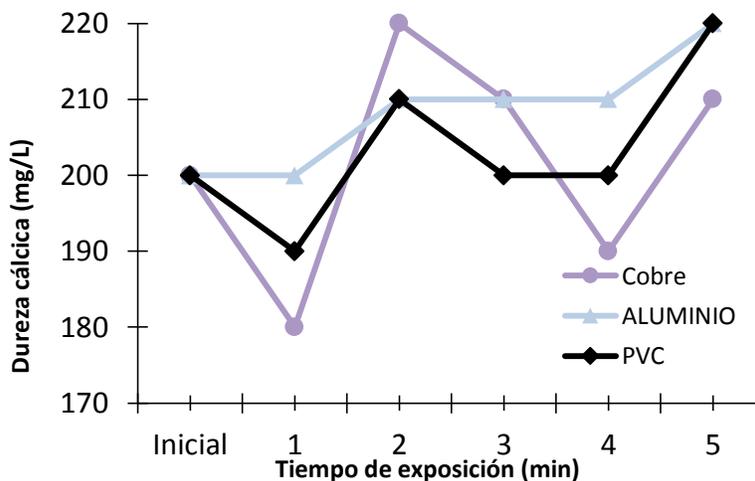


Gráfico IV.5. Variación de la dureza cálcica de los tres tipos de tuberías en los diferentes tiempos de exposición.

DUREZA MAGNÉSICA

La dureza magnésica fue el parámetro donde se obtuvo la mayor reducción de valores en comparación con los niveles iniciales del testigo. En los tres tratamientos, se obtuvo promedios de dureza magnésica reducidos hasta llegar a 122mg/L. El p-valor: $3,44 \times 10^{-11}$ muestra una diferencia muy significativa entre tratamientos.

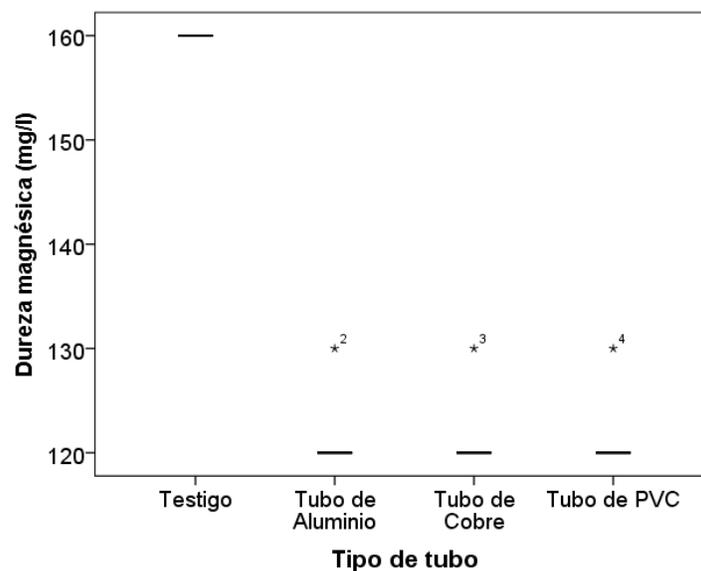


Gráfico IV.6. Diagrama de cajas de la dureza magnésica

Las principales justificaciones para instalar una tecnología de agua magnéticos son la energía, la calidad del producto, la reducción del mantenimiento y una mayor productividad, junto con una reducción del tiempo de inactividad. El tiempo de inactividad es especialmente crítico cuando se apagan las líneas de recocido continuo, limpieza electrolítica o galvanizado debido a la acumulación de incrustaciones de agua dura.

Este método al no ser químico para controlar la escala de la dureza del agua, no solo se usa para aumentar la calidad en el producto y reducir los costos de producción, sino también como un medio para reducir la contaminación y mejorar la imagen de la industria. La tecnología de acondicionamiento de agua magnética se ha empleado durante más de 30 años en la industria del acero. Permite que los sistemas de recirculación cerrados se conviertan a sistemas de enfriamiento de

paso único. Los altos costos de mantenimiento, el mayor consumo de energía y el costo de los productos químicos que normalmente están asociados con los circuitos de recirculación cerrados pueden, por lo tanto, reducirse o eliminarse considerablemente cuando se realiza un cambio.

Dado que el enfoque no químico es libre de contaminación, el agua de descarga puede devolverse a la fuente, como ríos, lagos o pozos profundos, y cumplir con todos los requisitos reglamentarios, siempre que la diferencia de temperatura esté dentro de los lineamientos de las leyes ambientales. Se podría usar un tanque de retención para ajustar la temperatura antes de la descarga, si la temperatura era preocupante.

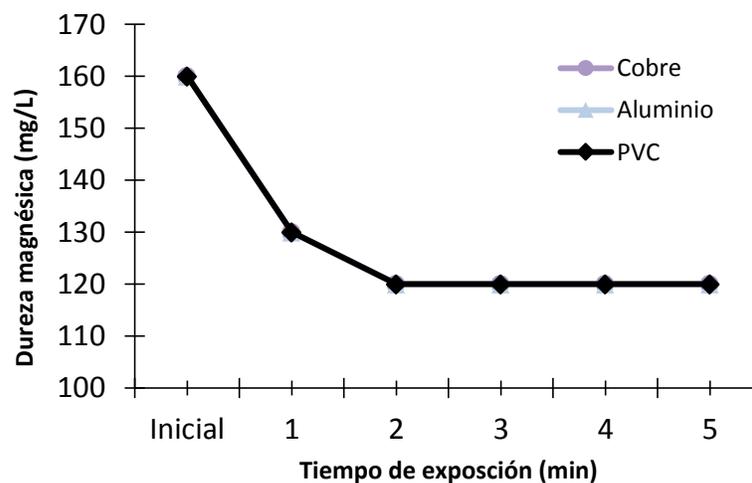


Gráfico IV.7. Variación de la dureza magnésica de los tres tipos de tuberías en los diferentes tiempos de exposición.

Finalmente, para la dureza magnésica, se logró determinar que el descenso en la concentración fue significativo, tanto que, en las tres tuberías se consiguieron los mismos valores, teniendo como valor inicial 160 mg/L y terminando al quinto minuto con 120 mg/L, afirmando que el tratamiento magnético tuvo mayor efectividad en la reducción de la dureza magnésica que la cálcica.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El tratamiento magnético tuvo efectividad en la reducción de la dureza total de 360 mg/L a 330 mg/L, enmarcada en la dureza magnésica (160 mg/L a 120 mg/L) que fue más notoria que la cálcica (200 mg/L a 207mg/L **promedio**), que incluso aumentó, de acuerdo a los análisis de laboratorio.
- En el tiempo de recirculación utilizado en las pruebas, el material de las tuberías (aluminio, cobre y PVC), no tuvieron mayor influencia en cuanto a la reducción de la dureza del agua.
- El aumento de la temperatura y del pH del agua utilizada en los tratamientos, fue debido a la agitación del agua en la recirculación de la misma.
- La hipótesis planteada al inicio de la investigación es rechazada, debido a que la tubería de cobre no obtuvo mayor eficiencia en la reducción de concentraciones de calcio y magnesio en comparación con las tuberías de aluminio y PVC, los tres tratamientos resultaron eficientes en la reducción de las durezas.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para una mayor eficiencia en la reducción de la dureza, la recirculación del agua debe tener mayor tiempo pasando por la tecnología magnética.
- Se puede implementar una cadena de imanes, incluso con mayor campo magnético, para aguas utilizadas directamente sin recirculación.
- Complementar la tecnología magnética utilizando técnicas de autoinducción o electromagnetismo para aumentar el poder del campo magnético, incrementando la eficiencia de la tecnología.

BIBLIOGRAFÍA

- Alimi, F., Tilli, M., Ben, M., Maurin, G. y Gabrielli, C. 2009. Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 1327-1332.
- Anselme, C. 1998. Tratamiento del agua por procesos de membrana, Principios, procesos y aplicaciones. Madrid: Edit. McGrawHill. .
- Aveiga, V. 2012. ¿Cómo hacer investigación científica? Manabí.
- Berlín, M. 2015. Efecto del campo magnético sobre la formación de incrustación en sistemas de conducción de agua. México: IMTA.
- Castro, H. y Gámez, C. 2009. EVALUACIÓN DE LA DEPOSITACIÓN DE INCRUSTACIONES EN SISTEMAS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE DEL CAMPO CANTAGALLO. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
- Cefalas, A., Kobe, S., Dražić, G., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Stražišar, J. y Meden, A. 2008. Nanocrystallization of CaCO₃ at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. *Applied Surface Science* (254), 6715-6724.
- Clifford, Y., Chi-Kao, W. y Meng-Chun, C. 2008. Effects of magnetic field on the crystallization of CaCO₃ using permanent magnets. *Chemical Engineering Science* (63), 5606-5612.
- Coe, J. y Cass, S. 2000. Tratamiento magnético en aguas duras. *Journal of Magnetism and Magnetic* (209). Del Toro, R. y Berenguer, A. 2001. Actualidad internacional del tratamiento magnético para el control de incrustaciones. *Revisión Tecnología Química*, 21(2), 16-25.
- Dobersek, D. y Goricanec, D. 2014. An experimentally evaluated magnetic device's efficiency for waterscale reduction on electric heaters. *Energy*, 77, 271-278.
- Espinoza, C. 2005. Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento. Chile.
- Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G., & Mohamed, B. 2006. Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate. *Water Research*, 40(10), 1941-1950.
- Fernández, A. 2012. El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147-170.

- Fernández, J. y Vargas, A. 2001. Evaluación de Incrustaciones en líneas de producción de los campos morichal, la Gloria Norte y la Gloria, empresa Perenco LTDA. Colombia: Universidad industrial de Santander.
- Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G. y Keddam, M. 2001. Magnetic wáter treatment for scale prevention. *Water Research*, 35(13), 3249-3259.
- Gálvez, C. 2010. Uso del desincrustante magnético (DM) para mejorar la calidad del agua en la industria. *Ingeniería Industrial* (28), 139-154.
- Guanipa, M. 2011. Investigación cuantitativa y cualitativa: interdependencia del método. *Revista científica de HECS*, 6(11), 1-5.
- Guerra, F., Struck, A. y Villalobos, S. 2008. Practica 6: Ablandamiento por intercambio iónico. México: Universidad Iberoamericana.
- INIAP. 1983. ESTADO ACTUAL DE LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS DEDICADOS AL CULTIVO DEL CAFE EN LA PROVINCIA DE MANABI. Ecuador: INIAP.
- Instituto Nacional de Higiene Epidemiológica y Microbiología. 1992. Agua y Salud. La Habana, Cuba: Editorial Ciencias Médicas.
- Kemmer, F. y McCallion, J. 1989. Manual del Agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. McGraw-Hill.
- Klely, G. 1999. Ingeniería ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. España: Mc Graw Hill.
- Kobe, S., Drazic, G., Cefalas, A., Sarantopoulou, E. y Stražišar, J. 2002. Nucleation and crystallization of CaCO₃ in applied magnetic fields. *Materials Science and Engineering*, 5, 243.
- López, A. 2010. Reporte del análisis químico y cristalográfico de depósitos calcáreos en tanques de termas eléctricas de la empresa. Lima: Instituto Peruano de Energía Nuclear.
- Lorenzo, M. 2011. PREDICCIÓN Y CONTROL DE INCRUSTACIONES MINERALES EN POZOS PETROLEROS. México: ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA UNIDAD TICOMÁN.
- Medina, M., Mussaret, M., Real, E. y Orozco, S. 2002. Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria. *Salud Pública de México*, 44(6).
- Meng-Chun, C. y Clifford, Y. 2010. Effect of the magnetic field on the growth rate of aragonite and the precipitation of CaCO₃. *Chemical Engineering Journal* (164), 1-9.

- Ministerio de Salud Público. 2008. Respuesta del MSP frente a inundaciones. PAHO.
- Monraval, I. y Grau, S. 2003. Descalcificación. AQUASALUD.
- Mora, D. y Alfaro, N. 1999. Caracterización y distribución por cantones de la dureza del agua en las fuentes utilizadas para consumo humano en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 8(15).
- NALCO CHEMICAL COMPANY. 1982. Manual del Agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Ed. Mc Graw-Hill.
- Nalco, D. 2009. Cooling Water Treatment. *Bulletin*, 34, 1-28.
- Neira, M. 2006. DUREZA EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO Y USO INDUSTRIAL, IMPACTOS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN. ESTUDIO DE CASO: CHILE. Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Parsons, S. 1999. Overall of recent magnetic treatment research at Cranfield University. UK: Cranfield University.
- Pulido, M. 2015. Métodos y técnicas de investigación científica. *Revista científica Opción*, 31(1), 1137-1156.
- Quinn, C; Molden, T; & Sanderson, C. 1997. Magnetic treatment of water prevents mineral build-up. *Iron and steel Engineer*, 74, 47-52.
- Revista de Logística. 2015. Tuberías: de la resistencia del metal hasta la flexibilidad del plástico. Colombia.
- Roback, R., Johnson, T., Mcling, T., Murell, M., Luo, S., & Ku, T. (2001). Uranium isotopic evidence for groundwater chemical evolution and flow patterns in the eastern Snake River Plain Aquifer, Idaho. *Geological Society of America Bulletin*, 113(9), 1133-1141.
- Rodríguez, J. 2009. Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto. *Revista Pensamiento Actual*, 9, 12-13.
- Rodríguez, S. 2010. La dureza del agua. Argentina: ATN.
- Salman, M., Safar, M. y Nuwaibit, G. 2015. The Effect of Magnetic Treatment on Retarding Scaling Deposition. *The Online Journal of Science and Technology*, 5(3), 1-16.

- Sarabia, I., Cisneros, R., Aceves, J., Durán, H. y Castro, J. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valle de San Luis Potosí, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(2).
- Sengupta, P. 2013. Impactos potenciales en la salud del agua dura. *Revista Internacional de Medicina Preventiva*. Vol. 4. EU. (En línea). Consultado, 30 de oct. 2017. Disponible en: www.ncbi.nlm.nih.gov
- SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación). 2013. Evaluación del Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017.
- Soto, J. 2010. La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2).
- Vaca, S. 2014. Aplicación de un campo magnético ortogonal al flujo en sistemas de agua para reducir la formación de incrustaciones. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Valencia, F. y Tarache, E. 1992. Inhibición de incrustaciones en dos campos petroleros. Bucaramanga: Universidad de América.
- Valenzuela, T. 2004. Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del. Puebla: Universidad de las Américas.
- Vitoria, I. 2002. Calcio en el agua de bebida en la infancia: ¿molesto o necesario? *Acta Pediátrica*, 60., 99-109.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2004. Guidelines for drinking-water quality. Geneva.
- Zavaleta, M. y Varela, A. 1998. Efecto de Campo magnético en el tratamiento de aguas Duras. *Tecnia*, 8(1), 69-76.
- Zlotopolski, V. 2017. The Impact of magnetic water treatment on salt distribution in a large unsaturated soil column. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(4), 253-257.

ANEXOS



Anexo 1. Prototipo del sistema magnético con tubería de PVC.



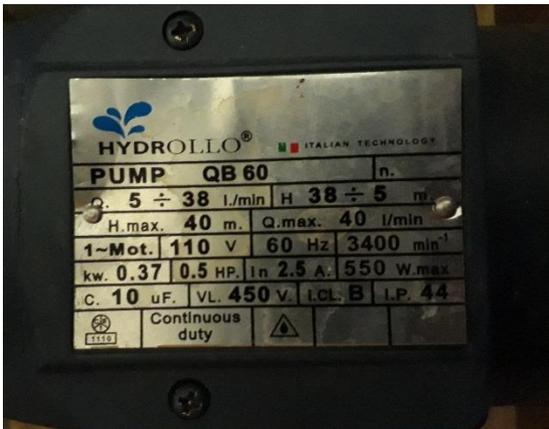
Anexo 2. Prototipo del sistema magnético con tubería de aluminio.



Anexo 3. Prototipo del sistema magnético con tubería de cobre.



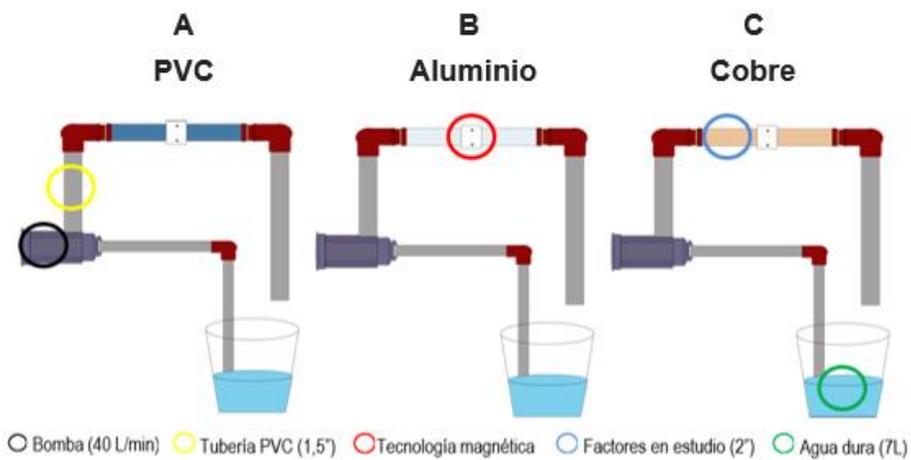
Anexo 4. Análisis de los diferentes tratamientos estudiados.



Anexo 5. Características de la bomba utilizada en la recirculación.



Anexo 6. Características de la bomba utilizada en la recirculación.



Anexo 7. Esquema del sistema de recirculación con los tres diferentes tubos con la tecnología magnética.



LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y SUELOS

Calceta, 24 de agosto del 2018

CERTIFICACIÓN

Por medio de la presente certifico que el egresado de la carrera de ingeniería ambiental, **VERA SALTOS RONALD DONALD** realizó análisis físicos (dureza total, dureza cálcica y magnésica, pH y temperatura) para ejecutar la tesis: **EVALUACIÓN DE TRES TIPOS DE TUBERÍAS USADAS EN TRATAMIENTO MAGNÉTICO PARA REDUCCIÓN DE CONCENTRACIONES DE CALCIO Y MAGNESIO EN AGUAS DURAS.**

Análisis que se realizaron bajo la supervisión del personal técnico del laboratorio, desempeñándose de forma satisfactoria.

Particular que me suscribe a usted para los fines legales pertinentes.

Adjunto reporte de resultados

Atentamente


ING. FABIÁN PENARRIETA MACÍAS
TÉCNICO





ESPAMMFL

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL Y SUELOS

Tratamiento	Alcalinidad		Dureza total mg/l	Dureza cálcica mg/l	Dureza magnésica mg/l	pH	Temperatura °C
	Carbonatos	mg/l					
TA	Ausencia	30	360	200	160	7,66	25,9
T1	Presencia	30	330	200	130	7,82	26
T2	Presencia	30	330	210	120	7,95	26,2
T3	Presencia	30	330	210	120	8,04	26,4
T4	Presencia	30	330	210	120	8,12	26,6
T5	Presencia	30	340	220	120	8,14	26,7

Tratamiento	Alcalinidad		Dureza total mg/l	Dureza cálcica mg/l	Dureza magnésica mg/l	pH	Temperatura °C
	Carbonatos	mg/l					
TC	Ausencia	30	360	200	160	7,41	27,4
T6	Presencia	30	310	180	130	7,49	27,5
T7	Presencia	30	340	220	120	7,63	27,7
T8	Presencia	30	340	210	120	7,75	27,9
T9	Presencia	40	330	190	120	7,86	27,9
T10	Presencia	30	330	210	120	7,94	28,1

Tratamiento	Alcalinidad		Dureza total mg/l	Dureza cálcica mg/l	Dureza magnésica mg/l	pH	Temperatura °C
	Carbonatos	mg/l					
TP	Ausencia	30	360	200	160	7,24	27,3
T11	Presencia	40	330	190	130	7,45	27,3
T12	Presencia	30	330	210	120	7,6	27,3
T13	Presencia	30	330	200	120	7,72	27,5
T14	Presencia	30	330	200	120	7,83	27,6
T15	Presencia	30	330	220	120	7,89	27,7


ING. FABIAN PENARRIETA MACIAS
TÉCNICO



Anexo 9. Cuadros de resultados de análisis de laboratorio.