

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA**



PROPUESTA DE ELABORACION DE UN FILTRO PARA EL TRATAMIENTO  
DE BORO EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA GEO  
AHUACHAPAN.

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR

CARLOS ROBERTO LOPEZ VALLE

OMAR STANLEY REYES CASTANEDA.

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

LICENCIATURA EN QUIMICA Y FARMACIA

FEBRERO 2012

SAN SALVADOR, EL SALVADOR, CENTRO AMERICA.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR**

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO.

**SECRETARIA GENERAL**

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

**FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA**

**DECANA**

LICDA. ANABEL DE LOURDES AYALA DE SORIANO

**SECRETARIO**

LIC. FRANCISCO REMBERTO MIXCO LOPEZ

## **COMITE DE TRABAJO DE GRADUACION**

### **COORDINADORA GENERAL**

Licda. María concepción Odette Rauda Acevedo

### **ASESORA DE AREA DE ANALISIS DE ALIMENTOS: FISICOQUIMICO**

Ing. Rina Lavinia Hidalgo de Medrano.

### **ASESORA DE AREA DE GESTION AMBIENTAL: TOXICOLOGIA Y QUIMICA LEGAL**

Licda. María Luisa Ortiz de López.

### **DOCENTE DIRECTOR**

Msc. Cecilia Haydeé Gallardo de Velásquez.

Ing. Harold Benedicto Cartagena Alas.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco en gran manera al laboratorio de agua de la Geo Ahuachapán, por todo su apoyo, confianza, tiempo, recursos económicos, materiales y de personal; agradezco inmensamente al Sr. Mario Echegoyen y Feliciano Gonzales (Chanito); quienes colaboraron arduamente con el trabajo de tesis; al Ing. Harold Cartagena, quien nos tendió la mano cuando lo necesitamos juntamente con la dirección general de La Geo.

Agradezco inmensamente a nuestros asesores: Msc. Cecilia Gallardo, Ing. Harold Cartagena, quienes tuvieron paciencia ante nuestro errores y fueron faro de guía durante todo este tiempo que trabajamos con ellos, gracias..!! Por confiar y apoyarnos en todo momento. Que Dios les bendiga grandemente.

Agradezco también a la Universidad de El Salvador, la Facultad Multidisciplinaria de Occidente (Lic. Chepito Caballero y Lic. María Elena (Q.D.D.G.)) y Facultad de Química y Farmacia por todo el conocimiento que me brindaron; al jurado calificador: Lic. Odette, Lic. María Luisa, Ing. Lavinia, quienes estuvieron ahí para corregir y guiarnos durante este periodo tan importante.

A mi compañero de tesis por aguantarnos en los problemas y dificultades, a mi familia, todos aquellos quienes me brindaron todo su apoyo en todo momento.

Omar Stanley Reyes Castaneda.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco al Señor Jesucristo por su ayuda y por la oportunidad que me da de alcanzar una de mis mayores metas.

A mis Padres Virginia de López y Carlos López por sus oraciones y apoyo incondicional por que a pesar de las vicisitudes que la vida presenta jamás dejaron de animarme y apoyarme emocionalmente y económicamente. A mis pastores Jose Rodolfo Castellanos y Sonia de Castellanos porque en los momentos, que he estado a punto de desfallecer siempre han tenido una palabra de parte de Dios a mi vida, que me impulsado a seguir adelante.

A mis maestros que supieron trasmitirme todo su conocimiento y darme herramientas para defenderme en la vida. A mis asesores de tesis Msc. Cecilia Haydee Gallardo de Velásquez e Ing. Harold Benedicto Cartagena Alas por sus consejos y tomarse el tiempo de corregir este trabajo. Al jurado calificador Licda. Odette Rauda, Licda Maria Luisa Ortiz e Ing. Lavinia de Medrano Dios les bendiga siempre.

A mis queridos amigos y hermanos Eduardo Serrano, Emiliano Viera, Estela Amaya, Maria Elena Castaneda, Lilian Euseda y Lesly Ortiz por que con su forma de ser y a su manera cada uno de ellas me ha dado palabras de ánimo en los momentos que lo he necesitado

Carlos Roberto López Valles

## DEDICATORIA.

Dedico este trabajo a mi Dios Todopoderoso y Salvador, quien me guio con su mano de sabiduría en los momentos más difíciles de mi vida, porque hoy puedo decir: "Esto es de Dios (E.E.D.)", gracias Padre Celestial este es nuestro triunfo más grande y la coronación de una etapa importante en mi vida.

Este trabajo también es para mis padres, mi viejito Luis Reyes, mi madrecita linda Elita, quienes siempre tuvieron palabras de aliento, para mí durante todo el tiempo; nunca se rindieron, sin importar que tan difícil estuviese todo, dándome amor y aliento para jamás rendirme. Gracias mis viejitos lindos, que Dios me los bendiga.

A mis abuelitos lindos quienes siempre tuvieron y tienen sus pensamientos y apoyo para mí, ¡¡¡gracias!!! Agradezco a Dios el tenerles con migo, son un gran regalo, a mi hermana Yensi, gracias; a mis otros Hermanos Edgardo e Iris.

Finalmente lo dedico a las personas amadas, para quienes solo pensar en sus nombres me hacen inmensamente feliz.

Omar Stanley Reyes Castaneda.

## DEDICATORIA.

Dedico este trabajo de graduación al único y sabio Dios Nuestro Señor y Salvador Jesucristo ya que sin su bendición, ayuda, dirección y sabio consejo no hubiera podido llegar hasta el final:

Bendice, alma mía, a Jehová,

Y no olvides ninguno de sus beneficios.

El es quien perdona todas tus iniquidades,

El que sana todas tus dolencias;

El que rescata del hoyo tu vida,

El que te corona de favores y misericordias;

El que sacia de bien tu boca

De modo que te rejuvenezcas como el águila.

Benedicid a Jehová, vosotras todas sus obras,

En todos los lugares de su señorío.

Bendice, alma mía, a Jehová.

Carlos Roberto López Valle.

## INDICE GENERAL

	Página
Resumen	
Capítulo I	
1.0 Introducción	xviii
Capítulo II	20
2.0 Objetivos	21
Capítulo III	22
3.0 Marco Teórico	23
3.1 Agua	23
3.1.1 Generalidades	23
3.1.1.1 Tipos de aguas	23
3.1.1.2 Parámetros de calidad del agua	24
3.1.2 Contaminación del agua	26
3.1.2.1 Impactos de la contaminación del agua	26
3.1.2.2 Fuentes de contaminación del agua en El Salvador	27
3.2 Aguas residual	28
3.2.1 Concepto	28
3.2.2 Características de las aguas residuales	29
3.2.3 Tipos de contaminantes de las aguas	32
3.3 Boro	34
3.3.1 Generalidades físico-químicas del boro	34
3.3.2 Efectos del boro	34
3.3.2.1 Efectos del boro en el medio ambiente	35
3.3.2.1.1 Fauna	35
3.3.2.1.2 Flora	36
3.3.2.2 Efectos en la salud humana	37
3.3.3 Origen de la contaminación del agua por boro	37

3.3.3.1 Intrusión marina	38
3.3.3.2 Generación de energía geotérmica	39
3.3.4 Métodos de análisis (cuantificación y cualificación) del boro	43
3.3.5 Métodos de remoción del boro	47
3.3.6 Método propuesto para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de boro, proveniente de la Geo Ahuachapán	49
3.4 Filtro piedra volcánica-carbón activado	50
3.4.1 Proceso de elección del material para filtro	50
3.4.2 Componentes para filtro	50
3.4.3 Propiedades del carbón activado	51
3.4.4 Propiedades de piedra volcánica	51
3.4.4.1 Rocas magmáticas o ígneas	51
3.4.4.2 Rocas sedimentarias	53
3.4.4.3 Rocas metamórficas	53
3.4.5 Proceso de elaboración del filtro	54
3.4.5.1 Preparación de los materiales	53
3.4.5.2 Empaquetado de los componentes	55
3.4.5.3 Conformación del filtro	55
Capítulo IV	56
4.0 Diseño Metodológico	57
4.1 Tipo de estudio.	57
4.2 Investigación bibliográfica.	57
4.3 Universo.	58
4.4 Muestra.	58
4.5 Muestreo.	58
4.6 Diseño muestral.	58
4.7 Parte experimental.	59
Capitulo V	63

5.0 Resultados	64
Capítulo VI	78
6.0 Conclusiones	79
Capítulo VII	82
7.0 Recomendaciones	83
Bibliografía	
Glosario	
Anexos	

## INDICE DE ANEXOS

### ANEXO N°

1. Algunos tipos de agua conocidos; clasificación dada dependiendo de su Origen, uso y/o características
2. Criterios de análisis para aguas residuales de tipo especial(recopilación referida al boro)
3. parámetros químicos para agua de consumo humano según la normativa Salvadoreña
4. Parámetros sobre niveles de sustancias químicas presentes en agua de consumo humano dados por la OMS
5. Concentración de sustancias extrañas en ppm o en %
6. Categorización de cultivos por su resistencia al boro soluble en relación a disminución de la cosecha
7. Proceso completo de producción de energía eléctrica, usando energía geotérmica
8. Diagrama de flujo de aguas residuales
9. Dimensiones promedio en milímetros de los componentes del filtro
10. Conformación de filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado
11. Proceso esquematizado de método de análisis de boro Merck KGAA 64271
12. Muestras recolectadas durante un día de análisis
13. Datos totales de análisis diario de agua residual tratada en el filtro de piedra volcánica-carbón activado en un periodo de cuatro meses.
14. Clico del agua

## INDICE DE TABLAS

TABLA N°		Página
1	Algunos tipos de agua conocidos; clasificación dada dependiendo de su Origen, uso y/o características	98
2	Criterios de análisis para aguas residuales de tipo especial(recopilación referida al boro)	100
3	Algunos parámetros químicos para agua de consumo humano según la normativa Salvadoreña	100
4	Parámetros sobre niveles de sustancias químicas presentes en agua de consumo humano dados por la OMS	101
5	Concentración de sustancias extrañas en ppm o en %	101
6	Categorización de cultivos por su resistencia al boro soluble en relación a disminución de la cosecha	102
7	Dimensiones preliminares promedio en milímetros de los componentes del filtro	104
8	Dimensiones promedio en milímetros de los componentes del filtro	66
9	Resumen de contenido de boro promedio en ppm durante cuatro meses	69
10	Contenido de boro (ppm) tratado contra valor de la Norma NSO 13.49.01:09	71
11	Porcentaje de retención del filtro	75
12	Datos totales de análisis diario de agua residual tratada en el filtro de piedra volcánica-carbón activado en un periodo de cuatro meses	108

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA N°		Página
1	Identificación de la muestra de análisis recolectada.	59
2	Método de análisis de boro Merck KGAA 64271	61
3	Conformación y especificaciones de secciones A y B del filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado.	65
4	Componentes del filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado.	65
5	Proceso completo de producción de energía eléctrica, usando energía geotérmica	102
6	Diagrama de flujo de aguas residuales	103
7	Conformación de filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado	104
8	Proceso esquematizado de método de análisis de boro Merck KGAA 64271	105
9	Muestras recolectadas durante un día de análisis	106
10	Clico del agua	116
11	Tendencia total del boro en el tratamiento	72
12	Tiempo de vida media del filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado	76

## **RESUMEN**

## RESUMEN

El ácido bórico y sus derivados se utilizan en numerosas actividades industriales, de tal manera que las aguas residuales procedentes de vertidos industriales como lo es la industria geotérmica constituyen una de las fuentes de mayor contaminación. Los compuestos borados en las aguas residuales no son retenidos por los procesos de tratamiento, esto por las características propias del elemento; por lo que son reintegrados al medio natural, aumentando la tendencia del boro a acumularse en los tejidos animales y vegetales constituyendo un riesgo potencial para la salud de aquellos que consuman alimentos y aguas con alto contenido de boro. Debido a la preocupación existente por la contaminación de boro, esta investigación propone un método, para el tratamiento de aguas residuales y las aguas de tipo especial que contienen contaminantes como, hierro, cinc, mercurio, boro, etc. El método que se propuso; es la elaboración de un filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado, para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la generación eléctrica de tipo geotérmica de la planta Ahuachapán.

El tratamiento se realizó, tomando agua residual de tipo geotérmica en el punto de descarga durante un periodo de cuatro meses, las cuales se realizaron tres veces al día; tomando una alícuota de 10.0 mL como control de contenido inicial y se procede a tratar la muestra, haciéndola pasar por el filtro; diseñado con una proporción de 1126.402g de piedra volcánica y 50.007g de carbón activado, el filtrado obtenido se analizó con el método Merck KGAA 64271 usando el

fotómetro Génesis 20, obteniendo como resultado una disminución del contenido de boro de 6.47 ppm a 2.22 ppm; comparando el resultado obtenido con el valor máximo permitido por la Norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09 de 1.5 ppm.

Se estableció la calidad físico química del agua tratada por el filtro de piedra volcánica-carbón activado, para demostrar la funcionalidad del método; comprobando que esta técnica podría convertirse en una alternativa para la eliminación del boro presente en el agua residual de tipo geotérmica, convirtiéndola en agua útil para riego y uso domestico.

La eliminación de boro no se logra con el filtro propuesto, debido a variables como: fluctuación del contenido de boro, tiempo de permanencia corta, relación de piedra volcánica y carbón activado baja, etc. Estas variables entre otras hacen que no se elimine el boro en mas de 65.1%; pero se establecen parámetros muy valiosos para futuras propuestas o investigaciones en donde sea posible la completa eliminación del boro.

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCION**

## 1.0 INTRODUCCION

En las fuentes acuáticas pueden encontrarse diferentes contaminantes que pueden ser de tipo físico, químico o biológico; muchos de ellos provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, domésticos, etc. Pueden ser tratados de diferentes maneras, aunque algunos de estos contaminantes pueden ser difíciles de remover, como el boro el cual es utilizado en numerosas actividades de la industria, por lo que aparece como un residuo contaminante en determinados vertidos industriales.

Debido a la contaminación de boro, se propuso un método de tratamiento para la eliminación de boro de aguas residuales, haciendo uso de piedra volcánica mezclada con carbón activado; con esta propuesta se trata de demostrar, si es o no funcional el uso de esta mezcla en la eliminación de boro del agua de condensado, proveniente de la generación de energía eléctrica de tipo geotérmica de la planta de Ahuachapán; la funcionalidad del método se determino tomando en cuenta diferentes factores como: 1) porcentaje de eliminación, 2) relación: cantidad de muestra-piedra volcánica, 3) tiempo de permanencia de muestra en el sistema de tratamiento. Estos factores determinaron si el tratamiento logra convertir, agua residual contaminada en agua útil para riego y uso domestico. La efectividad del método, se estableció en un periodo de cuatro meses (enero a abril del 2010), durante el cual se tomaron muestras de agua residual con un volumen de 1.0 L, almacenando la

muestra en frascos de polietileno a una temperatura de 4°C para preservar su integridad <sup>(6)</sup>; haciendo pasar la muestra por el filtro, fabricado en proporciones de 10% y 90% de carbón activado y piedra volcánica respectivamente estos porcentajes han sido realizados anteriormente por el Laboratorio de La Geo y la presente estudio; posterior a la filtración la muestra se analizo utilizando el método Merck KGAA 64271, los resultados obtenidos se compararon con la Norma Oficial Salvadoreña NSO 13.49.01:09 para aguas residuales. El proceso de investigación y análisis se llevo a cabo en las instalaciones del Laboratorio de La Geo Ahuachapán en un período de cuatro meses.

## **CAPITULO II**

### **OBJETIVOS**

## **2.0 OBJETIVOS.**

### **2.1. Objetivo General.**

Proponer la elaboración de un filtro para el tratamiento de boro en aguas residuales provenientes de La Geo Ahuachapán.

### **2.2. Objetivo Especifico.**

- 2.2.1** Diseñar un filtro a base de piedra volcánica y carbón activado, para el tratamiento de boro en agua residual.
- 2.2.2** Cuantificar el contenido de boro en agua residual sin tratamiento y posterior al tratamiento, proveniente de la generación de energía eléctrica de tipo geotérmica en la ciudad de Ahuachapán.
- 2.2.3** Comparar el contenido de boro del agua residual tratada, con la norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09 de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor.
- 2.2.4** Determinar la efectividad del filtro, en cuanto al porcentaje de retención de boro.
- 2.2.5** Establecer aproximadamente la vida media útil del filtro de piedra volcánica-carbón activado, usado para el tratamiento de boro de aguas residuales provenientes de la Geo.

**CAPITULO III**  
**MARCO TEORICO**

### **3.0. MARCO TEORICO**

#### **3.1 AGUA**

##### **3.1.1 GENERALIDADES**

###### **3.1.1.1 TIPOS DE AGUAS**

Existen diferentes tipos de agua, de acuerdo a su procedencia, uso y/o característica, es así que de acuerdo a su procedencia se encuentran las aguas subterráneas y superficiales.<sup>(34)(12)(32)(42)</sup>

###### **– AGUA SUBTERRANEA**

El agua subterránea es aquel recurso que se encuentra en el planeta confinada en el subsuelo. Por su buena calidad es un recurso ampliamente usado en el mundo, como agua potable, para riego o agua de dilución para fines industriales.

Este tipo de agua se extrae generalmente mediante pozos desde el subsuelo en donde esta llega por la infiltración de una parte del agua caída en forma de lluvia, la cual se acumula eventualmente sobre un lecho impermeable, saturando los espacios porosos del suelo y formando una zona saturada de agua. Así, los reservorios desde los cuales se puede extraer cantidades importantes de agua se denominan acuíferos. <sup>(34)(12)</sup>

###### **– AGUA SUPERFICIAL**

El agua superficial es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra. Estas masas de agua sobre la superficie de la tierra forma: ríos, lagos, lagunas, pantanos, charcas, humedales, y otros similares,

sean naturales o artificiales. El agua superficial es la proveniente de las precipitaciones, que no se infiltra ni regresa a la atmósfera por evaporación o la que proviene de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas.

El ciclo hidrológico muestra las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas y el constante movimiento del agua en el medio ambiente, La humedad de la superficie terrestre se evapora para formar nubes, que depositan precipitación sobre la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo. Esta humedad es absorbida por el suelo y se filtra hacia el subsuelo. Cuando la tasa de precipitación excede la de infiltración, tiene lugar el flujo sobre los terrenos y las convierte en ríos y depósitos que reciben las corrientes. El agua de las fuentes superficiales alcanzará su destino final en los océanos y en los lagos, donde el ciclo hidrológico comienza de nuevo el proceso de evaporación.

(1)(34)(12) Ver anexo N°1 y anexo 14. (1)(2)

### **3.1.1.2 PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA**

La calidad del agua potable es una cuestión que preocupa a todos los países tanto en desarrollo como desarrollados, por su repercusión en la salud de la población. La Organización Mundial de la Salud (OMS) reconoce cuatro factores de riesgo presentes en el agua de consumo humano, siendo estos: los agentes infecciosos, los productos químicos tóxicos, la contaminación radiológica y los aspectos relacionados a la aceptabilidad. Por lo que la

organización, ha establecido directrices que controlen la calidad del agua potable las cuales son el punto de referencia internacional para el establecimiento de estándares y seguridad del agua potable (Génova 1993). <sup>(37)</sup>

El agua pura como tal, no existe en la naturaleza dada su movilidad y su alto poder de disolución, el agua lleva en suspensión y/o solución muchas sustancias, durante la condensación y precipitación, la lluvia o la nieve absorben de la atmósfera cantidades variables de bióxido de carbono y otros gases, así como pequeñas cantidades de material orgánico e inorgánico. En su circulación por encima y a través de la corteza terrestre, el agua reacciona con los minerales del suelo y de las rocas siendo los principales componentes disueltos en el agua superficial y subterránea los sulfatos, cloruros, bicarbonatos de sodio y potasio, y los óxidos de calcio y magnesio, así mismo las aguas de la superficie suelen contener residuos domésticos e industriales, estos pueden encontrarse en forma molecular o iónica, siendo esta última la que tiene relevancia para el estudio sobre agua subterránea ya que por lo general, para aguas con menos de 1000 mg/L de sustancias disueltas, la mayoría de ellas se encuentran totalmente ionizadas. Las aguas subterráneas poco profundas pueden contener grandes cantidades de compuestos nitrogenados y clorados, derivados de desechos humanos y animales; generalmente las aguas de los pozos profundos sólo contienen minerales en disolución y casi todos los suministros de agua potable natural contienen fluoruros en cantidades variables.<sup>(38)(18)(16)(42)(6)</sup>.

### 3.1.2 CONTAMINACION DEL AGUA

La contaminación del agua a nivel mundial es un fenómeno social muy preocupante, ya que este es un recurso natural que después de ser contaminado requiere procesos exhaustivo de purificación. La contaminación del recurso hídrico puede darse de diferentes formas como: física, química y microbiológica.

- **FISICA:** Esta contaminación se produce por desechos sólidos como lo es la basura y otros desechos que se producen en los hogares o bien en la industria.
- **QUIMICA:** Proveniente mayormente de desechos diversos de la industria, en este caso puede ser de diferente tipo como: derivados aromáticos, solventes orgánicos, metales pesados, desechos de considerable radiación, metales acomplejados.
- **MICROBIOLOGICA:** La contaminación microbiológica se produce principalmente por la presencia de fenoles, bacterias, virus, protozoos, algas unicelulares.<sup>(8)(32)</sup>

#### 3.1.2.1 IMPACTOS DE LA CONTAMINACION DEL AGUA

Los impactos socioeconómicos de la contaminación del agua son variados. Aunque la información es escasa, existen indicadores que evidencian los impactos directos a la salud humana derivados de la contaminación del agua. El monitoreo realizado por el Programa de Vigilancia de la Calidad del Agua del

Ministerio de Salud, refleja que la calidad bacteriológica del agua potable tiende a mejorar. Según dicho Plan, en 1998 de 2,098 muestras a nivel nacional, el 13% resultó estar fuera de la norma, en tanto que para 1999, de 2,253 muestras, el 8.7% estuvo fuera de la norma. Sin embargo, departamentos costeros como Sonsonate, La Paz y Ahuachapán reflejaron un deterioro en la calidad del agua potable, como resultado de los efectos ocasionados por las inundaciones del huracán Mitch en 1998.<sup>(8)</sup>

### **3.1.2.2 FUENTES DE CONTAMINACION DEL AGUA.**

Los distintos estudios sobre la calidad del agua realizados en El Salvador indican que los desechos domésticos, industriales, agroindustriales y agrícolas son las principales fuentes de contaminación. En el caso de las aguas servidas domésticas, la poca cobertura de servicios de alcantarillado contribuye a la contaminación hídrica. Se estima que sólo entre 2% y 3% del caudal de aguas residuales recibe algún tipo de tratamiento previo antes de ser lanzadas a ríos o quebradas, según un estudio realizado por la OPS-UNICEF, en el año 2000, solo una cuarta parte de unas mil industrias grandes como: las de carnes, pescado, ingenios, beneficios de café y textiles, utilizaban procesos de tratamientos de aguas servidas, pero con procesos y tecnologías rudimentarias.<sup>(8)</sup>

Los desechos industriales, que en general se concentran en las principales zonas urbanas y periurbanas, se eliminaban de la siguiente manera: 69% eran

vertidos directamente a los desagües; 17% directamente a fuentes de agua como arroyos, ríos y al océano; y 10% se depositaba en los drenajes pluviales. Se estimaba que solo el 4% restante de los desechos industriales eran sometidos a procesos de tratamiento previo.<sup>(8)</sup>

La urbanización y el aumento de la población han incrementado la contaminación del agua, no sólo por los vertidos líquidos, sino también por la cantidad de desechos sólidos que se producen en los centros urbanos, ya que no se cuenta con procesos, métodos adecuados de tratamiento y disposición final a escala nacional.

Según un estudio de Análisis Sectorial de Residuos Sólidos realizado por el MSPAS en colaboración con la OPS/OMS, en el año de 1998, de los 262 municipios del país, solamente 132 cuentan con servicio de recolección de desechos sólidos. <sup>(8)</sup>

## **3.2 AGUAS RESIDUAL**

### **3.2.1 CONCEPTO**

El agua residual se puede caracterizar según su origen o tipo de contaminante por esto se tiene los siguientes conceptos.

– **Agua residual de tipo ordinaria:**

Son fluidos residuales en un sistema de alcantarillado que provienen del gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja, o la industria en general

y que además contiene materia orgánica e inorgánica disuelta o suspendida.(14)(6)

– **Agua residual de tipo especial:**

Agua residual generada por actividades agroindustriales, hospitalarias y toda aquella que no se consideran de tipo ordinaria. (14)(6)

### **3.2.2 CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.**

En general, las aguas residuales tienen dos componentes: una parte líquida y otra sólida, conocida como lodo. Típicamente existen dos formas generales de tratar las aguas residuales. Una de ellas consiste en dejar que las aguas residuales se asienten en el fondo de los estanques, permitiendo que el material sólido se deposite en el fondo. El segundo método consiste en utilizar la población bacteriana para degradar la materia orgánica. Este método, conocido como tratamiento de lodos activados, requiere el abastecimiento de oxígeno a los microbios de las aguas residuales para realizar su metabolismo.

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen:

- Pre tratamiento: Remoción física de objetos grandes.
- Deposición primaria: Sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
- Tratamiento secundario: Digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos.

- Tratamiento terciario: Tratamiento químico (por ejemplo precipitación, desinfección etc.).

### **Tecnologías de precipitación (coagulación y floculación).**

Estas tecnologías por lo general involucran sistemas de alimentación química sofisticados que a menudo se encuentran fuera del alcance tecnológico de los operadores de plantas de tratamiento de agua en las áreas más remotas. Mientras que, la filtración lenta con arena es utilizada más a menudo como una aplicación para agua potable, pero puede (bajo condiciones propicias) ser también utilizada para el control de aguas residuales, jugando un papel doble como un sistema de tratamiento biológicamente activo antes de alimentar las corrientes naturales de agua. Aún así, éstas también requieren un funcionamiento y mantenimiento cuidadoso. Las alternativas para las operaciones de tratamiento de aguas residuales hechas por el hombre involucran cierto número de tratamientos naturales. Los sistemas de desecho en sitio (fosas sépticas o pozos negros) ofrecen una opción viable para deshacerse de los residuos, al ser debidamente manejados. Además, el uso de lagunas de estabilización, sistemas de tratamiento de terrenos y sistemas acuáticos para el desecho de residuos son adecuados, al ser manejados apropiadamente. Las lagunas de estabilización son una alternativa de bajo costo para el tratamiento de corrientes de residuos, pero requieren vastas extensiones de terreno. Las aguas de alcantarillado al ser tratadas pueden ser aplicadas al terreno y utilizadas como una fuente de agua para los cultivos

agrícolas. Los sistemas de tratamiento acuático incluyen estanques o ciénagas con plantas que tienen la capacidad de tomar los contaminantes dañinos que se encuentran en las aguas negras. Estos sistemas pueden ser ciénagas naturales o artificiales. Aunque existe la tecnología para producir agua potable de los efluentes de aguas residuales tratadas, los efluentes de aguas residuales son utilizados de manera más eficiente como aguas de enfriamiento en aplicaciones industriales, riego (sembradillos, campos de golf y engramillados públicos etc.), aguas para recreo designadas solamente para un contacto corporal parcial y uso doméstico no potable (como el inodoro). El efluente de aguas residuales parcialmente tratadas también puede utilizarse para recargar los acuíferos subterráneos, donde el suelo actúa como filtro natural, eliminando los contaminantes. El lodo es un producto derivado del tratamiento de aguas residuales del cual es difícil deshacerse fácilmente. Los rellenos sanitarios, las desembocaduras a corta distancia de la costa y lagunas han servido de depósitos para deshacerse del lodo. El lodo puede ser tratado y utilizado para una variedad de propósitos. La digestión del lodo de alcantarillado puede producir gas metano, el cual es útil para la producción de calor y energía. El lodo también ha sido utilizado en los cultivos agrícolas y en terrenos forestales, añadiendo sustancias nutritivas a los suelos deficientes; también puede ser utilizado como abono para producir fertilizantes o puede ser horneado para fabricar ladrillos para construcción debido a esto en 1989, la OMS publicó las Guías sobre el Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura.

Estas guías han repercutido significativamente en la reutilización racional de aguas residuales y excretas en todos los países. Estas guías se encuentran en revisión periódica siendo publicada la última edición en el año 2007.<sup>(25)</sup>

### **3.2.3 TIPOS DE CONTAMINANTES DE LAS AGUAS**

Los riesgos para la salud asociados a los componentes químicos del agua de consumo humano se deben principalmente a la capacidad de dichas sustancias de producir efectos adversos sobre la salud tras periodos de exposición prolongados. Pocos componentes químicos del agua pueden ocasionar problemas de salud como resultado de una única exposición, excepto en el caso de una contaminación masiva accidental de una fuente de abastecimiento de agua de potable. Numerosos productos químicos pueden estar presentes en el agua; sin embargo, sólo unos pocos suponen un peligro inmediato para la salud en cualquier circunstancia determinada; así por ejemplo la exposición a concentraciones altas de fluoruro, de origen natural, puede generar manchas en los dientes y, en casos graves, fluorosis ósea incapacitante. De modo similar, el agua puede contener arsénico de origen natural y una exposición excesiva al mismo puede ocasionar un riesgo significativo de cáncer y lesiones cutáneas. Otras sustancias de origen natural, como el uranio y el selenio, pueden también ocasionar problemas de salud cuando su concentración es excesiva. La presencia de nitratos y nitritos en el agua se ha asociado con la metahemoglobinemia, sobre todo en lactantes alimentados con biberón. Sobre todo en zonas con aguas corrosivas o ácidas, la utilización de cañerías y

accesorios o soldaduras de plomo puede generar concentraciones altas de plomo, que ocasionan efectos neurológicos adversos.<sup>(24)</sup>

El boro es una sustancia natural que se encuentra en combinación con otros elementos formando compuestos llamados boratos. El boro como tal es insoluble en agua pero sus sales, es decir los boratos, suelen ser solubles en ella constituyendo una fuente de contaminación en determinado momento, más aún, si se toma en cuenta que muchas de estas sales son ampliamente utilizadas en distintas industria tales como: la producción de vidrio, también son usados como retardantes del fuego, en las industrias de acabados y curtimiento del cuero, en cosméticos, etc. Diferente estudios científicos han demostrado que una exposición breve a altas concentraciones de boro en aguas de consumo humano puede afectar el estómago, los intestinos, el hígado, los riñones y el cerebro, y eventualmente puede causar la muerte; no se sabe si el boro produce defectos de nacimiento en seres humanos pero la exposición oral de animales preñados a cantidades altas de boro (en forma de ácido bórico) produjo bajo peso de nacimiento, defectos de nacimiento, y retardo del desarrollo.

Otros estudios en animales demostraron que los órganos reproductivos de los machos, especialmente los testículos, son afectados por la ingestión breve o prolongada de altas cantidades de boro. En otro estudio en ratas y ratones a los que se administró de por vida ácido bórico en la dieta no se observó evidencia de cáncer. <sup>(41)</sup>

### **3.3 BORO**

#### **3.3.1 GENERALIDADES FISICO-QUIMICAS DEL BORO**

Elemento químico, B, número atómico 5, peso atómico 10.811. Tiene tres elementos de valencia y se comporta como no metal. Se clasifica como metaloide y es el único elemento no metálico con menos de cuatro electrones en la capa externa. El elemento libre se prepara en forma cristalina o amorfa. La forma cristalina es un sólido quebradizo, muy duro. Es de color negro azabache a gris plateado con brillo metálico. Una forma de boro cristalino es rojo brillante. La forma amorfa es menos densa que la cristalina y es un polvo que va del café castaño al negro. En los compuestos naturales, el boro se encuentra como una mezcla de dos isótopos estables, con pesos atómicos de 10 y 11.<sup>(19)(18) (24)</sup>

#### **3.3.2 EFECTOS DEL BORO**

El boro es un elemento que puede tener distintos efectos dependiendo de la concentración que se encuentre en el medio ambiente, por esto se debe tener control de su contenido en el aire, suelo y agua; el boro no puede ser destruido en el ambiente, solamente puede cambiar de forma, adherirse o separarse de partículas en el suelo, el sedimento y el agua. La presencia de boro puede afectar al medio ambiente y las personas, aún cuando la contaminación en el aire y suelos es baja, se debe tener un control estricto del mismo, pero la problemática de contaminación para el ambiente está en el agua, ya que las sales de boro que se introducen en este líquido no solo puede afectar al medio

ambiente y al hombre por su consumo directo, sino por contaminar plantas y dañar animales.<sup>(3)</sup>

### **3.3.2.1 EFECTOS DEL BORO EN EL MEDIO AMBIENTE**

El boro se encuentra en el medio ambiente como resultado de emisiones volcánicas, océanos (por evaporación), vapores geotérmicos y aguas de desecho de la industria que lo utiliza para la fabricación de productos que lo contienen (se usa en retardadores de llamas, curtido de cueros, cosméticos, materiales de fotografía, jabones y productos para el aseo y en combustibles de alta energía); ya en el medio ambiente puede dar efectos adversos para las plantas y los animales, pero se debe relacionar sus efectos con la concentración presente; a continuación se mencionan algunos efectos que se pueden dar al estar presente en concentraciones inapropiadas.<sup>(3)</sup>

#### **3.3.2.1.1 FAUNA**

Las distintas especies de animales presentan reacciones muy particulares al estar en contacto con el boro, por ejemplo: las bacterias son relativamente tolerantes al boro, al igual que las algas verdes y verde-azuladas de agua dulce, los protozoos son más sensibles al boro que las bacterias, invertebrados como los gusanos o los mejillones son menos sensibles al boro que las bacterias y los protozoos, los peces adultos son relativamente tolerantes al boro, no obstante, el boro puede ser más tóxico durante las primeras etapas de vida de ciertos peces.<sup>(15)</sup>

### **3.3.2.1.2 FLORA**

Este elemento tiene características muy peculiares en relación a las plantas, es la deficiencia de boro hace que éstas no se desarrollen adecuadamente y el exceso del mismo provoca un mal desarrollo; considerado como un inhibidor o regulador del crecimiento de las diferentes especies de plantas participando en el desarrollo y elongación celular, se debe considerar la concentración específica del elemento para el desarrollo óptimo o no de la planta, esto da como resultado la categorización de cultivos por su resistencia al boro soluble en relación a la disminución de la cosecha (ver Anexo N°6).

En las plantas el boro está involucrado en procesos como: transporte de azúcares a través de las membranas celulares, la síntesis e integridad estructural de la pared celular, el desarrollo y crecimiento de procesos reproductivos, el metabolismo de las plantas, así como en la estructura y funcionamiento de la membrana celular. El boro también presenta influencia en la transpiración, debido al control de la formación de almidón y azúcar; así como en la utilización del calcio, lo que sugiere una estrecha relación entre estos dos elementos.

Los micronutrientes pueden alcanzar niveles excesivos dentro de la planta y perjudicar su crecimiento y producción. Esta condición es particularmente importante en el caso del boro, cuya deficiencia o toxicidad pueden expresarse, en comparación con el resto de los nutrimentos esenciales, con mayor facilidad,

dado que el rango entre deficiencia y toxicidad es muy pequeño para el boro es muy pequeño.<sup>(33)</sup>

### **3.3.2.2 EFECTOS EN LA SALUD HUMANA**

La ingesta prolongada de boro (ingesta crónica de 8.8 mg B/Kg\*d), puede presentar problemas como: atrofia testicular, alteración de la espermatogénesis y disminución de la masa corporal. También se presentan efectos severos en la salud humana, al tener una exposición a concentraciones elevadas durante cortos lapsos de tiempo (ingesta de 30.0 g B/d) como lo son: daño en estómago, intestinos, hígado, riñones y el cerebro; eventualmente puede causar la muerte a la persona. Las exposiciones más leves a boro, menores a 0.1 ppm en agua, 0.00005 mg B/m<sup>3</sup> en el aire, 1.0 mg B/Kg\*d ingerido en alimentos; causa únicamente: irritación en ojos, garganta, dolores de estómago, entre otros.<sup>(4)(31)</sup>

Se debe tener siempre presente la concentración de boro nociva según el tipo de contacto que se tenga con el mismo, ya que los límites para producir una intoxicación son muy bajos.

### **3.3.3 ORIGEN DE LA CONTAMINACION DEL AGUA POR BORO**

La contaminación por boro a distintos recursos naturales tiene diversos orígenes, como lo son: procesos termales (altas concentraciones de boro en áreas geotermales con diferente tectónica, litología y régimen hidrológico ponen de manifiesto la relación de este elemento con procesos termales puesto que la temperatura controla la liberación por interacción agua-roca), depósitos en

ambientes muy salinos, lixiviación de diferentes arcillas (arcillas tipo illita o glauconita), intrusión marina en distintos mantos acuíferos y contaminación por diferentes industrias.<sup>(28)</sup>

Los diferentes tipos de contaminación de los recursos hídricos por boro, pueden hacer que el contenido de este elemento se eleve hasta rangos de concentración que van desde 1.3 ppm hasta 19.5 ppm (en algunos casos puede llegara hasta 76.5 ppm o más), dependiendo de el origen de la contaminación. Generalmente las concentraciones más altas de contaminación de tipo natural por boro provienen de intrusión marina y procesos geotermales; estos pueden ocurrir por contacto de mantos acuíferos con fumarolas, vertientes de aguas termales y aguas de condensado, producto de la explotación para suministro de energía eléctrica.<sup>(28)(17)</sup>

### **3.3.3.1 INTRUCION MARINA**

Haciendo mención rápida de este medio de contaminación de mantos acuíferos por boro, se debe mencionar que cuando se tienen aguas de tipos superficiales o subterráneas puede ocurrir la intrusión marina por medio de: filtración de agua oceánica o contacto de la misma por una bocana u otro que se conecte al mar; un contenido promedio de 4.5 ppm de boro en el agua oceánica, considera al boro como buen indicador de los procesos de intrusión marina aunque también pueden influir otros tipos de salinización presente en el entorno. Esta concentración promedio de 4.5 ppm de boro juntamente con otro foco de contaminación de boro, hace que el nivel de concentración de boro se eleve en

gran manera, esta razón hace que la intrusión marina sea de interés en la contaminación de los recursos hídricos.<sup>(28)(31)</sup>

### **3.3.3.2 GENERACION DE ENERGIA GEOTERMICA**

El agua residual producto del proceso de generación eléctrica, es muy abundante, aproximadamente 9000 m<sup>3</sup>/min. (Estimación de condensado producido por cada torre de enfriamiento en la Geo Ahuachapán), lo cual hace que el reciclaje de esta agua residual sea de relevante interés.<sup>(17)</sup>

La producción de energía eléctrica usando energía geotérmica es una alternativa actual a la creciente demanda mundial de energía para la vida cotidiana, pero en algunos casos no solo puede ser beneficiosa sino también perjudicial al medio ambiente por los diferentes residuos que se producen. Para decir que un proceso contamina, es necesario conocer como se produce este contaminante, por tanto es necesario entender el proceso de producción de energía eléctrica a través de la energía geotérmica y como este genera aguas residuales.<sup>(17)</sup>

El proceso de generación de energía eléctrica a través de la energía geotérmica, posee una serie de pasos que son necesarios mencionar para conocer el origen de la contaminación por boro, este proceso se da de la siguiente forma: extracción, separación ciclónica, colección de vapor, separación de humedad, generación, condensación de vapor, enfriamiento, reinyección a corteza. (Anexo N°7) <sup>(17)</sup>

El proceso de generación eléctrica para entender como se produce el agua residual y la contaminación por boro, que es interés para la presente investigación:

- Extracción

Se inicia con la excavación del pozo productor; teniendo ya lo que es el pozo se procede a introducir en las capas terrestres un capilar o tubo agujerado en la punta para que salga el fluido súper caliente (o mezcla bifásica) a la superficie, el cual a través de tuberías de acarreo se dirige al separador ciclónico.

- Separación ciclónica

En este punto del proceso se realiza un proceso, conocido como separación ciclónica. El separador ciclónico está compuesto de un cilindro vertical cerrado, en el interior del mismo se tiene instalado un tubo central.

El funcionamiento consiste en separar el vapor de la mezcla bifásica (47 kg/s en promedio) que entra en forma tangencial por la parte media del equipo que por efecto centrífugo y diferencia de densidades el vapor asciende e ingresa al tubo central por la parte superior y sale por la base del mismo hacia la línea de vapor. El agua desciende, se aloja en la parte inferior del separador y sale por la parte media inferior hacia un tanque de menor tamaño y luego hacia la línea de acarreo de agua separada.

- Colección de vapor

Dentro de la Planta geotérmica, se encuentran instalados cuatro colectores de vapor, los cuales están diseñados para coleccionar el vapor proveniente de las

líneas de acarreo de cada pozo. Tres de estos colectores poseen diseños similares constituidos por cilindros horizontales cerrados con capacidad de 53.8 m<sup>3</sup>. El tipo de vapor que reciben se denomina vapor de media presión, por lo que son llamados colectores de vapor de media presión. El otro tipo de colector posee una capacidad de 133 m<sup>3</sup> y recibe el vapor de baja presión, por lo cual se le denomina colector de baja presión; cada colector posee un silenciador.

- Separación de humedad

De los colectores, el fluido se conduce por una tubería de acero al carbono de 36 pulgadas de diámetro a los separadores de humedad. En la planta geotérmica existen tres de estos equipos que trabajan con vapor de media presión. La función de este equipo es separar la humedad que aún se encuentra presente en el vapor, a efecto de que el vapor que entra a la turbina sea lo más seco posible.

- Generación eléctrica

Al entrar el vapor ya separado de la humedad que posee naturalmente hace girar los rotores de las turbinas por acción de la fuerza de entrada, los rotores a la vez hacen que introducen generan movimiento dentro de un campo magnético el cual ayuda a generar energía eléctrica, pasando la energía mecánica producida por la entrada de vapor a energía eléctrica.

- Condensación de vapor

El vapor que sale de la turbina (vapor exhausto), es derivado en un solo paso hacia el condensador. En este equipo se realiza el cambio de fase de vapor a

líquido, por efecto de enfriamiento al entrar el fluido en contacto directo con agua a 20°C, que se inyecta en forma de rocío a través de unas boquillas. Este vapor condensado es llevado a las torres de enfriamiento para terminar de ser enfriado por efecto de caída y aireación en la torre y ayudar a enfriar otro vapor exhausto que entre al condensador. El vapor condensado se deriva a un estanque de concreto llamado pozo de bombas, el cual tiene una profundidad de 14 m y una base de 64 m<sup>2</sup>.

- Enfriamiento

Las aguas de condensado provenientes del pozo de bombas a una temperatura de 40°C son conducidas a la torre de enfriamiento, en la cual el agua cae desde una altura de 17 m hacia un sistema de cascadas y a su vez es enfriada con ventiladores mecánicos; el agua alcanza una temperatura de 20° C y luego es enviada por gravedad de nuevo al condensador para repetir el ciclo.

- Reinyección a corteza

Al inicio de la generación geotérmica, la reinyección de las aguas residuales no dio los resultados esperados, sin embargo se continuaron realizando estudios para establecer la factibilidad de esta alternativa. En el período de 1989-1992, en el cantón Chipilapa fueron perforados los pozos CH-9, CH-7 y CH-7BIS con fines de producción, sin embargo los resultados no fueron halagadores; estudios complementarios indicaron la factibilidad de utilizar dichos pozos como re inyectores.

Posteriormente se perforó el Pozo CH-10 (marzo-22-2005), para mejorar la capacidad de absorción del campo geotérmico de Chipilapa. Este nuevo sistema RTA, ha hecho posible hasta la fecha un buen manejo de las aguas separadas generadas en la Central Geotérmica de Ahuachapán, la cual al ser trasladada por canaleta hacia el mar generaba altos costos de mantenimiento y grandes impactos ambientales, con respecto a las aguas de condensado se cuenta con el recurso de control primario diseñado exclusivamente para la reinyección de las aguas que se producen diariamente en el proceso de Generación de Energía Eléctrica.(Anexo N°8)

Dentro de todo el proceso de reinyección de aguas residuales se ve el esfuerzo de evitar la contaminación ambiental y volver el recurso geotérmico energía renovable y limpia para el medio ambiente, pero surge el problema que los sistemas de reinyección no puede cubrir con la creciente producción de condensado, el cual contiene niveles de boro fuera de lo establecido por el ministerio de medio ambiente de El Salvador el cual es de 1.5 ppm.<sup>(17)(6)</sup> Ver anexo N°7.

#### **3.3.4 METODOS DE ANALISIS (CUANTIFICACION Y CUALIFICACION) DEL BORO**

La determinación del boro en aguas, desechos industriales y efluentes de aguas negras es importante desde el punto de vista de la agricultura y conservación de la fauna circundante. En exceso de 2.0 mg/L (ppm) es perjudicial para ciertas plantas existe evidencia que tanto plantas y animales se ven afectados,

en forma adversa por concentraciones tan bajas como 1.0 mg/L (y aun con menos en invernaderos comerciales).

Se pueden usar los siguientes métodos colorimétricos y titimétricos para la determinación del boro en aguas, aguas negras y desechos industriales.

**Selección del método:** El método del carmín **(A)** es adecuado para la cuantificación de concentraciones de boro en el ámbito de 1-10 mg/L, mientras que el método de la curcumina **(B)** es aplicable en el ámbito de 0.10-1.0 mg/L; el método de titulación potencio métrica **(C)** es útil para un contenido de boro en el ámbito de 0.10-5 mg/L, El método de fotométrico Merck KGAA 64271**(D)** es útil para la determinación de concentraciones de boro bajas desde 0.2 ppm hasta 10 ppm; la aplicación de estos métodos se puede ampliar por concentración o dilución de la muestra original.<sup>(2)</sup>

Los métodos colorimétricos ofrecen algunas ventajas sobre el método de titulación potencio métrica; se necesitan menores porciones alícuotas (1-25 mL), en contraste con el volumen de 250 mL necesario para el método de titulación, además de que el fosfato no interfiere en los métodos colorimétricos. Sin embargo, el método de la curcumina falla en presencia de cantidades de nitrógeno de nitratos que excedan de 20 mg/L. Por otra parte, el método potencio métrico es especialmente aplicable para aguas con alta concentración de boro, cuando es importante la exactitud.

Muestreo y almacenamiento: Las muestras se deben conservar en frascos de polietileno o en cristalería alcalirresistente, exenta de boro.

## **MÉTODO FOTOMÉTRICO (UTILIZADO POR LA GEO-AHUACHAPÁN) PARA LA CUANTIFICACIÓN DE BORO EN AGUAS (MÉTODO FOTOMÉTRICO MERCK KGAA 64271)<sup>(20)</sup>**

### **1. Discusión del método.**

- Principio: En solución acida los iones borato forman con un diol quelatos, que se extraen selectivamente. En el extracto se forma con curcumina un complejo rojo que se puede determinar fotométricamente.
- Interferencias: Después de probarse con soluciones de boro de concentraciones mínimas de hasta 0.0-0.2 ppm no presenta interferencias de las siguientes sustancias. (Ver anexo N°5)

### **2. Aparatos.**

- Fotómetro Génesis 20
- Pipeteadores de volumen autoajutable
- Celda de cuarzo de 10 mm

### **3. Reactivos.**

- Reactivo kit Merck KGAA 64271 conteniendo frascos B-1 hasta B-6
- Solución patrón estándar de boro 0.07 ppm: diluir de solución patrón Merck CertiPUR® 1000 ppm B necesario para preparar 1000 mL.

### **4. Procedimiento.**

- Preparar la muestra con dilución para facilitar la lectura (20-40°C)
- Tomar 5 mL de muestra y colocarla en un tubo de ensayo

- Añadir al tubo de ensayo con jeringa 1.0 mL y mezclar. El valor del pH debe ser inferior a 1.0. Comprobar con varillas indicadoras Acilit®. Si es necesario, ajustar el pH mediante adición gota a gota del reactivo B-1 KGAA 64271.
- Añadir cuidadosamente con jeringa 1.5 mL B-2 KGAA 64271, cerrar firmemente el tubo de ensayo y agitar vigorosamente durante 1 minuto. Atención ¡El reactivo contiene cloroformo! (Fase inferior (orgánica) = extracto)
- Extraer con pipeta 0.5 mL del extracto e introducir en el segundo tubo de ensayo.
- Introducir con jeringa 0.8 mL de reactivo B-3 KGAA 64271 en el segundo tubo de ensayo, cerrar firmemente y mezclar
- Agregar 4 gotas de reactivo B-4 KGAA 64271 y mezclar.
- Introducir 15 gotas de reactivo B-5 KGAA 64271 cuidadosamente en el segundo tubo de ensayo, cerrar firmemente y mezclar. Atención el reactivo contiene ácido sulfúrico.
- Dejar en reposo por 12 minutos (tiempo de reacción A).
- Introducir cuidadosamente 6.0 mL de reactivo B-6 KGAA 64271 y agitar
- Dejar en reposo 2 minutos (tiempo de reacción B), luego introducir la muestra de medición en una cubeta de 10 mm y medir en el fotómetro a longitud de onda de 550nm. (Ver Anexo N°11)

**Notas sobre la medición:**

- Debido a la dependencia de la reacción de color frente a la temperatura, la muestra y los reactivos deberían encontrarse a una temperatura de mínimo 20 °C.
- **Ciertos fotómetros exigen una muestra en blanco** (preparación como la muestra de medición, pero con agua destilada en lugar de la muestra).
- La muestra en blanco esta coloreada de rosa.
- Para la medición fotométrica las cubetas deben estar limpias.
- Si es necesario, limpiarlas con un paño seco y limpio.
- Las turbideces después de acabada la reacción dan como resultado valores falsamente elevados.
- El color de la solución de medición permanece estable como mínimo 60 minutos después de transcurrido el tiempo de reacción B antes indicado.

**3.3.5 METODOS DE REMOCION DEL BORO**

Existen diversas tecnologías a nivel internacional para el tratamiento de boro en diferentes tipos de aguas residuales, pero se debe considerar que nacionalmente no se toma como un contaminante importante por tanto el tratamiento de este es casi nulo a nivel de investigaciones. A continuación se presenta una serie de métodos de tratamiento de los cuales se mencionarán solo algunos ya que otros se encuentran aun en desarrollo y su mecanismo de acción esta aun indeterminado; mencionando solamente una breve reseña para

conocer que se puede hacer con el boro, siendo estos: electrocoagulación (CE), doble capa de hidróxido (DHL), precipitación química, intercambio iónico, osmosis inversa, absorción, extracción líquido-líquido y electrodiálisis.<sup>(19)(35)</sup>

#### – **ABSORCION CON CARBON ACTIVADO (CA)**

El carbón activado (CA) tiene amplias aplicaciones en el tratamiento de agua y la purificación de aguas subterráneas contaminadas. Sin embargo, CA no tiene alta capacidad de adsorción de boro, y la regeneración de CA saturada debe ser considerada. La regeneración puede ser llevada a cabo por la purga de CA a altas temperatura utilizando hidrógeno como la purga de gas a temperaturas de 175°C o más. Preferiblemente una temperatura dentro del rango de 175-200°C se usa, más preferiblemente, 175-185°C. La purga puede realizarse utilizando una corriente opuesta a la dirección del flujo utilizado para adsorción. Por lo tanto, el uso de CA para la eliminación de boro es costoso. Con el fin de mejorar la capacidad de adsorción de boro de solución acuosa, las modificaciones de CA de la impregnación con CA diversos compuestos han sido estudiadas. El uso de bario o de calcio como impregnantes conduce a una disminución de la cantidad de boro adsorbido. Sin embargo, la impregnación con ácido tartárico o cítrico en el carbón activado aumenta la adsorción de boro significativamente. Además, carbón activado impregnados con manitol resultó ser la más prometedora propuesta para la eliminación de boro en productos químicos de efluentes industriales que contiene 25-70 mg / L de boro. Se investigaron la adsorción de boro en carbón activado impregnados con

diferentes sustancias, como alúmina activada, dióxido de zirconio, y sílice aerosil; constató que la aplicación de la impregnantes aumenta la capacidad de adsorción de boro de carbón activado.<sup>(35)</sup>

### **3.3.6 METODO PROPUESTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON ALTO CONTENIDO DE BORO, PROVENIENTE DE LA GEO AHUACHAPAN**

El método propuesto para el tratamiento de boro en aguas residuales, producidas por La Geo Ahuachapán es la utilización de piedra volcánica, conjuntamente con carbón activado, se uso una proporción de 10% de carbón activado, que presenta el inconveniente de saturarse rápidamente. La relación de la cantidad de piedra por litro de agua residual, se determino en la parte experimental, la conformación del filtro se realizó en un cilindro de polietileno, usando estratos de piedra volcánica combinados con carbón activado; la piedra se clasifica de dos tipos: piedra volcánica triturada (con un tamaño de partícula grande) y piedra volcánica pulverizada y tamizada (con un tamaño de partícula pequeño); la división de estos estratos se realizó con una fibra de poliamida sintética colocada entre cada uno de los estratos, dejando un espacio de aproximadamente 10 cm. en la parte superior para que el agua en tratamiento se pueda acumular y fluir por el filtro por acción de la gravedad. Según análisis preliminares realizados por el laboratorio de La Geo Ahuachapán, la piedra volcánica presenta un grado favorable de retención en función del boro, pero la propuesta de la investigación es la utilización de piedra volcánica combinada con carbón activado; los resultados, condiciones de almacenamiento, tipo de

frasco para muestreo, volumen, fueron tomados basados en las disposiciones de la norma NSO 13.49.01:09, ver más detalle en Anexo N°2, 3, 4 <sup>(11)</sup>

### **3.4 FILTRO PIEDRA VOLCANICA-CARBON ACTIVADO**

Se utilizaron dos elementos que son: carbón activado y piedra volcánica; de los cuales uno de ellos no se ha usado previamente para el tratamiento de boro (piedra volcánica), siendo esto la propuesta de trabajo para el tratamiento de agua residual con alto contenido de boro; el resto de elementos usados para la conformación (divisiones de poliamida sintética y cilindro de plásticos).

#### **3.4.1 PROCESO DE ELECCION DEL MATERIAL PARA FILTRO**

Los materiales fueron elegidos por sus características absorbentes y adsorbentes, la capacidad por eliminar el boro; esto se verificó teóricamente y empíricamente. El carbón activado se conoce como un elemento que tiene una gran capacidad para eliminar, absorber, adsorber, neutralizar una inmensa cantidad de sustancias químicas; la piedra volcánica, se escogió debido a que se tienen pruebas previas en el laboratorio de La Geo Ahuachapán de ser un componente que elimina el boro; aun cuando no se tiene documentado estudios sobre el uso de piedra volcánica en la eliminación de algún contaminante.

#### **3.4.2 COMPONENTES PARA FILTRO**

Los componentes especificados para la elaboración del filtro piedra volcánica carbón activado son: envases para empacado de piedra y carbón activado (CA) de polietileno, separadores de etapas de carbón activado y piedra volcánica de

mallas de poliamida (paste) sintética, carbón activado en presentación granular, piedra volcánica de dos categorías: molida y pulverizada.

### **3.4.3 PROPIEDADES DEL CARBÓN ACTIVADO**

El carbón activado presenta características muy importantes, las cuales se detallan en el numeral 3.3.5 apartado absorción de carbón activado; la absorción con carbón activado demuestra la forma, como actúa adsorbiendo el boro, tanto como la posibilidad de ser regenerarlo por la industria geotérmica de generación eléctrica, por tener la facilidad de proporcionar flujos de agua o vapor a temperaturas elevadas; los cuales con algunas modificaciones previamente planeadas podría en un caso ayudar a regenerar el carbón activado (CA).

### **3.4.4 PROPIEDADES DE PIEDRA VOLCÁNICA**

Las piedras volcánicas, dependiendo del lugar de procedencia y del tipo de evento que la formó, presenta una serie de características como: morfología, composición, porcentaje de los diferentes minerales, permeabilidad, etc. (44)

#### **3.4.4.1 ROCAS MAGMÁTICAS O IGNEAS**

Se forman por la solidificación de un magma, una masa mineral fundida que incluyen gases volátiles disueltos. El proceso es lento, cuando ocurre en las profundidades de la corteza, o más rápido, si acaece en la superficie. El resultado en el primer caso son rocas intrusivas, formadas por cristales gruesos

y reconocibles, o rocas volcánicas, cuando el magma llega a la superficie, convertido en lava por desgasificación.<sup>(44)</sup>

Las rocas magmáticas intrusivas son las más abundantes, forman la totalidad del manto y las partes profundas de la corteza. Son las rocas primarias, el punto de partida para la existencia en la corteza de otras rocas.

Dependiendo de la composición del magma de partida, más o menos rico en sílice ( $\text{SiO}_2$ ), se clasifican en ultramáficas (o ultrabásicas), máficas, intermedias y siálicas o ácidas, siendo estas últimas las más ricas en sílice. En general son más ácidas las más superficiales.

Las estructuras originales de las rocas ígneas son los plutones - formas masivas originadas a gran profundidad- , los diques, constituidos en el subsuelo como rellenos de grietas, y coladas volcánicas, mantos de lava enfriada en la superficie. Un caso especial es el de los depósitos piroclásticos, formados por la caída de bombas, cenizas y otros materiales arrojados al aire por erupciones más o menos explosivas. Los conos volcánicos se forman con estos materiales, a veces alternando con coladas de lava solidificada (conos estratificados).<sup>(44)</sup>

#### **3.4.4.2 ROCAS SEDIMENTARIAS**

Se constituyen por diagénesis (compactación y cementación) de los sedimentos, materiales procedentes de la alteración en superficie de otras rocas, que posteriormente son transportados y depositados por el agua, el hielo y el viento, con ayuda de la gravedad o por precipitación desde disoluciones.

También se clasifican como sedimentarios los depósitos de materiales organógenos, formados por seres vivos, como los arrecifes de coral o los estratos de carbón. Las rocas sedimentarias son las que típicamente presentan fósiles, restos de seres vivos, aunque éstos pueden observarse también en algunas rocas metamórficas de origen sedimentario.

Las rocas sedimentarias se forman en las cuencas de sedimentación, las concavidades del terreno a donde los materiales arrastrados por la erosión son conducidos con ayuda de la gravedad.

Las estructuras originales de las rocas sedimentarias se llaman estratos, capas formadas por depósito, que constituyen formaciones a veces de gran potencia (espesor). Su etimología procede del latín- sedimentum y del griego- guarrum.<sup>(44)</sup>

#### **3.4.4.3 ROCAS METAMORFICAS**

Es considerada metamórfica cualquier roca que se ha producido por la evolución de otra anterior al quedar ésta sometida a un ambiente energéticamente muy distinto del de su formación, mucho más caliente o más frío, o a una presión muy diferente. Cuando esto ocurre la roca tiende a evolucionar hasta alcanzar características que la hagan estable bajo esas nuevas condiciones. Lo más común es el metamorfismo progresivo, el que se da cuando la roca es sometida a calor o presión mayores, aunque sin llegar a fundirse (porque entonces entramos en el terreno del magmatismo); pero

también existe un concepto de metamorfismo regresivo, cuando una roca evolucionada a gran profundidad (bajo condiciones de elevada temperatura y presión) pasa a encontrarse en la superficie, o cerca de ella, donde es inestable y evoluciona a poco que algún factor desencadene el proceso.

Las rocas metamórficas abundan en zonas profundas de la corteza, por encima del zócalo magmático. Tienden a distribuirse clasificadas en zonas, distintas por el grado de metamorfismo alcanzado, según la influencia del factor implicado. Por ejemplo, cuando la causa es el calor liberado por una bolsa de magma, las rocas forman una aureola con zonas concéntricas alrededor del plutón magmático. Muchas rocas metamórficas muestran los efectos de presiones dirigidas, que hacen evolucionar los minerales a otros laminares, y toman un aspecto hojoso. Ejemplos de rocas metamórficas, son las pizarras, los mármoles o las cuarcitas.<sup>(44)</sup>

### **3.4.5 PROCESO DE ELABORACION DEL FILTRO**

El filtro de carbón activado-piedra volcánica para el tratamiento de aguas residuales, procedentes de la industria de generación eléctrica de tipo geotérmica, se fabricó de la siguiente manera:

#### **3.4.5.1 PREPARACION DE LOS MATERIALES**

Los diferentes materiales se trataron iniciando con la meteorización de la piedra volcánica, se pasó por un tamiz separándola en piedra molida y pulverizada, se da un lavado con agua desmineralizada, con el fin de eliminar restos de suelo

donde se encontraba originalmente. Se pesa cuidadosamente las cantidades de piedra que se usarán (piedra molida y piedra pulverizada) y carbón activado, los cuales tiene dimensiones específicas (ver anexo N°9).

#### **3.4.5.2 EMPAQUETADO DE LOS COMPONENTES**

Los componentes ya pesados se proceden a dividir para el empaquetado del filtro, se toma una porción de piedra pulverizada y se coloca en el cilindro, luego se coloca una porción de carbón activado (CA), se coloca una porción de piedra molida; hasta casi llenar el cilindro dejando unos 6 u 8 cm de espacio sin llenar el cilindro para permitir que se aloje la muestra de agua, y así se completan dos cilindros, colocando entre cada porción una división de una fibra de poliamida sintética.

#### **3.4.5.3 CONFORMACION DEL FILTRO**

El filtro tiene una conformación espacial tal que un cilindro con la cantidad empacada queda exactamente sobre el otro aprovechando la fuerza normal de caída del agua, para que la muestra fluya dos cilindros empacados para aumentar el tiempo de permanencia de la muestra en el filtro y así mejorar la eliminación del boro. (Ver Anexo N°10)

**CAPITULO IV**  
**DISEÑO METODOLOGICO**

## **4.0 DISEÑO METODOLÓGICO.**

### **4.1 TIPO DE ESTUDIO.**

El tipo de estudio que se realizó en la presente investigación es de tipo transversal y experimental; estudio transversal cuando se analizan las variables simultáneamente en un determinado periodo de tiempo, estudio experimental cuando una investigación trata con la manipulación de variables para la determinación posterior del efecto, dando así una interpretación final de los resultados de laboratorio, lo cual conduce a conclusiones demostradas experimentalmente.

### **4.2 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

La investigación bibliográfica se ha llevado a cabo en:

- Biblioteca Central de la Universidad de El Salvador.
- Biblioteca de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador Dr. Benjamín Orosco.
- Biblioteca de La Facultad de Ingeniería de la Universidad de El Salvador.
- Biblioteca de La Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad de El Salvador.
- Biblioteca de la Universidad José Matías Delgado.
- Biblioteca de la Universidad Tecnológica y sitios de Internet.

### **4.3 UNIVERSO.**

El universo de análisis se encuentra constituido por toda el agua residual producida por la Geo Ahuachapán.

### **4.4 MUESTRA.**

La muestra se constituyo por un litro de agua residual recolectada en el punto de descarga de la Geo Ahuachapán, tres veces al día en un periodo de cuatro meses.

### **4.5 MUESTREO.**

El muestreo que se realizó fue de tipo no probabilístico, por tener mayor importancia el método de tratamiento de la muestra; en este caso el filtro a base de piedra volcánica y carbón activado. Tomando la muestra de la siguiente forma: se tomo en un frasco de polietileno previamente ambientado, un litro de agua residual proveniente del punto de descarga de la Geo, el periodo de muestreo se realizó en tres diferentes tiempos; por la mañana (8:00am-9:00 am), al medio día (1:00pm-2:00pm) y por la tarde (4:00pm-5:00pm), para determinar si existe una variación significativa en el contenido de boro inicial y comparar el porcentaje de eliminación en los diferentes tiempos y concentraciones. (Ver anexo N°13)

### **4.6 DISEÑO MUESTREAL.**

El muestreo utilizado fue: no probabilístico dirigido y puntual, ya que la muestra se elije sin considerar las bases de la probabilidad, sino fundamentándose en el juicio del investigador. (2)

#### 4.7 PARTE EXPERIMENTAL.

Para la elaboración del filtro de piedra volcánica-carbón activado, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se reduce la piedra volcánica a un tamaño en el cual la muestra tenga un contacto mínimo con la piedra volcánica, pero un tamaño adecuado para que no se lave al pasar la muestra por el filtro.
2. Para la reducción de la piedra volcánica se hace mediante la meteorización, separando el polvillo de la piedra pulverizada, luego se clasifica el tamaño de la piedra haciéndola pasar por un tamiz N°20; la piedra que se detenga en el tamiz, se considera como pulverizada, y la piedra que pase a través del tamiz se considerará como piedra molida.

##### – Identificación de la muestra.

La muestra recolectada de la descarga se identificaba con información útil para la investigación con la siguiente información, como se ve, en la siguiente Figura:

MUESTRA No	
HORA DE MUESTREO	
FECHA DE MUESTREO	
LUGAR DE MUESTREO	
OTROS	

Figura N°1: Identificación de la muestra de análisis recolectada.

##### – Recolección de la muestra

La muestra de agua residual fue recolectada en frascos de 1.0 Litro de polietileno, este frasco se ambientó tres veces con pequeñas porciones del

agua residual, se llenó hasta tener el volumen de un litro, cerrando inmediatamente y transportándola al laboratorio de aguas de La Geo Ahuachapán; este procedimiento se realizó tres veces al día: mañana (8:00 am-9:00 am), medio día (1:00 pm-2:00 pm) y tarde (4:00 pm-5:00 pm). Cuando fue necesario se almacenó a una temperatura de 4°C para su posterior análisis.

#### – **Tratamiento**

Se toma una alícuota de 10.0 mL de muestras sin tratamiento, se hace pasar por el filtro; tomando otra alícuota de 10.0 mL posterior al tratamiento, estas se diluyen a 50.0 mL con agua destilada, para poder cuantificar adecuadamente el boro con el equipo que posee el laboratorio de análisis de agua de La Geo Ahuachapán; con los resultados iniciales y finales al tratamiento, se determina: la cuantificación de boro en el agua residual, el diseño adecuado del filtro de piedra volcánica-carbón activado, efectividad del filtro piedra volcánica-carbón activado en cuanto al porcentaje de retención de boro y se establece el tiempo medio de vida útil del filtro de piedra volcánica-carbón activado.

#### – **Análisis<sup>(5)</sup>**

Después de realizar la dilución necesaria para el análisis, se procede a realizar la determinación de boro con el método fotométrico de análisis, usando el kit de laboratorio de determinación de boro, Merck KGAA 64271; el cual es utilizado por el laboratorio de análisis de aguas de la Geo Ahuachapán. <sup>(5)</sup> A continuación se muestra el proceso método en forma de esquema.(Ver figura N°2)

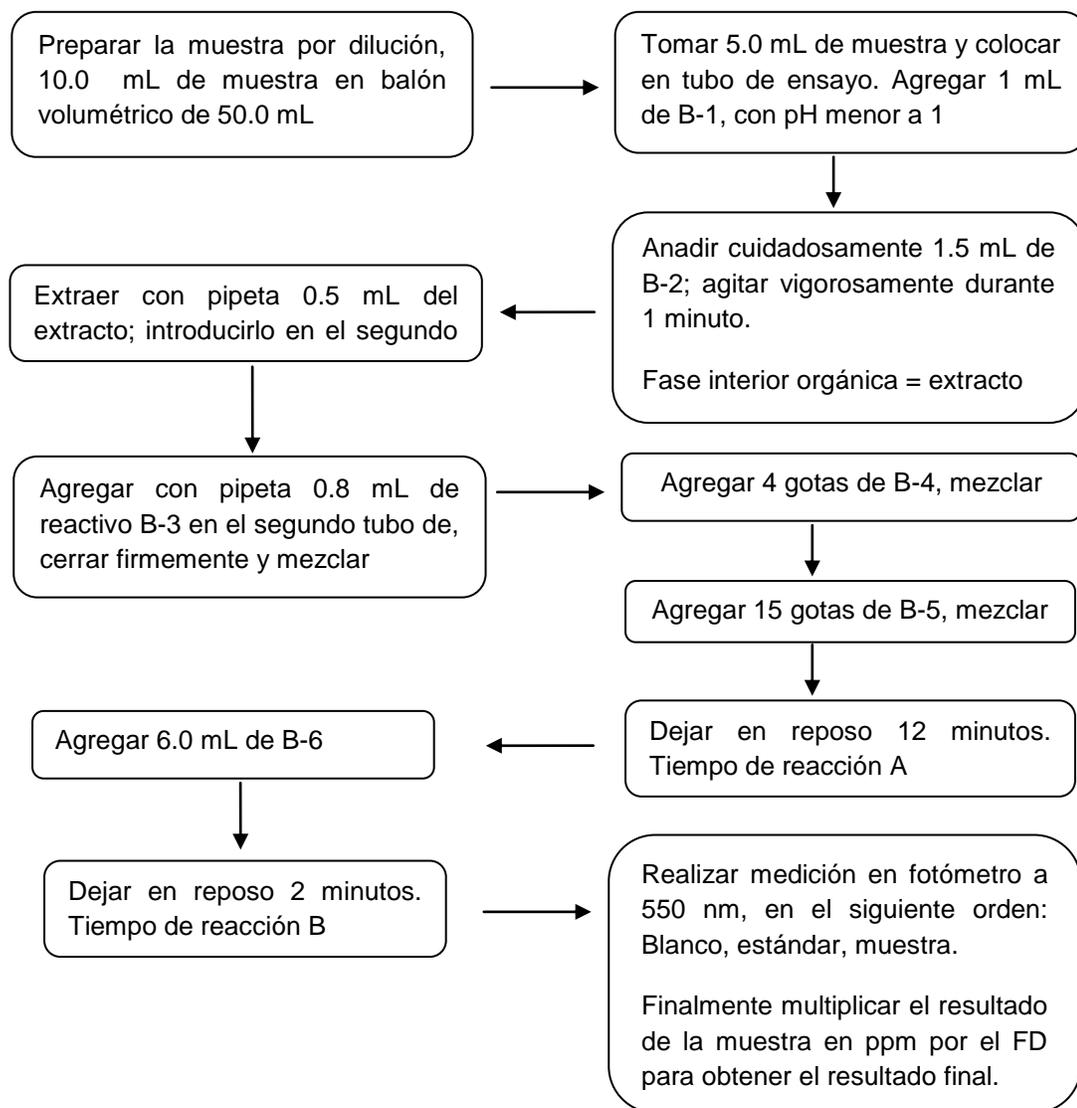


Figura N°2: Método de análisis de boro Merck KGAA 64271 usado por el laboratorio de la Geo Ahuachapán.

Donde los reactivos tipo B son:

Reactivo B1, B2, B3, B4, B5 y B6, son los reactivos “B” de boro y el número indica el momento de uso. No se puede detallar el contenido de cada uno ya que son parte de un kit de análisis de boro de la empresa Merck, solamente las precauciones en el momento de uso.

**Notas sobre la medición:**

Es necesario tomar en cuenta algunas recomendaciones antes de realizar el análisis:

- El equipo necesita un estándar de mayor concentración que la muestra de análisis para cuantificar, se utiliza un estándar de Merck boro a una concentración de 2.0 ppm.
- Debido a la dependencia de la reacción de color frente a la temperatura, la muestra y los reactivos deben encontrarse a una temperatura de mínima de 20°C.
- Ciertos fotómetros exigen una muestra en blanco (preparación como la muestra de medición, pero con agua destilada en lugar de la muestra).
- Para la medición fotométrica las cubetas deben estar limpias. Si es necesario, limpiarlas con un paño seco y limpio.
- La turbidez después de acabada la reacción dan como resultado valores falsamente elevados.
- El color de la solución de medición permanece estable como mínimo 60 minutos después de transcurrido el tiempo de reacción B antes indicado.

**CAPITULO V**  
**RESULTADOS**

## 5.0 RESULTADOS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

El diseño del filtro piedra volcánica-carbón activado fue establecido, tomando en cuenta estudios teóricos, <sup>(3)(2)(9)</sup> de diferentes métodos de eliminación de boro de aguas residuales y pruebas previas realizadas por analistas del Laboratorio de La Geo Ahuachapán y pruebas experimentales de la presente investigación. Se realizó el diseño del filtro utilizando piedra volcánica, carbón activado, fibra de poliamida sintética; para el empaquetado de los elementos se usaron frascos plásticos de polietileno, tomando en cuenta las siguientes especificaciones:

- Disposición del filtro: se hace en favor de la gravedad para ayudar a tener un tiempo de permanencia mayor de la muestra.
- La conformación de las secciones del filtro: sección A y B (ver figura N°3), no solo favorece la permanencia de la muestra sino que ayuda a la alternancia de los elementos.
- Tamaño de la piedra volcánica: se incorpora piedra volcánica de dos diferentes tamaños; molida y pulverizada (Ver tabla N°8), esto para mejorar la superficie de contacto de la muestra con el filtro.
- Alternancia de piedra volcánica-carbón activado-piedra volcánica; esta alternancia se logra colocando fibra de poliamida sintética, conocida comúnmente como “paste lava trastos”, entre cada estrato de elemento (ver figura N°4 para elementos del filtro).



Tabla N°8: Dimensiones promedio en milímetros de los componentes del filtro

Medición N°	CA (mm)	Piedra volcánica(mm)	
		Molida	Pulverizada
1	0.63	0.38	1.27
2	0.69	0.32	0.90
3	0.65	0.35	1.28
4	0.72	0.38	1.10
5	0.69	0.32	1.26
6	0.67	0.34	0.99
7	0.62	0.33	1.19
8	0.66	0.36	1.41
9	0.65	0.36	1.20
10	0.65	0.32	1.21
Promedio	0.663	0.346	1.181

Para determinar la relación de los elementos en cuanto al tamaño de la muestra se tomaron en cuenta: la cantidad de piedra volcánica y de carbón activado.

Mediante un estudio previo se estableció en el Laboratorio de La Geo Ahuachapán<sup>(3)(4)</sup>, la proporción de piedra volcánica por mililitro de muestra, fue de: 1:1.126; es decir, por cada 1.0 mL de muestra se necesitaron 1.126 gramos de piedra volcánica; tomando como base esta información se procedió a cambiar las proporciones a 1000 mL de muestra. Para comparar según lo recomendado<sup>(1)</sup> por la Norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09; al convertir las cantidades de la proporción de 1:1.126 se obtuvieron: 1126.402 g. piedra volcánica y 50.007 g. de carbón activado (4.44% de carbón activado en relación a la cantidad de piedra volcánica presente), la cantidad de carbón activado no deberá sobrepasar el 5.0% por ser un componente<sup>(4)</sup> de alto costo económico. A continuación se muestra los cálculos de la conversión de piedra volcánica y la estimación de 4.44% de carbón activado según la cantidad de piedra volcánica presente:

1.126 g. de piedra volcánica → 1mL de agua residual

X ← 1000mL de agua residual

X = 1126.402 g. de piedra volcánica.

1126.402 g. de piedra volcánica → 100.00%

X ← 4.44%

X = 50.007 g. de carbón activado.

Teniendo las especificaciones mencionadas para el filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado completas: elementos componentes del filtro (piedra volcánica, carbón activado, fibra de poliamida sintética, frascos de polietileno), cantidades de cada componentes (relación de 1:1.126), especificaciones de muestra (volumen de 1000 mL, recolectada en frascos de polietileno, tres veces al día, almacenada a 4°C) y conformación del filtro artesanal. Se procede a realizar pruebas de falso positivo, estas consisten en hacer pasar agua desmineralizada individualmente por cada elemento y diluir de la misma forma que se hizo con la muestra de agua residual; obteniendo 0.0 ppm de resultado, lo cual comprueba que no se tendrá contaminación proveniente de los elementos, seguidamente se empaqueta la sección A conteniendo una parte de piedra volcánica y el carbón activado (alternados); después se empaqueta la sección B solamente con piedra volcánica (de diferentes tamaños)(ver figura N°3), posterior a esto se hace pasar un litro de agua desmineralizada, analizándola de la misma forma que

los elementos individuales, obteniendo también 0.0 ppm; con estos resultado se procede a realizar el tratamiento del agua residual.

Para cuantificar el contenido de boro en el agua residual se utilizó el método fotométrico Merck KGAA 64271, usando el Fotómetro Génesis 20(5), el cual realiza la lectura de muestras; llevando a cabo los siguientes pasos:

Primero: se procede a recolectar la muestra en frascos de polietileno durante tres periodos diferentes en el día (mañana, mediodía y tarde) (ver Anexo N°13), esto para comparar el comportamiento durante todo el día y evitar que se estime si el tratamiento es o no efectivo con una sola muestra y mejorando la representatividad de los resultados.

Segundo: se trata la muestra con el kit de cuantificación de boro de Merck KGAA 64271, reaccionando de la siguiente forma: al volver la solución acida los iones borato forman con un diol quelatos, que se extraen selectivamente con cloroformo, este extracto se forma con curcumina, dando como resultado un complejo rojo que se determina fotométricamente a la longitud de onda de 550 nm, el resultado (según el equipo utilizado concentración de boro es en partes por millón) expresado en partes por millón de la muestra diluida.

Tercero: el resultado obtenido de la lectura del complejo rojo, se multiplica por el factor de dilución y se obtiene el contenido de boro tanto de la muestra previa al tratamiento como posterior a este.

En la tabla N°9 se muestra el resumen del comportamiento promedio mensual y diario (mañana, medio día y tarde) de boro.

Tabla N°9: Resumen de contenido de boro promedio en ppm durante cuatro meses (Datos resumidos referidos de anexo N°13)

MES		CONC. DIL. (i)	CONC. B (i)	CONC. DIL. (f)	CONC. B (f)	% ELIMINACIÓN
ENERO	MAÑANA	1.239	6.20	0.471	2.35	61.6%
	MEDIO DÍA	1.236	6.18	0.467	2.34	61.8%
	TARDE	1.231	6.16	0.463	2.32	61.9%
	PROMEDIO	1.225	6.13	0.469	2.34	61.2%
FEBRERO	MAÑANA	1.247	6.23	0.407	2.03	66.3%
	MEDIO DÍA	0.666	6.25	0.404	2.02	66.6%
	TARDE	1.248	6.24	0.404	2.02	66.6%
	PROMEDIO	1.235	6.17	0.402	2.01	66.4%
MARZO	MAÑANA	1.487	7.43	0.483	2.42	67.2%
	MEDIO DÍA	1.509	7.55	0.492	2.46	67.2%
	TARDE	1.532	7.66	0.499	2.50	67.2%
	PROMEDIO	1.513	7.56	0.494	2.47	67.1%
ABRIL	MAÑANA	1.219	6.09	0.420	2.10	65.2%
	MEDIO DÍA	1.213	6.07	0.417	2.09	65.3%
	TARDE	1.207	6.03	0.414	2.07	65.5%
	PROMEDIO	1.200	6.00	0.411	2.06	65.5%
<b>PROMEDIO TOTAL</b>			6.47ppm	-----	2.22ppm	65.1%

Dónde:

CONC. DIL. (i): Concentración diluida inicial.  
 CONC. B (i): Concentración de boro inicial.  
 CONC. DIL. (f): Concentración diluida final.  
 CONC. B (f): Concentración de boro final.

Los datos que se muestran en la tabla N°9 (Datos basados en anexo N°13) muestran los valores obtenidos de la concentración boro tanto inicial como final, se colocó en la tabla el valor de la concentración diluida, que es valor del boro antes de ser multiplicado por el factor de dilución (valor de 5), estos son los valores obtenidos de la lectura directa en el fotómetro Génesis 20, se colocan en la tabla como concentración diluida (CONC. DIL.), con el fin de mostrar la tendencia de los datos originales; pero la tendencia de la concentración de boro inicial (CONC. B(i)) nuestra un rango de concentración de 6.03 ppm - 7.66 ppm,

lo cual indica que existe una variación aproximada de 2 ppm; este rango inicial pasa al rango de la muestra ya tratada (CONC. B(f)) de 2.02 ppm – 2.50 ppm, con una variación de 0.5 ppm, esta variación indica que, al ser tratada la muestra el resultado final es estable, la estabilidad muestra que el filtro posee un sistema de eliminación único, es decir, posee un porcentaje de eliminación sin importar el contenido inicial de boro en la muestra, siendo esta estimación el rango aproximado de 61.6% - 67.2%, la cuantificación del boro muestra como el filtro eliminó el boro del agua residual y como mantuvo esta tendencia a través del tiempo y el uso, el valor promedio de 2.22 ppm muestra que el diseño del filtro aun no es el adecuado, para tener un contenido debajo de la norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09; pero también se debe considerar que la muestra de agua residual al ser tratada puede llegar a ser utilizada para riego de plantas que van de moderadamente sensible a muy tolerante, según la clasificación de cultivos resistentes al boro (ver anexo N°12); lo anterior muestra la utilidad de la cuantificación del contenido de boro tanto de la muestra inicial como de la final.

Para la comparación de la muestra de agua residual tratada, se hace contra el parámetro de la norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09 para Aguas Residuales Descargadas a un cuerpo receptor, el valor del parámetro es de 1.5 ppm de boro para ser descargada; un contenido promedio de boro en el agua residual sin tratamiento total durante los cuatro meses de análisis de 6.47 ppm, este se debe reducir al valor establecido por la norma para verterse de manera segura.

El valor promedio final después de tratada el agua residual durante cuatro meses de 2.2 ppm de boro, indica que se encuentra arriba del valor de boro permitido, teniendo una diferencia estimada de 0.72 ppm de boro excedente para lograr tener el valor deseado de 1.5 ppm.

Tabla N°10: Contenido de boro (ppm) tratado contra valor de la Norma NSO 13.49.01:09 (Datos promedios mensuales referidos de tabla N°9)

MES	SEMANA	CONTENIDO PROMEDIO DE BORO (ppm)	CONTENIDO DE BORO (ppm) PERMITIDO (6) SEGÚN NORMA NSO 13.49.01:09	ESTADO
ENERO	MAÑANA	2.35	1.5	NO CUMPLE
	MEDIO DÍA	2.34	1.5	NO CUMPLE
	TARDE	2.32	1.5	NO CUMPLE
FEBRERO	MAÑANA	2.03	1.5	NO CUMPLE
	MEDIO DÍA	2.02	1.5	NO CUMPLE
	TARDE	2.02	1.5	NO CUMPLE
MARZO	MAÑANA	2.42	1.5	NO CUMPLE
	MEDIO DÍA	2.46	1.5	NO CUMPLE
	TARDE	2.50	1.5	NO CUMPLE
ABRIL	MAÑANA	2.10	1.5	NO CUMPLE
	MEDIO DÍA	2.09	1.5	NO CUMPLE
	TARDE	2.07	1.5	NO CUMPLE

Teniendo en cuenta los datos promedios anteriores se puede ver que, el contenido de boro de la muestra tratada no logra estar debajo del requerimiento de la norma en cuestión, comparando el contenido de boro con el valor según norma, se comprueba que el filtro disminuye la contaminación por boro pero no llevarla debajo del valor mínimo de 1.5 ppm permitido por la norma NSO 13.49.01:09.

A continuación se muestra en el gráfico N°1 la tendencia de comportamiento del boro durante los cuatro meses de tratamiento(8) usando el filtro artesanal diseñado; se puede ver la concentración de boro inicial (CONC. BORO i), que

es la muestra sin tratamiento y la concentración de boro final (CONC. BORO f), que es la muestra ya tratada, la línea de tendencia del contenido permitido por la norma que es de 1.5 ppm

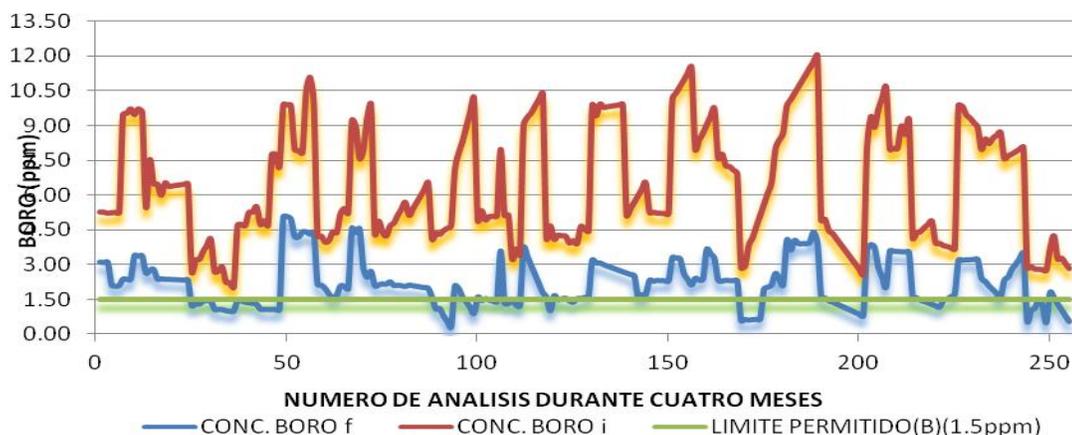


Figura N°11: Tendencia total del boro en el tratamiento (Ver anexo N°13 para detalle de datos totales)

El grafico presenta el análisis total de los datos, es decir, que son los 255 datos obtenidos durante los cuatro meses de tratamiento; este grafico está referido al anexo N°13. Como se puede ver en el grafico, las muestras están fuera del límite permitido (1.5 ppm), la tendencia muestra que, para lograr una eliminación hasta niveles permitidos por la norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09; el boro presente en el agua geotérmica debería tener una tendencia constante en cuanto al contenido del contaminante (alrededor de 5-6 ppm en la concentración inicial de boro)(Ver detalle en Anexo N°13, muestra algunos datos que lograr llegar bajo el valor de la norma), lo cual no ocurre a nivel práctico; en el grafico N°1 se observan incrementos y disminuciones drásticas en la concentración de boro inicial, estas variaciones son causadas

por el comportamiento del vapor y sus diferentes movimientos en el suelo al momento de ser extraído.

La determinación de la efectividad del filtro, en la eliminación del boro de las muestras de agua residual; se analiza tomando en cuenta el porcentaje de eliminación de boro, el cual se determina de la siguiente forma:

Primero: Se determina la diferencia de boro, que consiste en calcular la variación del contenido de boro inicial respecto al contenido final de la siguiente forma.

$$\text{Dif. de Boro} = \text{Conc. Boro i.} - \text{Conc. Boro f.}$$

Donde:

Conc. Boro f.: Concentración de boro final.

Conc. Boro i.: Concentración de boro inicial.

Dif. de Boro.: Diferencia de boro.

Ejemplo: (Datos referidos a Tabla N°9, promedio total de enero)

Conc. Boro f.: 2.34 ppm

Conc. Boro i.: 6.13 ppm

$$\text{Dif. de Boro} = 6.13 \text{ ppm} - 2.34 \text{ ppm}$$

$$\text{Dif. de Boro} = 3.78 \text{ ppm}$$

Segundo: Con el cálculo de la diferencia de boro se procede a determinar el porcentaje de eliminación de boro; esto se hace relacionando el contenido de boro inicial conjuntamente con la diferencia de boro calculada; para esto se debe tomar en cuenta que, si se elimina el contenido de boro inicial se tiene una eficiencia del 100.0%, pero como solamente se eliminó una parte (es decir la diferencia de boro), esta parte es el porcentaje de eliminación de boro; siendo que este porcentaje mide la eficiencia del filtro artesanal de piedra volcánica-

carbón activado; este porcentaje no solo mide el porcentaje de eliminación sino también la eficiencia porque, conociendo el porcentaje de eliminación también en que porcentaje el filtro puede eliminar en función del tamaño de la muestra esto se puede detallar mejor de la siguiente manera.

	Porcentaje de eliminación	
Conc. Boro i.	→	100%
Dif. de Boro	→	x

Dónde:

Conc. Boro i.: Concentración de boro inicial.

Dif. de Boro : Diferencia de boro.

x : Variable de porcentaje de eliminación y eficiencia de filtro.

Ejemplo: (datos tomados de tabla N°9, continuación del ejemplo)

Conc. Boro i.: 6.13 ppm

Dif. de Boro : 3.78 ppm

$$\begin{array}{rcl}
 6.13 \text{ ppm} & \rightarrow & 100\% \\
 3.78 \text{ ppm} & \rightarrow & x \\
 x = & & 61.2\%
 \end{array}$$

Donde la eficiencia se calcula en términos generales por la fórmula:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(\text{Conc. Boro i.} - \text{Conc. Boro f.})}{\text{Conc. Boro i.}} (100)$$

Finalmente: Al tener el cálculo de porcentaje se puede ir estimando mensualmente cual es el porcentaje de eliminación del filtro artesanal de piedra

volcánica-carbón activado, en la tabla N°11 se muestra la tendencia del porcentaje de eliminación (tanto en porcentaje como en partes por millón)

Tabla N° 11: Porcentaje de retención del filtro (Promedios referido a tabla N°9)

MES		CONC. B (i)	CONC. B (f)	DIF. DE BORO	% ELIMINACIÓN
ENERO	PROMEDIO	6.13	2.34	3.78	61.2%
FEBRERO	PROMEDIO	6.17	2.01	4.16	66.4%
MARZO	PROMEDIO	7.56	2.47	5.10	67.1%
ABRIL	PROMEDIO	6.00	2.06	3.94	65.5%
<b>TOTAL</b>		<b>6.47</b>	<b>2.22</b>	<b>4.25</b>	<b>65.1%</b>

Los datos promedios anteriores indican que de un contenido inicial de 6.47 ppm de boro la máxima cantidad de boro que se puede eliminar es de 4.25 ppm y que la eficiencia el filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado se encuentra en el rango de 61.2% a 67.1% (para detalle de los datos totales ver Anexo N°13).

Finalmente, para determinar un estimado del tiempo de vida útil es necesario, analizar el porcentaje de retención del boro y determinar si existe una tendencia ya sea de incremento en la eliminación o disminución de boro de la muestra, para ello es necesario recordar los datos mostrados en la tabla N°11 en función del porcentaje de eliminación, que resultan ser: 61.2%, 66.4%, 67.1%, 65.5%; estos resultados por si solos, tan sólo muestran una ligera variación, en el grafico N°2 se observa la extrapolación de datos, estimando una tendencia, según los datos promedios de los cuatro meses de análisis.

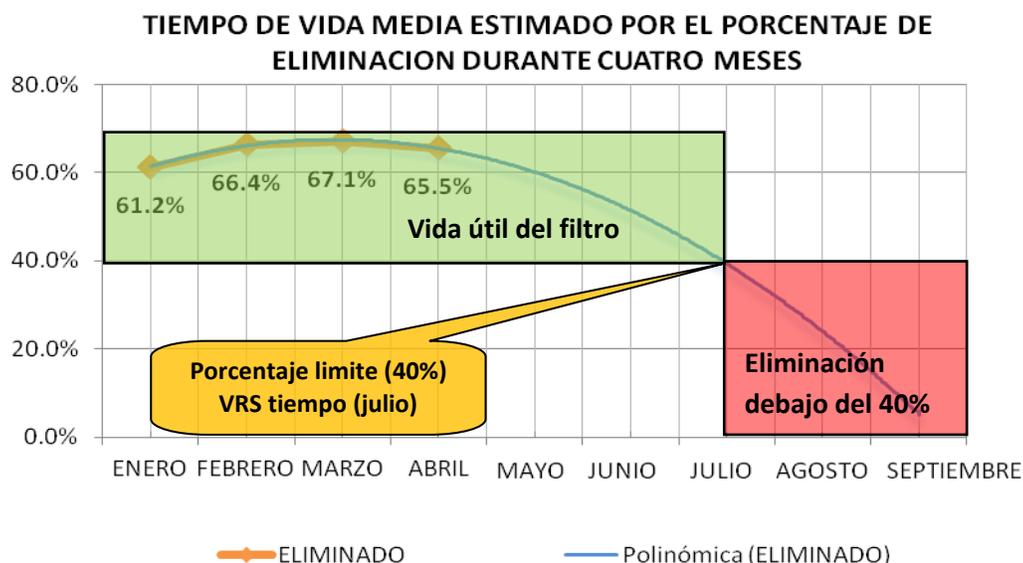


Figura N°12: Tiempo de vida media del filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado.(datos referidos de tabla N°11)

Se debe tener en cuenta los siguientes parámetros para analizar los resultados del gráfico:

- Durante todo el proceso se analizaron 250 muestras de 1000mL cada una, siendo un promedio de 62.5 muestras por mes (ver Anexo N°13).
- El tiempo de permanencia aproximado fue de uno a dos minutos.
- Se realizó un lavado con agua desmineralizada al final de cada semana.
- Las muestras eran recolectadas durante la semana, almacena y analizada al final de la semana.

Tomando en cuenta lo anterior se puede decir que el tiempo de vida media es muy difícil de predecir con los datos que se tienen, pero al utilizar una extrapolación de datos (como se muestra en el gráfico N°2) hacia un estimado

del comportamiento; se puede considerar que la vida útil se termina cuando se elimina alrededor de un 40% como mínimo, eso sería que del promedio de 6 ppm tan solo se elimina 2.4 ppm, teniendo al final unos 3.6 ppm de boro, esto indica que el filtro artesanal no lograría estar cerca del valor que se necesita para la adecuada eliminación de boro (1.5 ppm según norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09). Con la extrapolación de datos se puede estimar que dentro de tres meses (entre los meses de junio a agosto) más de uso se terminaría la vida útil del filtro artesanal de piedra volcánica - carbón activado; aunque para confirmar esto se debería analizar durante ese tiempo más muestras; como se puede observar en el gráfico N°2 durante el primer mes se tiene un porcentaje bajo (61.2%) comparando con los dos siguientes que se ve una marcada tendencia a la alza (66.4% y 67.1%), lo cual se contrapone con una marcada disminución en el último mes (65.5%), esto hace posible extrapolar los datos ya que se genera una ligera tendencia que se puede estimar que seguirá, se puede decir que el filtro tuvo una serie de etapas en el desempeño de estos cuatro meses que se pueden categorizar de la siguiente forma: etapa de acondicionamiento, seguido de una etapa plena de trabajo y que luego inicia la saturación y el descenso de su rendimiento, todo esto según lo que muestra, tanto la extrapolación de los datos como el gráfico de los valores promedio del porcentaje de eliminación detallados en el gráfico N°2.

**CAPITULO VI**  
**CONCLUSIONES**

## 6.0 CONCLUSIONES.

1. Debido a la fluctuación constante del contenido de boro, el filtro de piedra volcánica-carbón activado no es eficiente, para el tratamiento de agua residual proveniente de La Geo Ahuachapán; ya que se pueden encontrar concentraciones superiores o iguales a 7.0 ppm.
2. El filtro de piedra volcánica-carbón activado, posee propiedades de eliminación del boro del agua residual, debido a la piedra volcánica; lo que se observó con la disminución del contenido de boro en un 65.1% de promedio durante un periodo de cuatro meses.
3. La utilización del filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado, en proporciones de 1:1.126 en función de piedra volcánica y 4.4% de carbón activado, resulta ser eficaz únicamente en un 65.1% de eliminación de boro, respecto al contenido inicial.
4. El contenido de boro en el agua residual no llega a estar por debajo de 1.5 ppm (contenido mínimo logrado 2.22 ppm) en los análisis, incumpliendo el parámetro de aceptación para la norma Salvadoreña NSO 13.49.01:09 de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor (Valor máximo permitido 1.5ppm).

5. La cuantificación del boro del agua residual antes y después del tratamiento; permite determinar que existe una variación significativa durante cada día de análisis, lo que indica que se debe tener presente esta variación para lograr la adecuada eliminación del boro.
6. Reestructurar la propuesta del filtro tomando en cuenta la variación del contenido de boro.
7. Al comparar el contenido de boro promedio mensual de las muestras con la NSO 13.49.01:09 que permite, la descarga de 1.5 ppm de boro, se establece que las muestras están fuera del límite por tener una concentración de 2.22 ppm;
8. Ya que la norma NSO 13.49.01:09 permite una concentración de 2.0 ppm en el agua para uso de riego. El resultado de 2.22 ppm indica que la propuesta del filtro para el tratamiento de boro en agua residual se encuentra cerca de los resultados deseados para usarse en agua de riego.
9. El filtro propuesto llevar el agua residual de una concentración entre 6 o 7 ppm a una cercana a las 2 ppm, permitiendo que se pueda utilizar esta agua para riego en cultivos que vayan de, moderadamente sensible a muy tolerantes.

10. La efectividad del filtro de piedra volcánica-carbón activado en función del porcentaje de eliminación de boro, después de cuatro meses de uso y según el comportamiento no logra superar en promedio los 65.1% de eliminación de boro, sino que se mantiene entre 61.2% a 67.1%.
  
11. El tiempo de vida media del filtro de piedra volcánica-carbón activado se estima alrededor de siete meses de uso, estimándose que llegará a tener una eliminación de boro menor de 40% en este periodo, este tiempo es calculado por la tendencia de la eliminación, que inicia con el acondicionamiento, seguido de una etapa plena de trabajo y que continúa con la saturación y el descenso de su rendimiento; este comportamiento es el que permite extrapolar los datos para estimar el tiempo de vida media aproximado.
  
12. La efectividad tanto como el tiempo de vida media del filtro se encuentran relacionados, a medida que la efectividad disminuye, también la vida útil del filtro se reduce.

**CAPITULO VII**  
**RECOMENDACIONES**

## **7.0 RECOMENDACIONES.**

1. Establecer una nueva composición del filtro, en cuanto a la relación de piedra volcánica y carbón activado; llevando a un 5% de contenido de carbón activado y determinar con los datos del porcentaje de eliminación de la presente investigación, el contenido de piedra volcánica para llegar al valor más cercano de 100% de eliminación de boro.
2. Desarrollar en estudios posteriores con exactitud el mecanismo de acción de la piedra volcánica, ya que por su composición de diferentes minerales, no solo absorbe si no también adsorbe.
3. Determinar la relación de piedra volcánica con respecto al agua residual, para eliminar un mayor porcentaje de boro
4. Aumentar la vida media del filtro, realizando estudios con elementos como: ácidos, bases, vapor de agua.
5. Cuantificar el contenido de boro de manera individual, no utilizando una muestra mezclada como muestra inicial.

6. Utilizar el agua residual tratada con el filtro en cultivos que se encuentran de moderadamente sensible a muy tolerantes, en cuanto a concentraciones de boro.
7. Diseñar un área de tratamiento, empleando los datos obtenidos del filtro artesanal; para que funcione como un sistema de contingencia, esto en caso de aumentar los caudales de agua residual de tipo geotérmica, reinyectada por La Geo.
8. Validar la utilización del filtro de piedra volcánica-carbón activado, como medio de eliminación de boro hasta niveles seguros (menores de 1.5 ppm).
9. Experimentar con elementos como resinas, arcillas u otro tipo de piedra, para determinar no solo la reducción o eliminación del boro, sino la completa eliminación del contaminante.

## **BIBLIOGRAFIA**

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1) American Water Works Association. Manual de suministros de agua comunitaria. España: Mc-Gram-Hill Inc.; 2007.
- 2) American Public Health Association. Métodos estándar para el examen de aguas y aguas de desecho. 11ª Ed. México DF: Editorial interamericana; 1960.
- 3) ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). Reseña Toxicológica del Boro. Atlanta: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU; 1992.
- 4) ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). Reseña Toxicológica del Boro. 2ª Ed. Atlanta: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU en español; 2007.
- 5) Contreras L. y otros. Propuesta de elaboración y evaluación de un filtro para agua utilizando arcilla proveniente del área de Metapan [Trabajo de graduación]. San Salvador, El Salvador, UES: Facultad de Química y Farmacia; 2007
- 6) CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología). Norma salvadoreña NSO 13.07.01:99, Agua, Aguas Residuales Descargadas en

un Cuerpo Receptor. San Salvador, El Salvador: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; 1996

- 7) Chou Y. Analisis estadístico. 2° Ed. Mexico DF: Nueva editorial interamericana S.A. de C.V; 1977
- 8) Cuéllar Nelson, Sosa Herman, La gestión del agua en El Salvador: Desafíos y respuestas Institucionales. Ed. Anual. San Salvador, El Salvador: Publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); 2001.
- 9) Faunier E. El boro, recomendaciones y dosis. Colombia: Editorial Agrosagi; 2006
- 10) Figueroa L., Tapia L., Bastias E., Niveles de boro en el agua de riego utilizada en olivicultura del norte de Chile. Universidad de Tarapacá Chile: Departamento de gestión de la calidad del agua Universidad de Tarapacá; 1997.
- 11) Geo (Geotérmica de El Salvador). Evaluación ambiental del manejo de agua de condensado excedente de la central geotérmica de Ahuachapán. Ahuachapán, El Salvador: Unidad ambiental gerencia de ingeniería LA GEO; 2008.
- 12) Gerhard R. Microbiología de las aguas. Zaragoza España: Editorial Acribia S.A; 1987.

- 13) González M. Curso de Biomoléculas. CSIC-UP/EHU- Universidad del país Vasco-CSIC, España: Departamento de Bioquímica y Biología Molecular de la Universidad del País Vasco; 2000.
- 14) IMAC (Iniciativa Mexicana de Aprendizaje para la Conservación). Tipos de agua [Revista en línea] 2008 [Acceso 30 de jun. 2008]. Disponible en:  
[http://www.imacmexico.org/ev\\_es.php?ID=17439\\_208&ID2=DO\\_TOPIC](http://www.imacmexico.org/ev_es.php?ID=17439_208&ID2=DO_TOPIC)
- 15) IPCS (Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas). Concenso científico sobre el Boro [Revista en línea] 1998. [Acceso 30 de jun. 2008]. Disponible en:  
<http://www.greenfacts.org/es/boro/boro-greenfacts.pdf>.
- 16) K. Murray. y A. Mayes, Bioquímica de Harper. 14 Ed. México D.F.: Editorial el manual moderno S.A.de C.V.
- 17) La Geo (Geotérmica Salvadoreña S.A de C.V. ES). Diagnostico ambiental central geotérmica de Ahuachapán, Ahuachapán. El Salvador: Central geotérmica de Ahuachapán; 2000.
- 18) López R. Tratamiento de aguas industriales. México D.F.: Alfa omega grupo editor S.A. de C.V.; 1999.
- 19) Marchese Ada, Navas Miguel, Udaquiola Stella, Aguas contaminadas y remoción de boro en aguas para consumo humano [Revista en línea]

2006. [Acceso 13 de jun. de 2008]. Disponible en:  
<http://www.inta.gov.ar/sanjuan/actualidad/AguasContaminadas.pdf>.

20) Merck KGaA. Test de Boro, Método Test de Boro, Método fotométrico Merck KGaA 64271, si, Merck environmental analysis. 2005.

21) Ministerio del medio ambiente y Recursos naturales de El Salvador. Reglamento especial de aguas residuales, Decreto No34. San Salvador, El Salvador: Ministerio del medio ambiente y Recursos naturales de El Salvador; 2000. I 1-3p., II 1-2p., III 1-5p.

22) OCCUAM. El boro, dosis mínima esencial para procesos de desarrollo vegetal y animal. Madrid, España: oficina de programas de cultura científica; 2007.

23) OMS-Comité del Codex. Informe de la octava reunión del comité del Codex sobre aguas minerales naturales comisión del Codex Alimentarius. Ginebra, Suiza: OMS (Organización mundial de la salud)/FAO (Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación) Programa conjunto sobre normas alimentarias, Comité del Codex; 2008. 31º período de sesiones este informe se incorpora la circular del Codex cl 2008/3-nmw.

24) OMS (Organización Mundial de la Salud). Agua: saneamiento y salud, Guías para la calidad del agua potable [Revista en línea] 2009 [Acceso 5

mar. 2009]; 1(2,5). Disponible en:  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3rev/es/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/es/index.html).

- 25) Reynolds K. A. De La Llave: Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica, identificación del Problema. Editorial AGUALATINOAMÉRICA; 2002
- 26) Rivera R. y otros. Elaboración de un filtro de aplicación para la remoción de hierro y manganeso del agua, utilizando el proceso de aireación y contacto [Trabajo de graduación]. UES, San Salvador, El Salvador, Universidad de El Salvador: Facultad de Química y Farmacia; 2003.
- 27) Salazar, F. E. El boro recomendaciones y dosis. Valle, Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Palmira; 2008
- 28) Sánchez Marco, Sánchez J. Algunos aspectos de la contaminación en el bajo Andarax (Almería). Valencia, España: Universidad de Almería, Dpto. de Hidrogeología y Química Analítica; 1998.
- 29) Seminario de química inorgánica. Santiago de Chile, El Agua. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile; 2008. P. 1-25.
- 30) Subsecretaría de recursos hídricos de Argentina. Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a boro. Argentina: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación; 2003.

- 31) Subsecretaria de recursos hídricos de Argentina. Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a boro. Argentina: Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación; 2003. 2° Edición
- 32) UNESCO/ Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos del Mundo. Año Internacional del Agua Dulce. División de Ciencias del Agua 1 Rue Miollis 75015 Paris, Francia; 2008.
- 33) Vargas Antonio, Sancenes Javier, Toxicidad de boro en plantaciones de banano (*Musa AAA*) en Costa Rica, San José, Costa Rica. Agronomía Costarricense [Revista en línea] 2007 [Consultado 22 de jun. del 2008]; Disponible en:  
<http://www.fertitec.com/PDF/Clasificacion%20y%20Uso%20de%20las%200Aguas%20de%20Riego.pdf>
- 34) Vergara E. Recopilación y manejo de datos fisicoquímicos para el aseguramiento de la calidad del agua de fuentes subterráneas de uso potable. 5° Ed. España McGraw-Hill Inc.; 2004
- 35) Yonglan Xu and Jia-Qian Jiang, Tecnologías para remoción del boro. Reino Unido: CEHE Faculty of Engineering & Physics Science, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH; 2008.

- 36) <http://www.lenntech.com/espanol/FAQ-quimica-agua.htm>, La Química del Agua.
- 37) <http://www.lenntech.com/espanol/est%C3%A1ndares-de-calidad-del-agua.htm>, LENNTECH Estándares de calidad del agua potable.
- 38) [http://www.umbral.uprrp.edu/files/Componentes%20del%20agua\\_0.pdf](http://www.umbral.uprrp.edu/files/Componentes%20del%20agua_0.pdf), Componentes del agua dulce.
- 39) <http://www.epa.gov/OGWDW/agua/estandares.html> , Ground Water & Drinking Water; Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable.
- 40) <http://www.epa.gov/OGWDW/agua/estandares.html>, Reglamento Nacional Primario de Agua Potable Oficina de Agua (4606) EPA 815-F-00-007
- 41) [http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs26.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs26.html), Boro, 7440-42-8.
- 42) <http://www.uc.cl/quimica/agua/estructura.htm>
- 43) <http://www.encuentros.uma.es/encuentros82/boro.htm>
- 44) <http://es.wikipedia.org/wiki/Roca>

## **GLOSARIO**

## GLOSARIO (6) (11) (35)

- ≡ **Agua Residual:** es el agua resultante de cualquier uso, proceso u operaciones de tipo agropecuario, doméstico e industrial, sin que forme parte de productos finales.
  
- ≡ **Contaminación:** es la alteración de la calidad física, química, biológica y radiactiva en detrimento de la biodiversidad.
  
- ≡ **Cuerpo de agua:** masa de agua estática o en movimiento permanente o intermitente como ríos, lagos, lagunas, fuentes, acuíferos, mares, embalses y otros.
  
- ≡ **Cuerpo receptor:** se refiere al cuerpo de agua expuesto a recibir descargas directas o indirectas.
  
- ≡ **Descarga:** agua residual vertida a un cuerpo receptor.
  
- ≡ **Industria:** se considera la instalación industrial y sus anexos y dependencias, ya sean cubiertas o descubiertas, que se dediquen a la manipulación, elaboración o transformación de productos naturales o artificiales mediante tratamiento físico, químico, biológico y otros, utilizando o no maquinaria.

- = **Materia flotante:** sustancias que permanecen temporal o permanentemente en la superficie del cuerpo de agua limitando su uso.
  
- = **Parámetro:** aquella característica que puede ser sometida a medición.
  
- = **Radiactividad:** es la propiedad de determinados elementos químicos (elementos radiactivos) de descomponerse en forma espontánea, liberando energía en forma continua de radiación nuclear: alfa, beta y gamma.
  
- = **Responsable de la descarga:** persona natural o jurídica que vierte las aguas residuales a un cuerpo receptor.
  
- = **Tratamiento de aguas residuales:** es cualquier proceso físico, químico o biológico, definido para depurar las condiciones de las aguas residuales a través de operaciones, de procesos unitarios preliminares, primarios, secundarios o avanzados a fin de cumplir con las normas establecidas.
  
- = **Vertido:** sinónimo de agua residual.

= **Valores máximos permisibles:** son los valores, rangos y concentraciones de los parámetros establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria para Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor. NSO 13.49.01:06, que debe cumplir el responsable de cada descarga

**ANEXOS**

Anexo N°1.

Tabla N°1: Algunos tipos de agua conocidos; clasificación dada dependiendo de su Origen, uso y/o características. (14)

TIPO DE AGUA	CARACTERISTICA, USO U ORIGEN	TIPO DE AGUA	CARACTERISTICA, USO U ORIGEN
Agua potable	Es agua que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo de contraer enfermedades	Agua capilar.	Agua que se mantiene en el suelo por encima del nivel freático debido a la capilaridad
Agua salada.	Agua en la que la concentración de sales es relativamente alta (más de 10 000 mg/l).	Agua de adhesión.	Agua retenida en el suelo por atracción molecular, formando una película en las paredes de la roca.
Agua salobre.	Agua que contiene sal en una proporción significativamente menor que el agua marina. La concentración del total de sales disueltas está generalmente comprendida entre 1000 - 10 000 mg/l. Este tipo de agua no está contenida entre las categorías de agua salada y agua dulce.	Agua de desborde.	Agua que se inyecta a través de una fisura en una capa de hielo.
Agua dulce.	Agua natural con una baja concentración de sales, o generalmente considerada adecuada, previo tratamiento, para producir agua potable.	Agua de formación.	Agua retenida en los intersticios de una roca sedimentaria en la época en que ésta se formó.
Agua dura.	Agua que contiene un gran número de iones positivos. La dureza está determinada por el número de átomos de calcio y magnesio presentes. El jabón generalmente se disuelve malamente en las aguas duras.	Agua de gravedad.	Agua en la zona no saturada que se mueve bajo la influencia de la fuerza de gravedad.

Tabla N°1 Continuación.			
Agua blanda.	Agua sin dureza significativa.	Agua de suelo.	Agua que se encuentra en la zona superior del suelo o en la zona de aireación cerca de la superficie del terreno
Aguas negras.	Agua de abastecimiento de una comunidad después de haber sido contaminada por diversos usos. Puede ser una combinación de residuos, líquidos o en suspensión, de tipo doméstico, municipal e industrial, junto con las aguas subterráneas, superficiales.	Agua disfórica.	Agua pobre en nutrientes y que contiene altas concentraciones de ácido húmico.
Aguas grises.	Aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos, y lavaderos.	Agua estancada.	Agua inmóvil en determinadas zonas de un río, lago, estanque o acuífero.
Aguas residuales.	Fluidos residuales en un sistema de alcantarillado. El gasto o agua usada por una casa, una comunidad, una granja, o industria que contiene materia orgánica disuelta o suspendida.	Agua freática.	Agua subterránea que se presenta en la zona de saturación y que tiene una superficie libre
Aguas residuales municipales.	Residuos líquidos, originados por una comunidad, formados posiblemente aguas residuales domésticas o descargas industriales.	Agua funicular.	Agua presente en los mayores poros que rodea las partículas del suelo formando, en los puntos de contacto con dichas partículas, anillos que se fusionan entre ellos.
Agua bruta.	Agua que no ha recibido tratamiento de ningún tipo, o agua que entra en una planta para su ulterior tratamiento.	Agua vadosa.	Cualquier agua que aparece en la zona no saturada.

Anexo N°2.

Tabla N°2 Criterios de análisis para aguas residuales de tipo especial(recopilación referida al boro)<sup>(6)</sup>

PARÁMETROS DE CALIDAD PARA AGUA DE RIEGO, SEGÚN NORMA OFICIAL PARA EL SALVADOR SEGÚN DECRETO N°51 <sup>(6)</sup>				
Parámetro		Valor *		
<b>Boro (mg/lt)</b>		<b>0.5 - 2.0</b>		
Cloruros (meq/lt)		5.5		
* Los límites pueden variar dependiendo del tipo de suelo, cultivo y disponibilidad de agua.				
PARÁMETROS COMPLEMENTARIOS SOBRE VALORES PERMISIBLES PARA AGUAS RESIDUALES DESCARGADAS A UN CUERPO RECEPTOR <sup>(6)</sup>				
Parámetro		Valor máximo permisible		
Boro (B) mg/L		1.5		
REQUERIMIENTO PARA TOMA DE MUESTRAS, RECIPIENTES PARA MUESTREO Y PERSEVANTES DE COMPONENTES EN AGUA <sup>(6)</sup>				
Parámetro	Recipiente	Preservante	Tiempo máximo de almacenamiento	Volumen mínimo de muestra en mL
Boro	Polietileno	Enfriar a 4°C	6 meses	1000

Anexo N°3.

Tabla N°3: Algunos parámetros químicos para agua de consumo humano según la normativa Salvadoreña. <sup>(6)</sup>

Parámetros	Valor recomendado (mg/L)	Valor máximo admisible (mg/L)
Boro *	–	0.30
* Sujetos a mayores restricciones.		

#### Anexo N°4.

Tabla N°4: Parámetros sobre niveles de sustancias químicas presentes en agua de consumo humano dados por la OMS.(40)

Contaminante	(mg/L)	Posibles efectos sobre la salud por exposición	Fuentes de contaminación comunes En agua potable
Boro	0.5	El ácido bórico o bórax en animales de laboratorio han demostrado que tiene toxicidad. Testicular puede afectar el estómago, los intestinos, el hígado, los riñones y el cerebro, y eventualmente puede causar la muerte; la exposición oral de animales preñados a cantidades altas de boro produjo peso de nacimiento bajo, defectos de nacimiento, y retardo del desarrollo.	Aire, agua y suelo. Los boratos son usados principalmente en la producción de vidrio, son como retardantes del fuego, acabados y curtimiento del cuero, en cosméticos, materiales fotográficos, aleaciones, en los combustibles de alto rendimiento y pesticidas

#### Anexo N°5.

Tabla N°5: Concentración de sustancias extrañas en ppm o en % (20)

Ag <sup>+</sup>	1000	Cu <sup>+2</sup>	1000	Pb <sup>+2</sup>	1000	EDTA	1000
Al <sup>+3</sup>	1000	F <sup>-</sup>	100	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	1000	OAC-Na	15%
Ca <sup>+2</sup>	1000	Fe <sup>+3</sup>	1000	S <sup>-2</sup>	1000	NaCl	20%
Cd <sup>+2</sup>	1000	Hg <sup>+2</sup>	100	SiO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	1000	NaNO <sub>3</sub>	5%
CN <sup>-</sup>	100	Mg <sup>+2</sup>	1000	Sn <sup>+2</sup>	1000	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	20%
Co <sup>+2</sup>	1000	Mn <sup>+2</sup>	1000	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	1000		
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	10	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1000	Zn <sup>+2</sup>	1000		
Cr <sup>+3</sup>	1000	Ni <sup>+2</sup>	1000				
Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>-2</sup>	25	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	100			Tensioactivos	250

### Anexo N°6.

Tabla N°6: Categorización de cultivos por su resistencia al boro soluble en relación a disminución de la cosecha.(31)(43)(27)

Categoría cultivo	Concentración máxima admitida Boro [mg B/L]	Tipo de cultivo
Muy sensible	< 0.5	Manzano, cerezo, limonero, naranjo, peral, melocotonero, pomelo, aguacate, olmo, albaricoquero, higuera, vid, ciruelo, judías, café.
Sensible	0.5 – 1.0	
Moderadamente sensible	1.0 – 2.0	Cebada, alfalfa, repollo, zanahoria, lechuga, cebolla, patata, calabaza, espinaca, tabaco, olivo, rosál, tomate
Moderadamente tolerante	2.0 – 4.0	y trigo.
Tolerante	4.0 – 6.0	espárrago, arándano, algodón, pepino, gladiolo, sésamo, tulipán, remolacha, haba, pasto, menta y centeno
Muy tolerante	6.0	

### Anexo N°7.

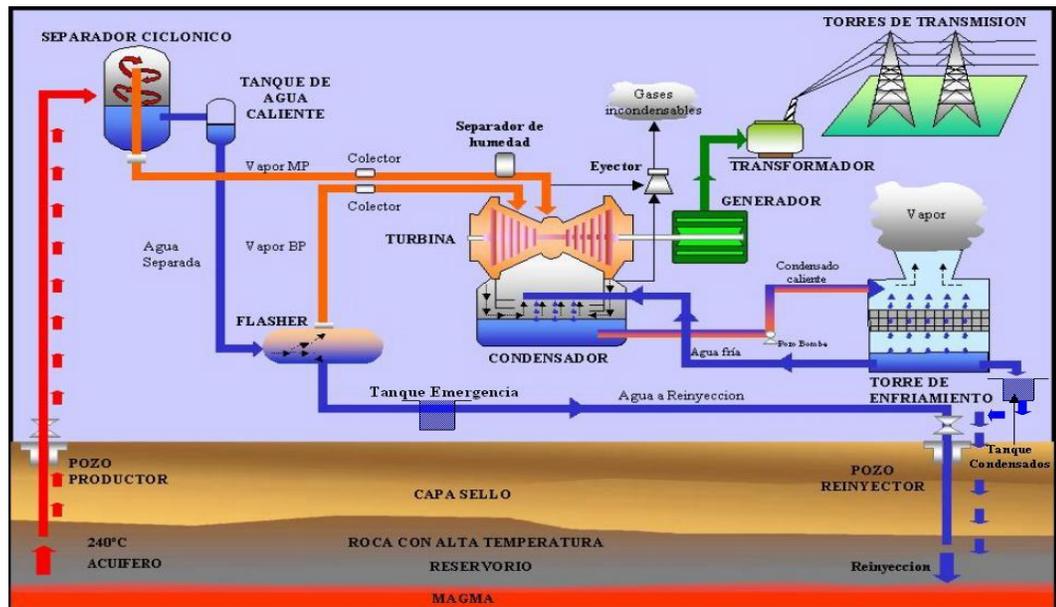


Figura N°5: Proceso completo de producción de energía eléctrica, usando energía geotérmica(17)

Anexo N°8.

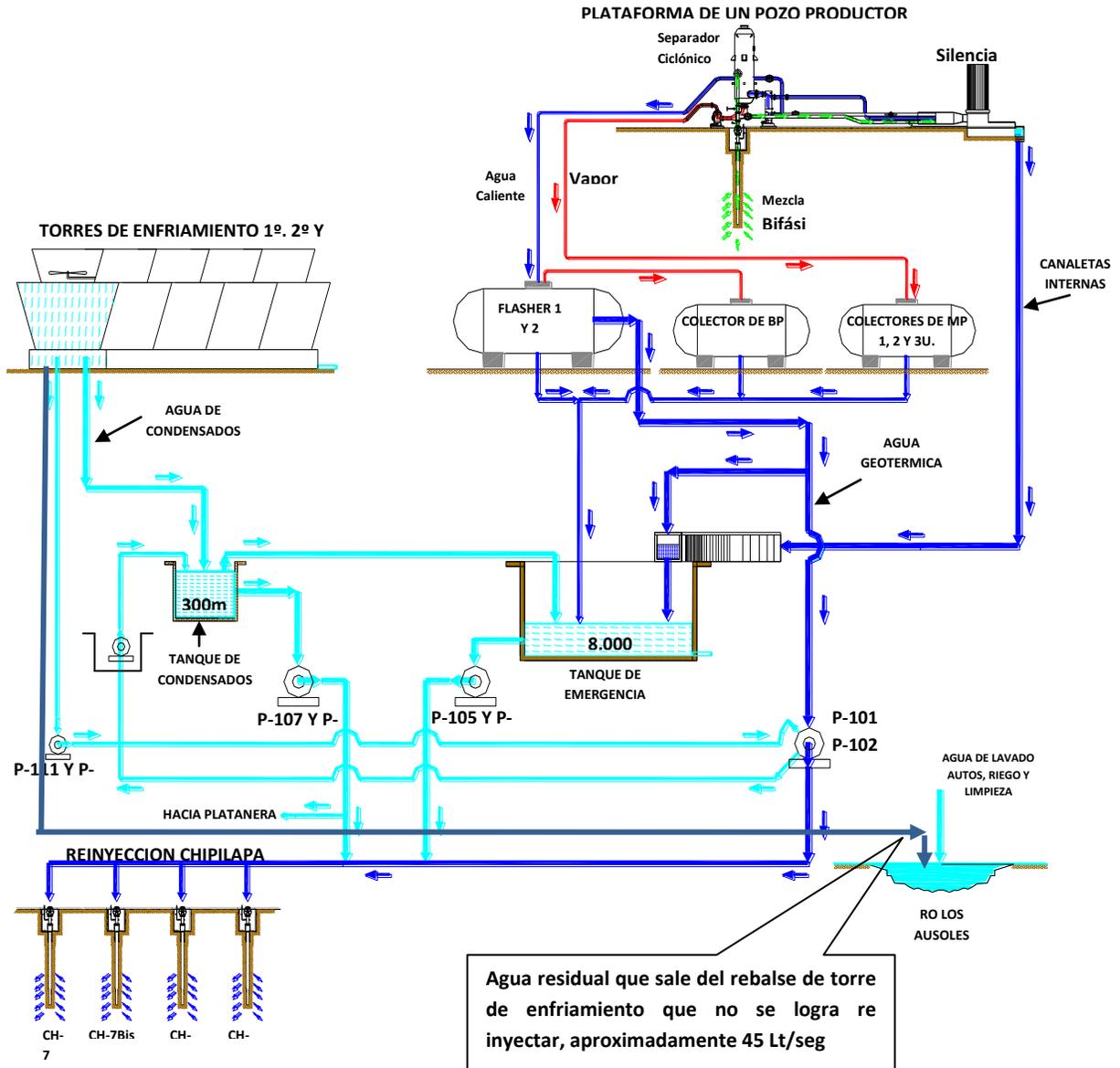


Figura N°6: Diagrama de flujo de aguas residuales (17)

Anexo N°9.

Tabla N°7: Dimensiones preliminares promedio en milímetros de los componentes del filtro

Medición N°	CA (mm)	Piedra volcánica(mm)	
		Molida	Pulverizada
1	0.63	0.38	1.27
2	0.69	0.32	0.90
3	0.65	0.35	1.28
4	0.72	0.38	1.10
5	0.69	0.32	1.26
6	0.67	0.34	0.99
7	0.62	0.33	1.19
8	0.66	0.36	1.41
9	0.65	0.36	1.20
10	0.65	0.32	1.21
Promedio	0.663	0.346	1.181

Anexo N°10.

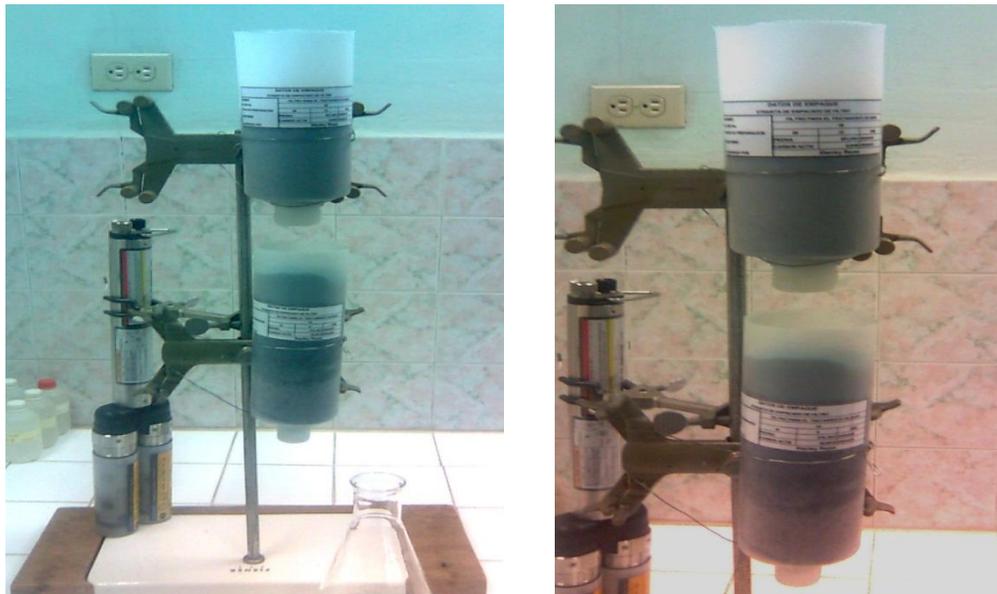


Figura N°7 Conformación de filtro artesanal de piedra volcánica-carbón activado

Anexo N°11.

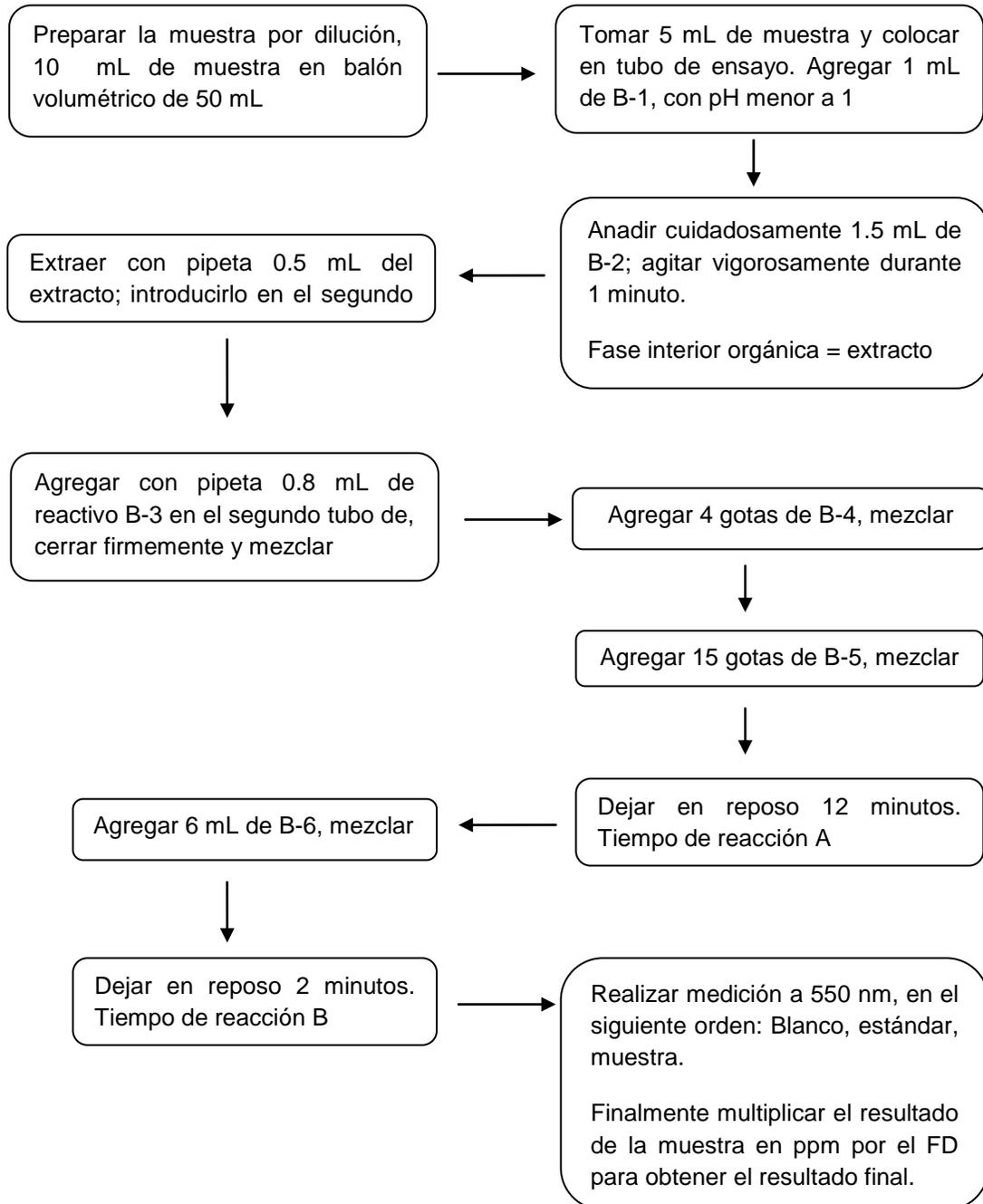


Figura N°8: Proceso esquematizado de método de análisis de boro Merck KGAA 64271

Donde los reactivos del anexo N°11:

Reactivo B1, B2, B3, B4, B5 y B6, son los reactivos “B” de boro y el número indica el momento de uso, por ejemplo el número 1, es el primero y así sucesivamente. No se puede detallar el contenido de cada uno ya que son parte de un kit de análisis de boro de la empresa Merck, solamente las precauciones de uso.

#### Anexo N°12



Figura N°9: Muestras recolectadas durante un día de análisis

Anexo N°13

Anexo N°13

Tabla N°12: Datos totales de análisis diario de agua residual tratada en el filtro de piedra volcánica-carbón activado en un periodo de cuatro meses.

Donde:								
Factor de dilución:		5						
CONC. DIL i:		Concentración diluida inicial						
CONC. DIL f:		Concentración diluida final						
CONC. BORO i (pm) :		Concentración de boro inicial en ppm						
CONC. BORO f (pm) :		Concentración de boro final en ppm						
DIF. :		Diferencia entre concentración de boro inicial y final.						
% ELIMIN.:		Porcentaje de eliminación						
PROM. :		Promedio del día						
FECHA	MUESTRA	CONC. DIL i	CONC. BORO i (pm)	CONC. DIL f	CONC. BORO f (pm)	DIF.	% ELIMIN.	PROM.
04/01/2010	MAÑANA	1.056	5.28	0.628	3.14	2.140	40.5%	
04/01/2010	MEDIO DÍA	1.058	5.29	0.625	3.13	2.165	40.9%	
04/01/2010	TARDE	1.050	5.25	0.628	3.14	2.110	40.2%	40.5%
05/01/2010	MAÑANA	1.054	5.27	0.432	2.16	3.110	59.0%	
05/01/2010	MEDIO DIA	1.056	5.28	0.422	2.11	3.170	60.0%	
05/01/2010	TARDE	1.055	5.28	0.428	2.14	3.135	59.4%	59.5%
06/01/2010	MAÑANA	1.900	9.50	0.482	2.41	7.090	74.6%	
06/01/2010	MEDIO DIA	1.910	9.55	0.480	2.40	7.150	74.9%	
06/01/2010	TARDE	1.950	9.75	0.481	2.41	7.345	75.3%	74.9%
07/01/2010	MAÑANA	1.900	9.50	0.685	3.43	6.075	63.9%	
07/01/2010	MEDIO DIA	1.950	9.75	0.680	3.40	6.350	65.1%	
07/01/2010	TARDE	1.920	9.60	0.683	3.42	6.185	64.4%	64.5%
08/01/2010	MAÑANA	1.103	5.52	0.536	2.68	2.835	51.4%	
08/01/2010	MEDIO DIA	1.509	7.55	0.557	2.79	4.760	63.1%	
08/01/2010	TARDE	1.305	6.53	0.567	2.84	3.690	56.6%	57.0%
11/01/2010	MAÑANA	1.301	6.51	0.484	2.42	4.085	62.8%	
11/01/2010	MEDIO DIA	1.204	6.02	0.485	2.43	3.595	59.7%	
11/01/2010	TARDE	1.310	6.55	0.481	2.41	4.145	63.3%	61.9%
12/01/2010	MAÑANA	1.281	6.40	0.480	2.40	4.002	62.5%	
12/01/2010	MEDIO DIA	1.285	6.43	0.479	2.39	4.032	62.7%	
12/01/2010	TARDE	1.290	6.45	0.477	2.39	4.062	63.0%	62.7%

Tabla N°12: Continuación.								
13/01/2010	MAÑANA	1.294	6.47	0.476	2.38	4.092	63.2%	
13/01/2010	MEDIO DIA	1.299	6.49	0.474	2.37	4.122	63.5%	
13/01/2010	TARDE	1.303	6.52	0.473	2.36	4.152	63.7%	63.5%
14/01/2010	MAÑANA	0.544	2.72	0.254	1.27	1.450	53.3%	
14/01/2010	MEDIO DIA	0.645	3.23	0.270	1.35	1.876	58.2%	
14/01/2010	TARDE	0.650	3.25	0.268	1.34	1.908	58.7%	56.7%
15/01/2010	MAÑANA	0.719	3.60	0.292	1.46	2.135	59.4%	
15/01/2010	MEDIO DIA	0.772	3.86	0.295	1.48	2.385	61.8%	
15/01/2010	TARDE	0.825	4.13	0.294	1.47	2.655	64.4%	61.8%
18/01/2010	MAÑANA	0.544	2.72	0.222	1.11	1.610	59.2%	
18/01/2010	MEDIO DIA	0.548	2.74	0.221	1.11	1.635	59.7%	
18/01/2010	TARDE	0.584	2.92	0.220	1.10	1.820	62.3%	60.4%
19/01/2010	MAÑANA	0.454	2.27	0.209	1.05	1.225	54.0%	
19/01/2010	MEDIO DIA	0.450	2.25	0.205	1.03	1.225	54.4%	
19/01/2010	TARDE	0.410	2.05	0.207	1.04	1.015	49.5%	52.6%
20/01/2010	MAÑANA	0.944	4.72	0.295	1.48	3.245	68.8%	
20/01/2010	MEDIO DIA	0.953	4.77	0.294	1.47	3.295	69.2%	
20/01/2010	TARDE	0.942	4.71	0.283	1.42	3.295	70.0%	69.3%
21/01/2010	MAÑANA	1.055	5.28	0.279	1.39	3.882	73.6%	
21/01/2010	MEDIO DIA	1.058	5.29	0.273	1.36	3.927	74.2%	
21/01/2010	TARDE	1.105	5.53	0.267	1.33	4.192	75.9%	74.6%
22/01/2010	MAÑANA	0.954	4.77	0.223	1.12	3.655	76.6%	
22/01/2010	MEDIO DIA	0.984	4.92	0.222	1.11	3.810	77.4%	
22/01/2010	TARDE	0.944	4.72	0.221	1.11	3.615	76.6%	76.9%
25/01/2010	MAÑANA	1.555	7.78	0.220	1.10	6.675	85.9%	
25/01/2010	MEDIO DIA	1.558	7.79	0.219	1.10	6.695	85.9%	
25/01/2010	TARDE	1.453	7.27	0.218	1.09	6.175	85.0%	85.6%
26/01/2010	MAÑANA	1.986	9.93	1.020	5.10	4.830	48.6%	
26/01/2010	MEDIO DIA	1.983	9.92	1.023	5.12	4.800	48.4%	
26/01/2010	TARDE	1.980	9.90	1.000	5.00	4.900	49.5%	48.8%
27/01/2010	MAÑANA	1.599	8.00	0.850	4.25	3.745	46.8%	
27/01/2010	MEDIO DIA	1.589	7.95	0.845	4.23	3.720	46.8%	
27/01/2010	TARDE	1.569	7.85	0.890	4.45	3.395	43.3%	45.6%
28/01/2010	MAÑANA	2.100	10.50	0.890	4.45	6.050	57.6%	
28/01/2010	MEDIO DIA	2.222	11.11	0.870	4.35	6.760	60.8%	
28/01/2010	TARDE	2.000	10.00	0.885	4.43	5.575	55.8%	58.1%
29/01/2010	MAÑANA	0.853	4.27	0.439	2.20	2.070	48.5%	
29/01/2010	MEDIO DIA	0.850	4.25	0.430	2.15	2.100	49.4%	

Tabla N°12: Continuación.								
29/01/2010	TARDE	0.799	4.00	0.400	2.00	1.995	49.9%	49.3%
01/02/2010	MAÑANA	0.815	4.08	0.353	1.77	2.310	56.7%	
01/02/2010	MEDIO DIA	0.890	4.45	0.322	1.61	2.840	63.8%	
01/02/2010	TARDE	0.882	4.41	0.342	1.71	2.700	61.2%	60.6%
02/02/2010	MAÑANA	1.043	5.22	0.423	2.12	3.100	59.4%	
02/02/2010	MEDIO DIA	1.090	5.45	0.420	2.10	3.350	61.5%	
02/02/2010	TARDE	1.050	5.25	0.399	2.00	3.255	62.0%	61.0%
03/02/2010	MAÑANA	1.850	9.25	0.920	4.60	4.650	50.3%	
03/02/2010	MEDIO DIA	1.800	9.00	0.882	4.41	4.590	51.0%	
03/02/2010	TARDE	1.522	7.61	0.918	4.59	3.020	39.7%	47.0%
04/02/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.578	2.89	5.110	63.9%	
04/02/2010	MEDIO DIA	1.870	9.35	0.498	2.49	6.860	73.4%	
04/02/2010	TARDE	1.985	9.93	0.549	2.74	7.181	72.4%	69.9%
05/02/2010	MAÑANA	0.872	4.36	0.425	2.13	2.235	51.3%	
05/02/2010	MEDIO DIA	0.981	4.91	0.432	2.16	2.745	56.0%	
05/02/2010	TARDE	0.889	4.45	0.442	2.21	2.235	50.3%	52.5%
08/02/2010	MAÑANA	0.853	4.27	0.439	2.20	2.070	48.5%	
08/02/2010	MEDIO DIA	0.940	4.70	0.459	2.29	2.405	51.2%	
08/02/2010	TARDE	0.965	4.83	0.428	2.14	2.685	55.6%	51.8%
09/02/2010	MAÑANA	1.031	5.16	0.431	2.15	3.002	58.2%	
09/02/2010	MEDIO DIA	1.087	5.44	0.425	2.13	3.309	60.9%	
09/02/2010	TARDE	1.143	5.72	0.420	2.10	3.617	63.3%	60.8%
10/02/2010	MAÑANA	1.031	5.16	0.431	2.15	3.002	58.2%	
10/02/2010	MEDIO DIA	1.087	5.44	0.425	2.13	3.309	60.9%	
10/02/2010	TARDE	1.143	5.72	0.420	2.10	3.617	63.3%	60.8%
11/02/2010	MAÑANA	1.199	6.00	0.414	2.07	3.924	65.4%	
11/02/2010	MEDIO DIA	1.255	6.28	0.409	2.04	4.232	67.4%	
11/02/2010	TARDE	1.311	6.56	0.403	2.02	4.539	69.2%	67.4%
12/02/2010	MAÑANA	0.825	4.13	0.324	1.62	2.505	60.7%	
12/02/2010	MEDIO DIA	0.877	4.39	0.225	1.13	3.260	74.3%	
12/02/2010	TARDE	0.867	4.34	0.229	1.15	3.190	73.6%	69.6%
15/02/2010	MAÑANA	0.898	4.49	0.164	0.82	3.670	81.7%	
15/02/2010	MEDIO DIA	0.919	4.60	0.117	0.58	4.013	87.3%	
15/02/2010	TARDE	0.940	4.70	0.069	0.35	4.355	92.6%	87.2%
16/02/2010	MAÑANA	1.427	7.14	0.423	2.12	5.020	70.4%	
16/02/2010	MEDIO DIA	1.568	7.84	0.400	2.00	5.840	74.5%	
16/02/2010	TARDE	1.670	8.35	0.325	1.63	6.725	80.5%	75.1%
17/02/2010	MAÑANA	1.798	8.99	0.285	1.42	7.567	84.2%	

Tabla N°12: Continuación.								
17/02/2010	MEDIO DIA	1.920	9.60	0.236	1.18	8.419	87.7%	
17/02/2010	TARDE	2.041	10.21	0.187	0.93	9.272	90.9%	87.6%
18/02/2010	MAÑANA	0.987	4.94	0.326	1.63	3.305	67.0%	
18/02/2010	MEDIO DIA	1.070	5.35	0.297	1.49	3.865	72.2%	
18/02/2010	TARDE	0.991	4.96	0.314	1.57	3.385	68.3%	69.2%
19/02/2010	MAÑANA	1.020	5.10	0.300	1.50	3.598	70.6%	
19/02/2010	MEDIO DIA	1.022	5.11	0.294	1.47	3.638	71.2%	
19/02/2010	TARDE	1.026	5.13	0.288	1.44	3.688	71.9%	71.2%
22/02/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.725	3.63	4.375	54.7%	
22/02/2010	MEDIO DIA	1.032	5.16	0.276	1.38	3.777	73.2%	
22/02/2010	TARDE	1.035	5.17	0.270	1.35	3.822	73.9%	67.3%
23/02/2010	MAÑANA	0.657	3.28	0.308	1.54	1.745	53.1%	
23/02/2010	MEDIO DIA	0.741	3.71	0.258	1.29	2.415	65.2%	
23/02/2010	TARDE	0.691	3.46	0.249	1.24	2.215	64.1%	60.8%
24/02/2010	MAÑANA	1.805	9.03	0.753	3.77	5.260	58.3%	
24/02/2010	MEDIO DIA	1.876	9.38	0.678	3.39	5.990	63.9%	
24/02/2010	TARDE	1.914	9.57	0.598	2.99	6.580	68.8%	63.6%
25/02/2010	MAÑANA	1.974	9.87	0.521	2.61	7.263	73.6%	
25/02/2010	MEDIO DIA	2.029	10.14	0.444	2.22	7.923	78.1%	
25/02/2010	TARDE	2.083	10.42	0.366	1.83	8.583	82.4%	78.0%
26/02/2010	MAÑANA	0.833	4.17	0.325	1.63	2.540	61.0%	
26/02/2010	MEDIO DIA	0.940	4.70	0.211	1.06	3.643	77.5%	
26/02/2010	TARDE	0.825	4.13	0.338	1.69	2.433	59.0%	65.8%
01/03/2010	MAÑANA	0.858	4.29	0.305	1.52	2.766	64.5%	
01/03/2010	MEDIO DIA	0.854	4.27	0.312	1.56	2.712	63.5%	
01/03/2010	TARDE	0.850	4.25	0.318	1.59	2.659	62.6%	63.5%
02/03/2010	MAÑANA	0.792	3.96	0.296	1.48	2.480	62.6%	
02/03/2010	MEDIO DIA	0.812	4.06	0.283	1.42	2.643	65.1%	
02/03/2010	TARDE	0.788	3.94	0.314	1.57	2.371	60.2%	62.6%
03/03/2010	MAÑANA	0.933	4.67	0.316	1.58	3.089	66.2%	
03/03/2010	MEDIO DIA	0.913	4.57	0.324	1.62	2.944	64.5%	
03/03/2010	TARDE	0.893	4.47	0.333	1.67	2.800	62.7%	64.5%
04/03/2010	MAÑANA	1.980	9.90	0.646	3.23	6.670	67.4%	
04/03/2010	MEDIO DIA	1.890	9.45	0.623	3.12	6.335	67.0%	
04/03/2010	TARDE	1.990	9.95	0.622	3.11	6.840	68.7%	67.7%
05/03/2010	MAÑANA	1.963	9.82	0.606	3.03	6.785	69.1%	
05/03/2010	MEDIO DIA	1.968	9.84	0.594	2.97	6.870	69.8%	
05/03/2010	TARDE	1.973	9.87	0.582	2.91	6.955	70.5%	69.8%

Tabla N°12: Continuación.								
08/03/2010	MAÑANA	1.978	9.89	0.570	2.85	7.040	71.2%	
08/03/2010	MEDIO DIA	1.983	9.92	0.558	2.79	7.125	71.8%	
08/03/2010	TARDE	1.988	9.94	0.546	2.73	7.210	72.5%	71.8%
09/03/2010	MAÑANA	1.031	5.16	0.534	2.67	2.484	48.2%	
09/03/2010	MEDIO DIA	1.087	5.44	0.522	2.61	2.824	52.0%	
09/03/2010	TARDE	1.143	5.72	0.510	2.55	3.164	55.4%	51.8%
10/03/2010	MAÑANA	1.199	6.00	0.333	1.67	4.329	72.2%	
10/03/2010	MEDIO DIA	1.255	6.28	0.349	1.74	4.533	72.2%	
10/03/2010	TARDE	1.311	6.56	0.347	1.74	4.819	73.5%	72.6%
11/03/2010	MAÑANA	1.056	5.28	0.472	2.36	2.918	55.3%	
11/03/2010	MEDIO DIA	1.058	5.29	0.464	2.32	2.969	56.1%	
11/03/2010	TARDE	1.050	5.25	0.471	2.36	2.893	55.1%	55.5%
12/03/2010	MAÑANA	1.049	5.24	0.468	2.34	2.902	55.3%	
12/03/2010	MEDIO DIA	1.046	5.23	0.468	2.34	2.889	55.3%	
12/03/2010	TARDE	1.043	5.21	0.467	2.34	2.877	55.2%	55.3%
15/03/2010	MAÑANA	2.031	10.16	0.668	3.34	6.815	67.1%	
15/03/2010	MEDIO DIA	2.087	10.44	0.663	3.32	7.120	68.2%	
15/03/2010	TARDE	2.143	10.72	0.658	3.29	7.425	69.3%	68.2%
16/03/2010	MAÑANA	2.199	11.00	0.532	2.66	8.338	75.8%	
16/03/2010	MEDIO DIA	2.255	11.28	0.482	2.41	8.868	78.6%	
16/03/2010	TARDE	2.311	11.56	0.432	2.16	9.398	81.3%	78.6%
17/03/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.490	2.45	5.550	69.4%	
17/03/2010	MEDIO DIA	1.680	8.40	0.473	2.37	6.035	71.8%	
17/03/2010	TARDE	1.740	8.70	0.482	2.41	6.289	72.3%	71.2%
18/03/2010	MAÑANA	1.813	9.07	0.739	3.70	5.370	59.2%	
18/03/2010	MEDIO DIA	1.883	9.42	0.700	3.50	5.915	62.8%	
18/03/2010	TARDE	1.953	9.77	0.661	3.31	6.460	66.1%	62.7%
19/03/2010	MAÑANA	1.521	7.61	0.473	2.37	5.240	68.9%	
19/03/2010	MEDIO DIA	1.560	7.80	0.466	2.33	5.470	70.1%	
19/03/2010	TARDE	1.459	7.30	0.472	2.36	4.935	67.6%	68.9%
22/03/2010	MAÑANA	1.451	7.26	0.469	2.35	4.910	67.7%	
22/03/2010	MEDIO DIA	1.420	7.10	0.469	2.34	4.757	67.0%	
22/03/2010	TARDE	1.389	6.95	0.468	2.34	4.605	66.3%	67.0%
23/03/2010	MAÑANA	0.578	2.89	0.125	0.63	2.265	78.4%	
23/03/2010	MEDIO DIA	0.590	2.95	0.134	0.67	2.280	77.3%	
23/03/2010	TARDE	0.770	3.85	0.129	0.65	3.205	83.2%	79.6%
24/03/2010	MAÑANA	0.838	4.19	0.133	0.67	3.523	84.1%	
24/03/2010	MEDIO DIA	0.934	4.67	0.135	0.68	3.993	85.5%	
24/03/2010	TARDE	1.030	5.15	0.137	0.69	4.463	86.7%	85.4%

Tabla N°12: Continuación.								
25/03/2010	MAÑANA	1.126	5.63	0.393	1.97	3.663	65.1%	
25/03/2010	MEDIO DIA	1.222	6.11	0.413	2.07	4.043	66.2%	
25/03/2010	TARDE	1.318	6.59	0.433	2.17	4.423	67.1%	66.1%
26/03/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.532	2.66	5.342	66.8%	
26/03/2010	MEDIO DIA	1.680	8.40	0.482	2.41	5.992	71.3%	
26/03/2010	TARDE	1.740	8.70	0.432	2.16	6.542	75.2%	71.1%
29/03/2010	MAÑANA	1.974	9.87	0.817	4.08	5.787	58.6%	
29/03/2010	MEDIO DIA	2.029	10.14	0.733	3.67	6.477	63.9%	
29/03/2010	TARDE	2.083	10.42	0.817	4.08	6.332	60.8%	61.1%
30/03/2010	MAÑANA	2.138	10.69	0.789	3.94	6.743	63.1%	
30/03/2010	MEDIO DIA	2.192	10.96	0.789	3.94	7.016	64.0%	
30/03/2010	TARDE	2.247	11.23	0.789	3.94	7.288	64.9%	64.0%
31/03/2010	MAÑANA	2.301	11.51	0.799	3.99	7.511	65.3%	
31/03/2010	MEDIO DIA	2.356	11.78	0.888	4.44	7.336	62.3%	
31/03/2010	TARDE	2.410	12.05	0.799	3.99	8.056	66.9%	64.8%
01/04/2010	MAÑANA	0.987	4.94	0.326	1.63	3.305	67.0%	
01/04/2010	MEDIO DIA	0.997	4.99	0.320	1.60	3.385	67.9%	
01/04/2010	TARDE	0.899	4.50	0.296	1.48	3.015	67.1%	67.3%
02/04/2010	MAÑANA	0.873	4.37	0.284	1.42	2.945	67.5%	
02/04/2010	MEDIO DIA	0.829	4.15	0.269	1.35	2.800	67.6%	
02/04/2010	TARDE	0.785	3.93	0.254	1.27	2.655	67.6%	67.6%
05/04/2010	MAÑANA	0.741	3.71	0.239	1.20	2.510	67.7%	
05/04/2010	MEDIO DIA	0.697	3.49	0.224	1.12	2.365	67.9%	
05/04/2010	TARDE	0.653	3.27	0.209	1.05	2.220	68.0%	67.9%
06/04/2010	MAÑANA	0.609	3.05	0.194	0.97	2.075	68.1%	
06/04/2010	MEDIO DIA	0.565	2.83	0.179	0.90	1.930	68.3%	
06/04/2010	TARDE	0.521	2.61	0.164	0.82	1.785	68.5%	68.3%
07/04/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.725	3.63	4.375	54.7%	
07/04/2010	MEDIO DIA	1.880	9.40	0.780	3.90	5.500	58.5%	
07/04/2010	TARDE	1.790	8.95	0.756	3.78	5.170	57.8%	57.0%
08/04/2010	MAÑANA	1.947	9.73	0.585	2.92	6.810	70.0%	
08/04/2010	MEDIO DIA	2.042	10.21	0.500	2.50	7.708	75.5%	
08/04/2010	TARDE	2.137	10.68	0.416	2.08	8.605	80.5%	75.3%
09/04/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.725	3.63	4.375	54.7%	
09/04/2010	MEDIO DIA	1.610	8.05	0.723	3.62	4.435	55.1%	
09/04/2010	TARDE	1.608	8.04	0.721	3.61	4.435	55.2%	55.0%
12/04/2010	MAÑANA	1.801	9.01	0.719	3.60	5.410	60.1%	
12/04/2010	MEDIO DIA	1.729	8.65	0.717	3.59	5.060	58.5%	
12/04/2010	TARDE	1.855	9.28	0.715	3.58	5.700	61.5%	60.0%

Tabla N°12: Continuación.								
13/04/2010	MAÑANA	0.833	4.17	0.325	1.63	2.540	61.0%	
13/04/2010	MEDIO DIA	0.877	4.39	0.321	1.61	2.780	63.4%	
13/04/2010	TARDE	0.890	4.45	0.300	1.50	2.950	66.3%	63.6%
14/04/2010	MAÑANA	0.924	4.62	0.290	1.45	3.167	68.6%	
14/04/2010	MEDIO DIA	0.952	4.76	0.278	1.39	3.372	70.8%	
14/04/2010	TARDE	0.981	4.90	0.265	1.33	3.577	72.9%	70.8%
15/04/2010	MAÑANA	0.792	3.96	0.253	1.26	2.696	68.1%	
15/04/2010	MEDIO DIA	0.790	3.95	0.240	1.20	2.748	69.6%	
15/04/2010	TARDE	0.770	3.85	0.298	1.49	2.361	61.3%	66.3%
16/04/2010	MAÑANA	0.762	3.81	0.309	1.54	2.267	59.5%	
16/04/2010	MEDIO DIA	0.751	3.76	0.331	1.66	2.099	55.9%	
16/04/2010	TARDE	0.740	3.70	0.354	1.77	1.932	52.2%	55.9%
19/04/2010	MAÑANA	1.980	9.90	0.646	3.23	6.670	67.4%	
19/04/2010	MEDIO DIA	1.970	9.85	0.645	3.23	6.625	67.3%	
19/04/2010	TARDE	1.900	9.50	0.649	3.25	6.255	65.8%	66.8%
20/04/2010	MAÑANA	1.870	9.35	0.650	3.25	6.102	65.3%	
20/04/2010	MEDIO DIA	1.830	9.15	0.651	3.26	5.894	64.4%	
20/04/2010	TARDE	1.790	8.95	0.653	3.26	5.687	63.5%	64.4%
21/04/2010	MAÑANA	1.600	8.00	0.490	2.45	5.550	69.4%	
21/04/2010	MEDIO DIA	1.690	8.45	0.462	2.31	6.139	72.7%	
21/04/2010	TARDE	1.650	8.25	0.423	2.12	6.135	74.4%	72.1%
22/04/2010	MAÑANA	1.697	8.48	0.391	1.96	6.526	76.9%	
22/04/2010	MEDIO DIA	1.722	8.61	0.358	1.79	6.819	79.2%	
22/04/2010	TARDE	1.747	8.73	0.324	1.62	7.111	81.4%	79.2%
23/04/2010	MAÑANA	1.521	7.61	0.473	2.37	5.240	68.9%	
23/04/2010	MEDIO DIA	1.544	7.72	0.500	2.50	5.220	67.6%	
23/04/2010	TARDE	1.560	7.80	0.569	2.85	4.955	63.5%	66.7%
26/04/2010	MAÑANA	1.581	7.90	0.610	3.05	4.853	61.4%	
26/04/2010	MEDIO DIA	1.600	8.00	0.658	3.29	4.711	58.9%	
26/04/2010	TARDE	1.620	8.10	0.706	3.53	4.568	56.4%	58.9%
27/04/2010	MAÑANA	0.578	2.89	0.121	0.61	2.285	79.1%	
27/04/2010	MEDIO DIA	0.587	2.94	0.212	1.06	1.875	63.9%	
27/04/2010	TARDE	0.567	2.84	0.231	1.16	1.680	59.3%	67.4%
28/04/2010	MAÑANA	0.566	2.83	0.298	1.49	1.342	47.4%	
28/04/2010	MEDIO DIA	0.561	2.80	0.253	1.27	1.539	54.9%	
28/04/2010	TARDE	0.555	2.78	0.108	0.54	2.237	80.6%	60.9%
29/04/2010	MAÑANA	0.743	3.72	0.367	1.84	1.880	50.6%	
29/04/2010	MEDIO DIA	0.854	4.27	0.322	1.61	2.660	62.3%	
29/04/2010	TARDE	0.654	3.27	0.266	1.33	1.940	59.3%	57.4%

Tabla N°12: Continuación.								
30/04/2010	MAÑANA	0.661	3.31	0.217	1.09	2.220	67.1%	
30/04/2010	MEDIO DIA	0.617	3.08	0.167	0.83	2.250	73.0%	
30/04/2010	TARDE	0.572	2.86	0.116	0.58	2.280	79.7%	73.3%

Anexo N°14



Figura No 10: Clico del agua