

# **ESTUDIO DE TRATABILIDAD Y COEXPOSICIÓN A ARSÉNICO Y FLUORUROS EN AGUA DE BEBIDA**

**Proyecto interno TC1305.1**

**Informe final**



**COORDINACIÓN DE TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA**

**SUBCOORDINACIÓN DE POTABILIZACIÓN**

**Autores:**

**M. en I. María de Lourdes Rivera Huerta**

**M. en C. Juana Enriqueta Cortés Muñoz**

**Dra. Alejandra Martín Domínguez**

**M en A. Leticia Montellano Palacios**

**M. en C. Fabián Almazán García**

**M. en C. Celestino García Gómez**

**Biol. Areli Gómez Rojas**

## RESUMEN

En la República Mexicana se tienen por lo menos 15 acuíferos en los que coexisten fluoruros y arsénico poniendo en riesgo la salud de la población que ingiere de manera habitual el agua extraída de ellos, dado su potencial para alterar el sistema hormonal.

Se llevó a cabo un estudio de tipo ecológico (encuesta y datos de monitoreo del agua), a fin de evaluar la co-exposición a estas especies químicas y su posible asociación con las tasas de mortalidad por enfermedades endócrinas. Con la información disponible para cuatro municipios del estado de Guanajuato y once de Hidalgo, se estimó que el agua de consumo, aporta al organismo humano entre el 56 y el 78% de los fluoruros, y prácticamente el 100% del arsénico. Aunque este tipo de estudios no son suficientemente robustos para determinar causalidad, se identificaron asociaciones significativas entre las concentraciones de arsénico y fluoruros en agua y las tasas de mortalidad debidas a enfermedades endócrinas y metabólicas, Diabetes mellitus tipo II, enfermedades hipertensivas y del aparato urinario e insuficiencia renal, lo que evidencia las necesidades de tratamiento del agua para consumo humano.

Por lo que respecta al tratamiento de agua para remover simultáneamente fluoruros y arsénico, el estudio se enfocó a evaluar la capacidad de adsorción de cuatro materiales: carbón de hueso (CH), alúmina activada (AA), el lodo (en su forma seca) obtenido como subproducto del proceso de electrocoagulación (LEC) y el de una planta potabilizadora de clarificación convencional (LLB). Los resultados muestran que la AA es el más eficiente. El costo para potabilizar agua con 2.6 mg/L de fluoruros y 0.1 mg/L de arsénico empleando AA es de \$3.8/m<sup>3</sup>, valor que supera al costo de tratamiento de agua con características similares por un proceso de nanofiltración (obtenido en un estudio previo) que se estima en \$2.5/m<sup>3</sup>.

Del costo de tratamiento con AA el 90% se debe al del material adsorbente. Ante esta perspectiva es conveniente profundizar el estudio con el LEC y el LLB, ya que estos materiales son remanentes de otros procesos y no implican un costo por el material en sí más que el del transporte al lugar donde se emplearían.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS DE REMOCIÓN DE FLUORUROS Y ARSÉNICO</b>	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Arsénico y fluoruros en agua subterránea</b>	<b>5</b>
3.1.1	Estado del conocimiento sobre los procesos de remoción de arsénico y fluoruros en combinación.	6
3.1.2	Coagulación química	6
3.1.3	Medios adsorbentes	7
3.1.4	Electrocoagulación	9
3.1.5	Nanofiltración	9
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>11</b>
<b>4.1</b>	<b>Adsorción</b>	<b>11</b>
4.1.1	Pruebas con carbón de hueso	11
4.1.1.1	Datos técnicos del carbón de hueso	11
4.1.1.2	Calidad del agua empleada	11
4.1.1.3	Técnicas analíticas	12
4.1.1.4	Preparación del medio adsorbente	12
4.1.1.5	Empaque de minicolumnas	13
4.1.1.6	Pruebas de desorción de bióxido de carbono.	14
4.1.1.7	Preparación del agua adicionada con fluoruros y arsénico	15
4.1.1.8	Diseño experimental aplicado	15
4.1.1.9	Operación de las minicolumnas de carbón de hueso	17
4.1.2	Pruebas con el adsorbente Phoslock	18
4.1.2.1	Caracterización química del adsorbente Phoslock	19
4.1.2.2	Preparación del medio adsorbente	19
4.1.2.3	Preparación del agua utilizada en las pruebas de adsorción	19
4.1.2.3.1	Métodos analíticos	20
4.1.2.3.2	Obtención de las Isotermas de adsorción	20
4.1.3	Pruebas con Lodo proveniente de electrocoagulación, LEC	21
4.1.3.1	Materiales adsorbentes utilizados en esta parte del estudio	21
4.1.3.2	Obtención del LEC	21
4.1.3.3	Caracterización del LEC	23
4.1.3.4	Pruebas de disolución del LEC en función del pH	23
4.1.3.5	Pruebas de adsorción en lotes LEC	24
4.1.3.6	Primera etapa, saturación a 2.5 mg F <sup>-</sup> /L y arsénico de 100 µg/L	24
4.1.3.7	Segunda etapa, saturación a 10.0 mg F <sup>-</sup> /L y arsénico de 100 µg/L	24
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>26</b>
<b>5.1</b>	<b>Adsorción con carbón de hueso</b>	<b>26</b>
5.1.1	Análisis estadístico	57
5.1.1.1.1	Análisis con el programa estadístico Statgraphics centurión para fluoruros	58

5.1.1.1.2	Análisis con el programa estadístico Statgraphics centurión para arsénico	62
<b>5.2</b>	<b>Adsorción con Phoslock</b>	<b>66</b>
5.2.1	Caracterización de Phoslock	66
5.2.1.1	Composición elemental	66
5.2.1.2	Análisis de área superficial y porosidad	66
5.2.1.3	Difracción de rayos X	67
5.2.1.4	Microscopía electrónica de barrido SEM	68
5.2.2	Isotermas de adsorción	69
5.2.2.1	Isotermas de adsorción a pH 7.0	69
5.2.2.1.1	Concentración de fluoruros en equilibrio	70
5.2.2.1.2	Obtención de las constantes de adsorción (Langmuir y Freundlich) a pH 7.0	72
5.2.2.1.3	Remoción de arsénico al tiempo de tener las concentraciones en equilibrio de fluoruros.	74
5.2.2.1.4	Isotermas de adsorción a pH 6.0	75
5.2.2.1.5	Obtención de las constantes de adsorción (Langmuir y Freundlich) a pH 6.0	75
5.2.2.1.6	Eficiencias de remoción de arsénico en el equilibrio de las concentraciones de fluoruros	78
<b>5.3</b>	<b>Adsorción con lodos de hidróxidos de aluminio</b>	<b>78</b>
5.3.1	Caracterización del Lodo producido por electrocoagulación	78
5.3.1.1	Composición elemental	78
5.3.1.2	Área superficial y porosidad	79
5.3.1.3	Difracción de Rayos X	79
5.3.1.4	Microscopía electrónica de Barrido	83
5.3.2	Pruebas de disolución del material adsorbente LEC en función del pH	89
5.3.3	Pruebas de adsorción en lotes (Isotermas de adsorción).	89
5.3.4	Resultados de los medios adsorbentes a flujo continuo en minicolumnas	95
5.3.4.1	Pruebas de saturación con 2.5 mg F <sup>-</sup> /L y 100 µg/L de arsénico. 1 <sup>ra</sup> etapa	95
5.3.4.1.1	Alúmina activada (AA)	95
5.3.4.1.2	Lodo generado por electrocoagulación (LEC)	99
5.3.4.2	Pruebas de saturación con 10.0 mg F <sup>-</sup> /L y 100 µg/L de arsénico. 2 <sup>da</sup> etapa	103
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>109</b>
6.1	Coagulación química con sulfato de aluminio	109
6.2	Adsorción sobre carbón de hueso	110
6.3	Adsorbentes a flujo continuo en minicolumnas alúmina activada (AA), lodo generado por electrocoagulación (LEC) y lodo químico de la planta Los Berros (LLB).	111
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>

## **1 INTRODUCCIÓN**

## **2 OBJETIVOS**

- a) Analizar la factibilidad técnica y económica del tratamiento para remover simultáneamente flúor y arsénico de agua para consumo humano
- b) Caracterizar la coexposición a flúor y arsénico por agua de bebida en una localidad seleccionada cuya fuente de abastecimiento contenga ambos contaminantes.

### 3 MÉTODOS DE REMOCIÓN DE FLUORUROS Y ARSÉNICO

#### 3.1 Arsénico y fluoruros en agua subterránea

Debido a la toxicidad crónica ocasionada por fluoruros ( $F^-$ ) y arsénico (As) en agua subterránea, estos agentes son considerados como contaminantes emergentes en países como India, México, China, Argentina y Bangladesh.

Diversos acuíferos del norte de México (Chihuahua, Sonora, Durango y San Luis Potosí) están asentados sobre rocas ígneas y rocas sedimentarias, las cuales son la principal fuente de arsénico y fluoruros que naturalmente afectan la calidad del agua. La composición geológica aunada a las condiciones de aridez, elevada evaporación, escasez de lluvias y alta extracción originan mayores concentraciones de estos elementos (Alarcón *et al*, 2012).

En un estudio realizado por Martínez *et al*, 2013 en agua de pozos profundos de la ciudad de Durango detectaron concentraciones de fluoruros en el orden de 1.1 hasta 7.6 mg/L y respecto al arsénico entre 0.026 y 0.076 mg/L. Mientras que en cinco comunidades del Valle de Guadiana (Durango) reportan niveles de fluoruros de 1.7 a 17.8 mg/L y para arsénico el intervalo fue de 0.10 a 0.140 mg/L. En otro estudio realizado por los mismos autores, en este caso sobre la calidad del agua embotellada que se distribuye en la Ciudad de Durango, detectaron concentraciones de fluoruros entre 1.12 y 5.15 mg/L; para arsénico los niveles estuvieron entre 0.001 y 0.076 mg/L. Lo anterior revela que las empresas embotelladoras emplean sistemas de tratamiento de agua ineficaces.

Otro ejemplo de contaminación de las fuentes de abastecimiento con estos elementos se presenta en la zona del bajío, particularmente en Salamanca, Guanajuato. En esta región el Comité Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (CMPAS) tiene donde información del monitoreo de la calidad del agua de 37 pozos que actualmente opera, demuestra que 13 de ellos rebasan los límites permisibles de la NOM 127 para arsénico y fluoruros. Las concentraciones promedio de arsénico en dichos pozos están entre 0.026 y 0.063 mg/L, mientras que las concentraciones de fluoruros van de 1.6 a 3.4 mg/L.

Se ha demostrado la presencia de fluoruros y arsénico con altas concentraciones en áreas de actividad geotérmica. Un ejemplo de ello es lo que sucede en la localidad de Los azufres, Michoacán, en donde se han encontrado concentraciones de arsénico en agua comprendidas entre 5.1 y 24 mg/L, mientras que para fluoruros los niveles han sido de 9 a 17 mg/L. En el poblado de Araró del mismo estado el As se encontrado en rangos de 0.01 a 63 mg/L y los iones fluoruros con valores que van de 0.7 a 4.2 mg/L

En áreas con acuíferos aluviales (Aldama, Chihuahua), Reyes *et al*, 2010 encontraron rocas de riolita con contenidos de arsénico de 2.3 a 540 mg/Kg y fluoroapatita 41 mg/Kg. En áreas con actividad minera (como es el caso de la Cuenca Independencia, Guanajuato) se han revelado niveles de arsénico que llegan hasta 0.12 mg/L y fluoruros hasta 16 mg/L (Alarcón *et al*, 2012).

### 3.1.1 Estado del conocimiento sobre los procesos de remoción de arsénico y fluoruros en combinación.

Debido a la problemática que existe en muchas regiones por la presencia de arsénico y fluoruros en agua de abastecimiento, diversas tecnologías han sido desarrolladas y aplicadas en el tratamiento de agua para remover estos elementos de forma simultánea; entre ellas destacan, coagulación química, coagulación-adsorción, adsorción en carbón de hueso y alúmina activada, intercambio iónico, nanofiltración y ósmosis inversa.

### 3.1.2 Coagulación química

En América Latina uno de los procesos que es utilizados para la remoción de fluoruros y arsénico es la coagulación química/filtración (Alarcón *et al*, 2012). Los coagulantes que son empleados para remover arsénico en agua son el cloruro férrico y el sulfato de aluminio, teniendo una mejor remoción el primero (CEPIS 2006).

El proceso de coagulación con sales de hierro y aluminio, cuyo principal mecanismo de remoción es la adsorción sobre los flóculos de hidróxidos de hierro o aluminio, es aplicable particularmente para remover arsénico de aguas con baja dureza y baja salinidad. Esta tecnología es apropiada por su simplicidad y rentabilidad. Una desventaja es la posibilidad de la presencia de residuales de aluminio o hierro en el agua tratada. La coagulación con sales de hierro no remueve el fluoruro, pero su empleo es muy adecuado para el tratamiento de agua cuando el objetivo del tratamiento es sólo el arsénico (Ingallinella, et al., 2011). Un estudio realizado por Almazán (2011) demostró que el sulfato de aluminio tiene superiores eficiencias de remoción de fluoruros que el sulfato férrico.

El proceso ArcIS-UNR® para remover arsénico y fluoruros simultáneamente y que consiste en un proceso de coagulación-adsorción con un ajuste inicial de pH y dos etapas de filtración (filtración ascendente en grava y filtración rápida) ya está siendo aplicada en Argentina en plantas a escala real para agua con concentraciones de hasta 2 mg/L de fluoruros y 200 µg/L de arsénico total, sin embargo Ingallinella y colaboradores (2011) realizaron un estudio a escala laboratorio y piloto para optimizar el proceso para cuando la concentración de fluoruro inicial es mayor a 2 mg/L. El proceso se basa en coagulación con policloruro de aluminio y filtración para remover fluoruros (2.8 a 3.1 mg/L) y arsénico (70 a 90 µg/L) simultáneamente. El tratamiento consiste de acidificación (a pH 6.4 a 6.6), seguida por la adición de PAC (dosis de 100 a 125 mg/L); filtración a través de lecho de partículas gruesas (grava de 12 a 20 mm de diámetro) en flujo ascendente; alcalinización (a pH 7.2 a 7.6) y finalmente filtración rápida en lecho de arena sílice (0.5 a 0.6 mm de diámetro) de flujo descendente. Este proceso de tratamiento permitió que el arsénico y el fluoruro se removieran simultáneamente, las eficiencias alcanzadas variaron entre 75 a 85% para el arsénico y del 50 a 55% para el fluoruro. La concentración en el agua ya tratada de estas especies fueron < 20 µg/L para arsénico y de 1.3 a 1.7 mg/L. Fue necesaria la alcalinización del efluente del filtro grueso para lograr una concentración de aluminio residual en el agua filtrada menor a 0.2 mg/L. En ensayos a escala laboratorio la



concentración de aluminio varió entre 0.14 a 0.19 mg/L, mientras que en las pruebas a escala piloto (0.4 L/min) las concentraciones fueron de 0.03 mg/L.

Por otro lado, al utilizar hidróxidos de aluminio  $AlO_xH_y$  en dosis comprendidas entre 40 y 80 mg/L, Ruipiling *et al* 2012 revelan eficiencias de remoción de fluoruros del 50 a 60 % y para arsénico en el orden de 93 a 97 %. En este estudio las pruebas se realizaron en lotes donde la concentración inicial de As (V) fue 15.0 mg/L y  $F^-$  12.5 mg/L y el tiempo de agitación fueron 8 horas a pH 7.5.

En una patente publicada por Golden *et al* 2002, propusieron un sistema de precipitación química a flujo continuo con sales de cloruro de calcio y adsorción sobre cloruro férrico. El proceso consiste en la oxidación de arsenito(III) a arsenato(V), después el pH es ajustado en un intervalo de 5 a 8, posteriormente se adiciona cloruro de calcio y cloruro férrico con la aplicación de polímero floculante, finalmente una etapa de sedimentación y filtración.

Piñón *et al* 2003, aplicaron sulfato de aluminio en dosis de 450 mg/L y 1 mg/L de polímero aniónico como floculante a pH 7.0 a un agua que contenía fluoruros y arsénico en concentraciones de 5.9 y 0.134 mg/L respectivamente. El sistema fue operado a un caudal de 5 L/s. En esta investigación reportan eficiencias de remoción de fluoruros del 77% y para arsénico de 99%.

### 3.1.3 Medios adsorbentes

Yu *et al*, 2010 utilizaron óxidos de hierro y cerio como adsorbentes para remover arsenato en agua y a su vez evaluaron el efecto de la presencia de iones fluoruro y fosfatos, La presencia de fósforo resultó ser un fuerte inhibidor de la capacidad de adsorción en una relación As-P: 1 a 10, mientras que para el caso de la relación As-F este último solo en altas concentraciones afecta la capacidad del medio adsorbente (Figura 3.1). Esto fue realizado en experimentos en lotes a un valor de pH igual a 5.0 y filtrado en membranas de  $0.45\mu m$ . La concentración de arsenato fue de  $13.3\mu mol/L$ .

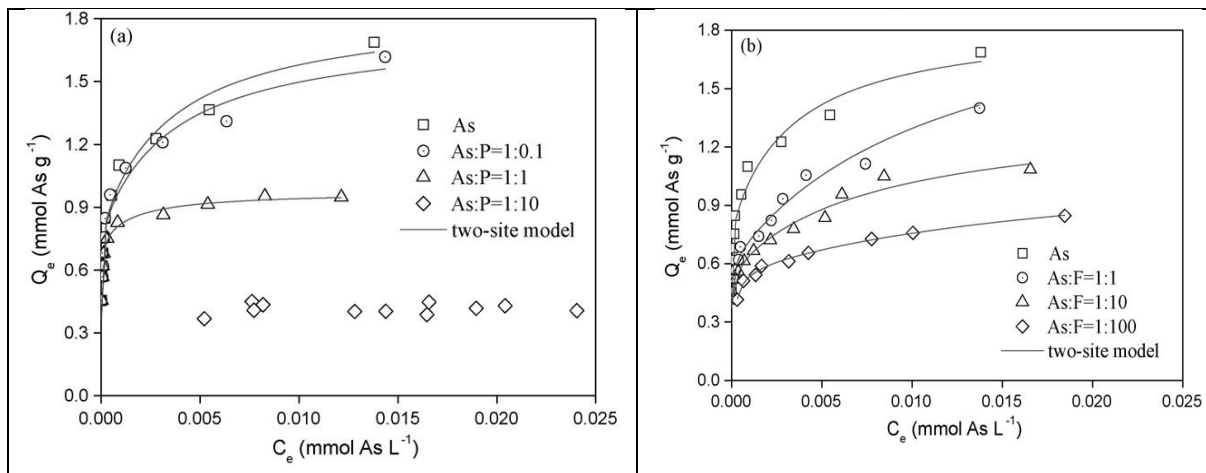


Figura 3.1. Capacidades de adsorción en presencia de P y F.

La alúmina activada ha sido una tecnología eficiente que ha sido probada para la remoción de fluoruros y arsénico de forma simultánea (Alarcón *et al* 2012). En un sistema en lote Wei *et al*, 2011, evaluaron alúmina activada sintetizada para remover fluoruro y arsénico en una misma matriz, demostraron que dicho medio tuvo una gran afinidad por los iones fluoruros con una capacidad de 450 mg/g, con lo que respecta al arsénico lograron reducir una concentración de 100 µg/L a 10 µg/L.

En un estudio piloto realizado en la comunidad de Why, Arizona en EUA con agua subterránea que contenía 3 mg/L de fluoruros y 0.15 mg/L de arsénico se observó que la alúmina activada es un adsorbente efectivo para tratar este tipo de agua. Los resultados principales fueron a) el arsénico se adsorbe preferencialmente sobre la alúmina activada, b) se requiere una solución más concentrada de hidróxido de sodio durante la regeneración del medio para arsénico (4%) que para fluoruros (1%), c) la capacidad de la alúmina para remover fluoruros decrece por cualquier remanente de arsénico en la alúmina. El estudio piloto indicó que para tratar agua con los dos contaminantes combinados es preferible emplear dos columnas de adsorción en serie. Los costos de operación estimados para una planta a escala real para pequeñas comunidades es de 19 ¢/1000 gal (Rubel y Williams, 1980) lo que equivale a 0.61 pesos mexicanos/m<sup>3</sup>. Para este estudio se consideró como punto de rompimiento o quiebre cuando una muestra del agua tratada excedía la concentración de 2.4 mg/L de F<sup>-</sup> o el punto en el cual el promedio de las concentraciones de agua tratada por la columna excedía un valor de 1.1 mg/L de fluoruro, no hubo evidencia de saturación del lecho por arsénico. Cabe aclarar que este estudio fue realizado en 1980 cuando en EUA se consideraba como el nivel máximo de arsénico era 0.050 mg/L.

Streat *et al* 2008 trabajaron con una solución de arsenato y fluoruros usando como adsorbente hidróxido férrico en pruebas en lotes. Para un valor de pH igual a 4 encontraron las mejores capacidades de adsorción de este material; para fluoruros el valor fue de 34.2 mg/g y para arsenato 19 mg/g.

Yulin *et al* 2011 estudiaron la adsorción de fluoruros y arsénico mediante goethita en un sistema en batch, los resultados son mostrados en la Tabla 3.1, se observa una mejor afinidad del adsorbente hacia el arsénico que por los iones fluoruro.

**Tabla 3.1. Capacidad de adsorción de fluoruros y arsénico As(V) en goethita.**

Aniones	Conc. inicial (mg/L)	qe (mg/g)
Fluoruros	5.1	0.191
	10.2	0.315
	25.1	0.518
Arsénico, As(V)	2.51	0.247
	5.02	0.482
	10.12	0.941

### 3.1.4 Electrocoagulación

Xu *et al* 2011 utilizaron un proceso de electro oxidación y electrocoagulación para la remoción simultanea de arsénico (III) y fluoruros en agua, utilizaron electrodos de Fe y Al conectados a una fuente de poder para generar los hidróxidos de ambos elementos Figura 3.2.

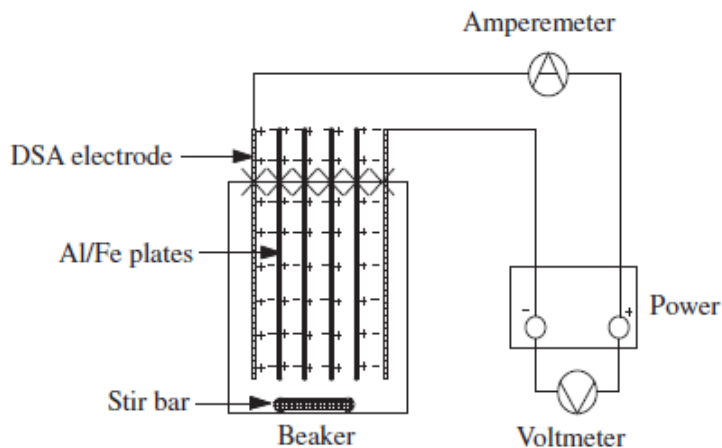


Figura 3.2. Sistema de remoción simultanea de As y F<sup>-</sup>.

En este trabajo se estudiaron diferentes matrices a un tiempo de retención de 40 min conformadas por las siguientes condiciones mostradas en la Tabla 3.2. La concentración de As(III) fue de 1.0 mg/L y la de F<sup>-</sup> fue de 4.5 mg/L.

Tabla 3.2. Condiciones evaluadas y eficiencias de remoción

Condición experimental	Remoción de F <sup>-</sup> (%)	Remoción de As (%)
4 electrodos de hierro	8.1	100
4 electrodos de aluminio	89	7.5
3 electrodos de aluminio y 1 de hierro	81	98

El pH óptimo para tener una eficiente remoción tanto de As como de F<sup>-</sup> estuvo en un rango de 5 a 7. La densidad de corriente favorable fue de 4mA/cm<sup>2</sup>.

### 3.1.5 Nanofiltración

La nanofiltración es un proceso de filtración por membrana capaz de remover arsénico y fluoruros de forma significativa del agua. Este proceso requiere un tratamiento previo para retirar los sólidos en suspensión y otras partículas de la fuente a alimentación (EPA 2000). En un estudio realizado por Calderón *et al* (2012), utilizaron un equipo de nanofiltración para potabilizar agua de mina que contenía arsénico y fluoruros en

concentraciones de 50  $\mu\text{g/L}$  y 2.16  $\text{mg/L}$  respectivamente. El equipo consistió de 2 etapas (2:1 por el lado del rechazo), con seis vasijas de presión de 3 membranas de 4" X 40", en la primer etapa fueron 4 vasijas y en la segunda 2. El rechazo nominal fue del 89%. Para el caso del arsénico, se lograron eficiencias de remoción del 80% y para fluoruros la eficiencia del 50% aproximadamente en todas las pruebas realizadas.

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Adsorción

#### 4.1.1 Pruebas con carbón de hueso

Se utilizó carbón de hueso ya que en un estudio previo (Proyecto TC1108.1) “Análisis técnico y económico de tecnologías de remoción de fluoruros” fue uno de los adsorbentes que mostró mayor capacidad de adsorción de fluoruros y en un estudio subsecuente “Análisis técnico económico de tecnologías para remoción de fluoruros 2ª parte y evaluación de riesgos a la salud por exposición a fluoruros presentes en agua” (Proyecto interno TC1203.1) resultó ser competente económicamente con la alúmina activada que es reconocida por su alta capacidad de adsorción de fluoruros. Según la literatura, carbón de hueso también tiene la capacidad de adsorber arsénico por lo que se decidió evaluarlo para la remoción simultánea de estos contaminantes.

##### 4.1.1.1 Datos técnicos del carbón de hueso

El carbón de hueso es fabricado por la compañía APELSA Guadalajara S. A. de C.V. a base de hueso de ganado vacuno y es conocido comercialmente con el nombre de Fijafluor. Las propiedades del material utilizado se muestran en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Datos técnicos del carbón de hueso.**

Datos técnicos	Valor
Número de lodo (mg l/g)	50
pH	8 - 9.5
Granulometría U.S. Std. Sieve	8 – 30 (2.36-0.6 mm)
Mayor que malla	8 5%
Menor que malla	30 5%
Dureza adimensional	95
Densidad aparente	0.75
Humedad al empacar	4% máx.
Fosfato Tricálcico Hidroxiapatita	80 -85 %
Capacidad de retención	1 a 1.5 g de F/kg de carbón de hueso
Empaque	40 kg

##### 4.1.1.2 Calidad del agua empleada

Para la realización de estos experimentos se utilizó agua que abastece al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En la Tabla 4.2 se muestran los valores de algunos parámetros de calidad del agua de esa fuente, que fueron medidos en el año 2002 (González *et al*, 2002). Estos datos se presentan sólo como referencia.

**Tabla 4.2. Calidad del agua utilizada, fuente de abastecimiento pozo profundo.**

Parámetro	Valores	Parámetro	Valores
Aluminio (mg/L)	0.01	Mercurio (mg/L)	<0.005
Dureza total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	79.00	Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L)	1.89
Fluoruros (mg/L)	0.50	Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> mg/L)	0.007
Color verdadero (PtCo)	5.83	pH	7.25
Cloro residual libre (mg/L)	0.80	Sodio (mg/L)	13.93
Cobre (mg/L)	<0.05	Sólidos disueltos totales (mg/L)	192.30
Conductividad eléctrica (µS/cm)	219.0	Sulfatos (mg/L)	17.50
Cloruros (mg/L)	7.76	Turbiedad (NTU)	1.05
Hierro (mg/L)	<0.05	Zinc (mg/L)	<0.05

#### 4.1.1.3 Técnicas analíticas

La concentración de iones F<sup>-</sup> se determinó con un electrodo selectivo de iones (Thermo Scientific 9609 BNWP) y para el caso del As se utilizó un equipo arsenator Wagtech W1000143. Con el fin de corroborar los resultados de este último, se analizaron muestras dobles por absorción atómica (generación de hidruros). El pH se midió con un potenciómetro Orion 420.



**Figura 4.1. Equipos con electrodo de ión selectivo para fluoruros (izq) y arsenator (der).**

#### 4.1.1.4 Preparación del medio adsorbente

El carbón de hueso fue molido y tamizado hasta obtener partículas uniformes a un tamaño de 0.4018 mm, posteriormente fue lavado con agua destilada para retirar polvos finos y secado en estufa a 100°C durante 15 horas para asegurar que el material no tuviera humedad al momento en que se pesara la cantidad requerida. Este procedimiento se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2. Preparación del carbón de hueso para ser colocado en minicolumnas a) molienda, b) tamizado, c) lavado con agua desionizada y d) secado a 100°C

#### 4.1.1.5 Empaque de minicolumnas

Una vez que el carbón de hueso con  $D_p = 0.4018$  mm fue secado, se pesó la cantidad deseada para cada experimento y se hidrató con agua destilada, con el fin de desplazar el aire presente en los poros del adsorbente. Después el medio se colocó en las columnas de acrílico de 2 cm de diámetro cuidando que la caída del material hacía la columna fuera uniforme. Este procedimiento (Figura 4.3) fue realizado siempre que se realizaron ensayos de este tipo).

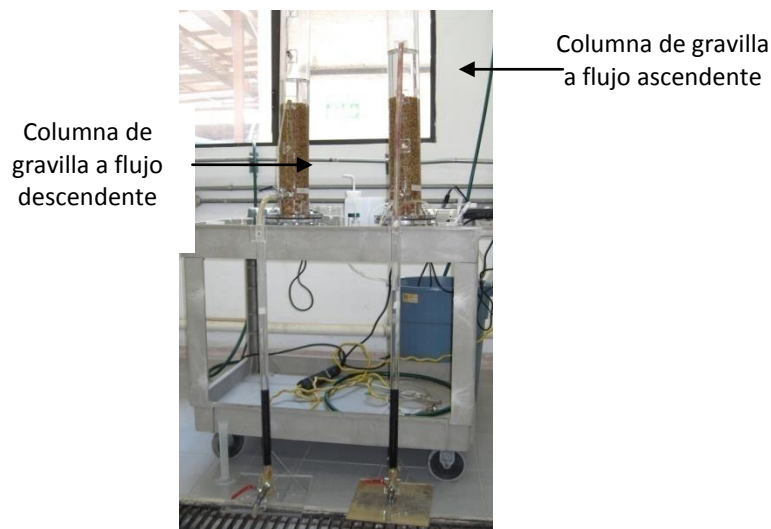


Figura 4.3. Empaque del carbón de hueso en las minicolumnas.

#### 4.1.1.6 Pruebas de desorción de bióxido de carbono.

La presencia de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) disuelto en agua natural es función del pH y de la temperatura. Este gas que es un ácido débil se presenta en el agua en equilibrio con las especies productos de su ionización: bicarbonatos y carbonatos. El bióxido de carbono se encuentra en el agua a valores de pH menores de 8.0 y es más importante su concentración a medida que el pH disminuye. En pruebas anteriores de adsorción en minicolumnas se notó la desorción de este gas en los lechos de adsorbente y que la acumulación del mismo entre los granos del medio adsorbente provocaba que el agua no fluyera a través del lecho. Dado lo anterior se realizaron algunas pruebas para remover el gas antes de que el agua llegara al medio adsorbente.

Se hicieron pruebas a dos valores de pH iniciales, estos fueron 5.0 y 5.5 para desorber el  $\text{CO}_2$ , para el ajuste del pH se utilizó hidróxido de sodio (4%) y ácido clorhídrico (50%). Se instalaron 2 columnas (flujo ascendente y descendente) de 9 cm de diámetro con una altura de gravilla de 30 cm ( $D_p = 2.35$  mm) cada una, posteriormente por gravedad se operaron 2 minicolumnas de carbón de hueso ( $D_p = 0.4018$  mm) con una masa de 51.23 g. Se monitoreó el pH en la entrada de las columnas de gravilla, a la salida de esta y en la salida de las minicolumnas de carbón de hueso. Dicho experimento se operó a un caudal de 26 mL/min mediante una bomba peristáltica. En la Figura 4.4 se muestran las columnas de gravilla y minicolumnas de carbón de hueso utilizadas.



**Figura 4.4. Operación de columnas de gravilla a flujo descendente y ascendente para desorción de  $\text{CO}_2$ .**

Una vez realizados estos experimentos, se comprobó que ambas columnas de gravilla (flujo ascendente y flujo descendente) fueron eficientes para desorber  $\text{CO}_2$  ya que se observó (durante 7 horas de prueba) una acumulación de gas depositado sobre la



superficie de las partículas y el gas no llegó a la minicolumna de carbón de hueso. Debido a que la finalidad de este experimento fue determinar la manera óptima que permitiera una operación de las minicolumnas de carbón de hueso de forma eficiente sin presentarse taponamientos por la acumulación de  $\text{CO}_2$ , se decidió elegir una operación de flujo ascendente en la columna de gravilla (por ser la forma más práctica en la regulación de caudales) y después flujo descendente como alimentación a las minicolumnas de carbón de hueso. De esta manera se trabajó para en los experimentos con pequeñas columnas.

#### 4.1.1.7 Preparación del agua adicionada con fluoruros y arsénico

Para ajustar las concentraciones de fluoruros y arsénico que se trabajaron en el agua de cada experimento se utilizaron disoluciones de fluoruro de potasio (KF) a una concentración de 20,000 mg/L y arsenato de sodio ( $\text{HAsNa}_2\text{O}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) a 1000 mg/L, ambos grado ACS. De las cuales se tomaron alícuotas y fueron agregadas al volumen de agua requerido. Posteriormente las concentraciones del agua preparada fueron determinadas mediante electrodo de ión selectivo (ISE) y equipo arsenator con el fin de asegurar que el agua tuviera las concentraciones deseadas. El pH fue ajustado mediante la adición de hidróxido de sodio (4%) y ácido clorhídrico (50%).

#### 4.1.1.8 Diseño experimental aplicado

Se realizó un diseño estadístico de experimentos de tipo factorial  $2^4$  en el cual se incluyeron como variables o factores de estudio las concentraciones de fluoruros ( $\text{F}^-$ ) y arsénico (As) en el agua que se someterá a tratamiento, el tiempo de contacto de cama vacía (EBCT) y el pH del agua. La variable de respuesta fue la cantidad de agua tratada hasta la ruptura tanto para fluoruros como para arsénico, la cantidad de agua tratada se expresó como volúmenes de lecho tratado (VL). Las concentraciones de ruptura consideradas fueron las establecidas por la NOM 127 como límites permisibles para estos elementos en agua para uso y consumo humano:  $\text{Ce F}^- = 1.5 \text{ mg/L}$  y  $\text{Ce As} = 0.025 \text{ mg/L}$ . La Tabla 4.3 muestra los factores de estudio y los niveles a los que se realizaron los experimentos.

Para fijar los valores bajo y alto de las variables de estudios se consideró lo siguiente:

- a) La concentración de fluoruro encontrada comúnmente en las fuentes de abastecimiento que tienen problemas de contaminación con este anión van desde 1.5 a 12 mg/L.
- b) Las concentraciones de arsénico encontradas en fuentes de abastecimiento de agua en México con problemas de contaminación de este elemento tienen frecuentemente valores entre 0.025 a 0.5 mg/L.
- c) Los valores elegidos para los tiempos de contacto de lecho vacío (EBCT por su siglas en inglés) están en función de las experiencias obtenidas del proyecto “Análisis técnico económico de tecnologías para remoción de fluoruros 2ª parte y evaluación de riesgos a la salud por exposición a fluoruros presentes en agua” (TC1203.1). En dicho estudio

resultados de pruebas de adsorción a pequeña escala, con carbón de hueso para remoción de fluoruros, mostraron que en el intervalo de 1.3 y 4.0 minutos de EBCT, un valor de 3 minutos logra tratar la mayor cantidad de agua antes de alcanzar el punto de quiebre en el efluente ( $C_e F^- = 1.5 \text{ mg/L}$ ). Cabe mencionar que la concentración de  $F^-$  en el agua antes del tratamiento era de 2.5 mg/L. Los valores de EBCT también están en función del tamaño de grano empleado y de lo que representaría a escala real con un tamaño de grano de 1.5 mm de diámetro. Por ejemplo 3 minutos de EBCT a pequeña escala (pruebas realizadas con diámetro de partícula de 0.4018 mm) demuestra lo que sucedería en un evento a escala real con el mismo tipo de agua para un EBCT de 11.5 minutos de acuerdo al método de RSSCT “Rapid Small Scale Column Testing”. Para el presente estudio se consideró aumentar el tiempo de contacto por el hecho de que además de fluoruros, el agua también contendrá arsénico.

d) Por lo que respecta a los valores de pH, en el mismo estudio mencionado en el párrafo anterior se trabajó en el intervalo de 6.5 y 7.5, se obtuvo como resultado que valores de pH más bajos favorecen la remoción de fluoruros.

e) Por último se menciona que los valores de las variables presentados en la Tabla 4.3 se establecieron de tal forma de dejar preparada una matriz más amplia (diseño de composición central) que incluyera los extremos de las condiciones con valores apropiados de acuerdo a lo mencionado en los incisos anteriores. Esto sólo aplicaría en caso de que el análisis de las respuestas de los tratamientos o experimentos del primer diseño indicara que los modelos no son lineales y que posiblemente se tuviera un óptimo en la región experimental.

**Tabla 4.3. Factores considerados en el trabajo experimental y niveles evaluados, Diseño factorial  $2^4$ .**

Factores evaluados	Niveles		
	Bajo	Centro	Alto
Concentración de fluoruros ( $F^-$ )	3.15	6.08	9.0
Concentración de arsénico (As)	0.107	0.204	0.300
Tiempo de contacto de cama vacía (EBCT)	3.0	3.5	4.0
pH	6.10	6.63	7.15

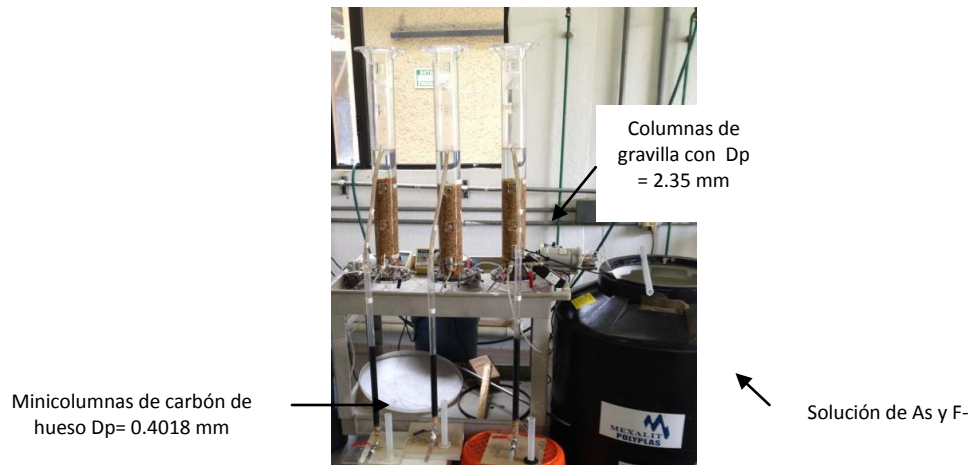
El efecto de los factores mencionados se analizó estadísticamente utilizando el programa Statgraphics centurión versión XV. La Tabla 4.4 muestra la matriz de prueba y el orden que se realizaron las corridas experimentales. También se incluyeron tres repeticiones con valores centrales (corrida 3, 13 y 18) con el fin de incorporar grados de libertad al error y obtener el análisis de varianza (ANOVA). Una vez concluidas las corridas experimentales se calcularon los volúmenes de lecho tratados cuando la concentración en el fluente de las minicolumnas alcanzó el límite permisible de la NOM 127 SSA1-1994, la cual establece una concentración de 25  $\mu\text{g/L}$  para arsénico y 1.5 mg/L para fluoruros, posteriormente se construyeron gráficas de Pareto, efectos principales y de superficie de respuesta.

**Tabla 4.4. Matriz de pruebas del diseño factorial 2<sup>4</sup> aplicado**

Corridas	F (mg/L)	As (mg/L)	EBCT (min)	pH
1	9.00	0.107	3.00	6.10
2	9.00	0.300	4.00	7.15
3	6.08	0.204	3.50	6.63
4	3.15	0.107	3.00	7.15
5	9.00	0.300	3.00	7.15
6	3.15	0.300	3.00	7.15
7	9.00	0.107	3.00	7.15
8	9.00	0.300	3.00	6.10
9	9.00	0.107	4.00	6.10
10	3.15	0.107	4.00	6.10
11	3.15	0.300	3.00	6.10
12	3.15	0.300	4.00	6.10
13	6.08	0.204	3.50	6.63
14	3.15	0.107	4.00	7.15
15	3.15	0.107	3.00	6.10
16	9.00	0.107	4.00	7.15
17	3.15	0.300	4.00	7.15
18	6.08	0.204	3.50	6.63
19	9.00	0.300	4.00	6.10

#### 4.1.1.9 Operación de las minicolumnas de carbón de hueso

Se utilizaron minicolumnas construidas en acrílico de 2 cm de diámetro interno y de 90 cm de altura, con una base de pedestal con forma cuadrada. En la parte inferior se instaló una válvula de ¼ " que servía para que fluyera el agua tratada y también para regular el flujo (26 mL/min), se trabajaron a flujo descendente a una tasa de 5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h. Se utilizó un diámetro de partícula de 0.4018 mm. La alimentación de las minicolumnas fue el efluente de las columnas con gravilla de sílice de 30 cm de espesor de lecho, la gravilla tenía un diámetro de partícula D<sub>p</sub>= 2.35 mm, las cuales trabajaron a flujo ascendente debido a la mayor facilidad de operación. El agua se impulsaba mediante una bomba peristáltica desde un tanque que contenía el agua con las concentraciones de fluoruros y arsénico y el valor de pH requerido para cada prueba. El agua era conducida a las columnas de gravilla (con el fin de desorber el CO<sub>2</sub> y evitar taponamientos en las minicolumnas) y posteriormente por gravedad a las minicolumnas empacadas con lechos de carbón de hueso. Con base en los tiempos de retención deseados se calculó la masa de carbón de hueso para cada corrida experimental. En la Figura 4.5 se muestra la configuración del sistema que fue utilizado para la ejecución de las pruebas del diseño experimental antes mencionado.



**Figura 4.5. Adsorción de arsénico y fluoruros en minicolumnas de carbón de hueso.**

Una vez puestas en marcha las corridas experimentales, se colectaron muestras del efluente de las minicolumnas para determinar las concentraciones de arsénico y fluoruros hasta llegar a la concentración de ruptura. Finalmente, al llegar a estas concentraciones, se calcularon los volúmenes de lecho tratados para realizar el análisis del experimento en el programa Statgraphics centurión versión XV. El caudal fue continuamente monitoreado a la salida de las minicolumnas con el fin de evitar un desajuste del mismo y por lo tanto variaciones en el EBCT, también se trató de mantener el pH del agua que se alimentaba mediante (NaOH al 4 % o en su caso HCl 50%) a su valor establecido en cada condición hasta finalizar la prueba, para ello se instaló un electrodo de pH dentro de los tanques que contenían el agua a tratar.

#### 4.1.2 Pruebas con el adsorbente Phoslock

El Phoslock es un material comercial conformado por bentonita que ha sido modificada mediante la introducción de lantano (5%) en su estructura arcillosa (~95%). El desarrollo de este material lo realizó la Agencia Nacional de Ciencias de Australia. El material fue desarrollado para remover fosfatos en cuerpos de agua y evitar la eutrofización. El fabricante menciona que cuando los iones de lantano se unen electrostáticamente a la bentonita, éstos no se disocian fácilmente de la arcilla, sino que reaccionan químicamente con los fosfatos al entrar en contacto con estos iones en el agua. El material es fabricado en forma de gránulos secos, ver Figura 4.6 y se aplica en la superficie del cuerpo de agua en forma de una suspensión.

Este material fue seleccionado para realizar pruebas de adsorción de fluoruros y arsénico debido a que ambos son aniones al igual que los fosfatos, además de las similitudes y afinidades que presentan los fosfatos y los arsenatos al grado que en algunos casos compiten entre ellos por los sitios de adsorción en algunos materiales adsorbentes.

Dado que el Phoslock es una bentonita, al contacto con el agua se dispersa en partículas coloidales que pueden permanecer en suspensión o formar una pasta. Debido a lo anterior se creyó conveniente abordar los experimentos con pruebas en lotes.



**Figura 4.6. Aspecto del Phoslock**

#### 4.1.2.1 Caracterización química del adsorbente Phoslock

Estos estudios se realizaron con la finalidad de profundizar en el conocimiento de este adsorbente y fueron efectuados en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C (IPICYT). Los siguientes fueron los análisis realizados:

1. Caracterización elemental: se realizó mediante el método espectrofotométrico de emisión óptica- plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).
2. Análisis de área superficial y porosidad: La muestra fue preparada y analizada mediante un analizador de área superficial y porosidad marca Micrometrics modelo ASAP 2020 (serie 831).
3. Difracción de rayos X: El equipo empleado para dicho análisis es un Difractómetro de polvos de la marca Bruker AXS modelo D8 Advance.
4. Microscopía electrónica de barrido SEM: se caracterizó la morfología superficial de la muestra a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), empleando la señal de electrones retrodispersados (BSE).

#### 4.1.2.2 Preparación del medio adsorbente

Para esta parte del estudio, el adsorbente Phoslock fue molido y tamizado a un tamaño de mallas comprendido entre las número 16 y 20 correspondiente a partículas con un diámetro con media geométrica de 1.0 mm.

#### 4.1.2.3 Preparación del agua utilizada en las pruebas de adsorción

Para obtener las isotermas de adsorción se eligió realizar pruebas en lotes empleando la misma cantidad de masa para cada prueba y variar las concentraciones de los contaminantes en el agua.

Se utilizó agua destilada a la que se adicionó flúor, utilizando fluoruro de potasio (KF), y arsénico empleando arsenato de sodio ( $\text{HASNa}_2\text{O}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), para lograr diferentes concentraciones (Tabla 4.5). Estas concentraciones se seleccionaron considerando las que se encuentran en diversas fuentes de abastecimiento del país. Se trabajó con agua a dos valores de pH, 7.0 y 6.0, éste se ajustó con hidróxido de sodio y ácido clorhídrico según el caso y solo se ajustó al inicio, después se dejó libre todo el tiempo de prueba.

**Tabla 4.5. Condiciones experimentales para obtener las isotermas de adsorción.**

Masa de Phoslock (g)	F <sup>-</sup> (mg/L)	As (µg/L)
1.0	1.53	0.022
1.0	3.45	0.059
1.0	5.40	0.096
1.0	7.57	0.300
1.0	10.0	0.480

#### 4.1.2.3.1 Métodos analíticos

La concentración de iones fluoruro se determinó mediante un electrodo de ion selectivo (Thermo Scientific 9609 BNWP) y para el caso del arsénico se utilizó un equipo arsenator Wagtech W1000143. El pH se analizó mediante un potenciómetro Orion 420.

#### 4.1.2.3.2 Obtención de las Isotermas de adsorción

Se trabajó con volúmenes de disolución igual a 2 L. Una vez que las concentraciones de fluoruros y arsénico fueron ajustadas a los valores deseados y el valor de pH fijado, a cada recipiente se le agregó 2.0 g de phoslock y se dejó en agitación en un equipo de jarras (Figura 4.7). La velocidad de agitación fue la necesaria para mantener suspendido el material adsorbente. El tiempo de la prueba fue el requerido para obtener la concentración en equilibrio para fluoruros, para ello se tomaron muestras de agua en diversos lapsos de tiempo, al llegar a esta condición se tomó una muestra para determinar la concentración de arsénico y se asumió que también la concentración de arsénico había llegado al equilibrio.

Todas las muestras fueron filtradas por membranas de 0.45 µm antes de realizar los análisis para la cuantificación de arsénico y fluoruros, también se monitoreó el pH y la temperatura de cada jarra. Una vez alcanzado el equilibrio para fluoruros, se realizaron los cálculos necesarios y se construyeron isotermas de adsorción, aplicando los modelos de Langmuir y Freundlich. Las pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente alrededor de 24°C.



Figura 4.7. Equipo de jarras utilizado en las isotermas de adsorción

#### 4.1.3 Pruebas con Lodo proveniente de electrocoagulación, LEC

##### 4.1.3.1 Materiales adsorbentes utilizados en esta parte del estudio

Se utilizaron diferentes medios adsorbentes: alúmina activada, AA; lodos de hidróxidos de aluminio generados por electrocoagulación, LEC y lodo de hidróxidos de aluminio generado a partir de la coagulación con sulfato de aluminio en la planta potabilizadora Los Berros, LLB. La preparación de los mismos para realizar las pruebas fue igual que el procedimiento descrito en la sección 5.2.1.4. Se realizaron dos etapas de evaluación como se describe adelante.

##### 4.1.3.2 Obtención del LEC

Para la obtención de hidróxido metálico se utilizó un reactor de electrocoagulación con electrodos de aluminio que trató agua proveniente del pozo profundo que abastece al IMTA a un caudal de 30 L/min. El efluente pasó a un sedimentador de donde el lodo era recolectado. Este lodo fue colocado en un segundo equipo de sedimentación para obtener una concentración de sólidos de aproximadamente 10 g/L, este lodo fue centrifugado para obtener un lodo más concentrado con una humedad del 94%, el cual fue finalmente secado a 105 °C y triturado para obtener una fracción de material granular con un diámetro geométrico de 0.4018 mm. El material fue lavado con agua desionizada para eliminar el polvo. Una representación gráfica del proceso de obtención es vista en la figura 2.



Figura 4.8 Representación gráfica del proceso de generación de lodos de aluminio a partir de oxidación electrolítica



#### 4.1.3.3 Caracterización del LEC

Se realizaron diferentes pruebas para caracterizar el lodo de electrocoagulación. Las pruebas fueron las mismas que se le realizaron al Phoslock y se mencionan en el apartado 4.1.2.1.

Además se determinó el Punto de Carga Cero (PZC) La metodología empleada se describe a continuación: Diferentes cantidades de masa fueron adicionadas en tubos con 20 mL de agua desionizada, las soluciones resultantes fueron desgasificadas con nitrógeno durante 5 min. Las muestras se agitaron continuamente a 150 rpm y 25°C por 3 días en una incubadora orbital INO. Al cabo de ese tiempo se registró el pH de las muestras (Thomas Scientific TS 625 pH meter) y se graficó el pH en función de la masa.

#### 4.1.3.4 Pruebas de disolución del LEC en función del pH

El objetivo de esta fase fue conocer la pérdida del material adsorbente por disolución en función del pH del agua. Esta prueba se realizó a un tamaño de partícula (media geométrica) de 0.4018 mm. Los ensayos se efectuaron colocando 3 g de material durante 6 hrs en un vaso de precipitados con 1 litro de agua desionizada a la que se ajustaba el pH usando soluciones de HCl y NaOH, ambas al 0.5 N. Para proporcionar agitación al agua, los ensayos se hicieron empleando un equipo de prueba de jarras Figura 4.9, se estableció una velocidad de agitación (150 rpm) que permitiera mantener en suspensión el material. Las pruebas se efectuaron con valores de pH desde 5.0 a 10.5 con incrementos de 0.5. Una vez terminada la prueba se separó el agua del sólido mediante filtración por una membrana de 0.45  $\mu\text{m}$  y se determinó la cantidad de aluminio disuelto mediante el método 10 para intervalo de (0-0.8 mg L<sup>-1</sup>) en un espectrofotómetro de la marca HACH, Modelo DR/2800.



Figura 4.9 Pruebas para determinar la disolución de LEC en función del pH del agua

#### 4.1.3.5 Pruebas de adsorción en lotes LEC

Pruebas de adsorción fueron realizadas para obtener la capacidad de adsorción y comportamiento de equilibrio del material obtenido. Las pruebas fueron realizadas a diferentes concentraciones de F<sup>-</sup> y As, la concentración de fluoruros fueron monitoreados a lo largo de 48 horas y la concentración de As fue analizada al finalizar el experimento. La experimentación fue realizada por equipo de jarras, el pH se fijó en 7 así como la velocidad de agitación en 150 rpm, las concentraciones correspondientes a cada recipiente experimental se puede observar en la Tabla 4.6. Las pruebas fueron realizadas en triplicado para asegurar repetibilidad. La temperatura del agua osciló entre 18 y 22 °C.

Las pruebas de adsorción se realizaron con dos tamaños de partícula: a) Partículas con diámetro menor de 0.4 mm (partículas que después de moler la muestra y tamizarla para separar las partículas con diámetro igual a 0.4 mm, quedaron en la charola de tamizado) y a la que se denominó *POLVO* y b) partículas con diámetro homogéneo de diámetro geométrico igual a 0.4 mm a la que se le denominó *PARTICULADO*.

**Tabla 4.6 Concentraciones de F<sup>-</sup> y As en pruebas de adsorción en lotes**

Jarra	[F <sup>-</sup> , mg/L]	[As, µg/L]
1	1.5	25
2	3.5	50
3	5.5	100
4	7.5	300
5	10	500

#### 4.1.3.6 Primera etapa, saturación a 2.5 mg F<sup>-</sup>/L y arsénico de 100 µg/L

Solo se evaluó el lodo de hidróxido de aluminio generados por electrocoagulación (LEC) y la alúmina activada (AA) hasta saturación de fluoruros con una concentración inicial de 2.5 mg/L y arsénico de 100 µg/L. Las condiciones de operación fueron fijadas tomando en consideración los resultados del diseño experimental del proyecto interno (Proyecto TC1108.1) "Análisis técnico y económico de tecnologías de remoción de fluoruros" en el cual se hicieron pruebas con alúmina activada y se encontraron las condiciones óptimas, estas fueron a un valor de pH de 5.45 y un tiempo de contacto de 0.8 min. Se decidió utilizar un valor de pH de 6.0 para el caso AA (para evitar pérdida de material por disolución), así mismo para el caso de LEC, el valor utilizado fue de 7.0. La forma en que fueron operadas fue la misma descrita en la sección 4.1.1.9. La comparación consistió en calcular los volúmenes de lecho hasta la saturación de ambos contaminantes. Estas pruebas fueron realizadas por duplicado para cada medio adsorbente.

#### 4.1.3.7 Segunda etapa, saturación a 10.0 mgF<sup>-</sup>/L y arsénico de 100 µg/L

En esta etapa se utilizaron los tres medios adsorbentes AA, LEC y LLB y se llevaron a saturación con 10 mg F<sup>-</sup>/L y 100 µg/L de arsénico. Se tomaron en consideración las condiciones de operación de las pruebas de regeneración del proyecto interno con clave TC1108.1 ya mencionado como referencia. La forma en que fueron operadas fue la descrita en la Sección

4.1.1.9 y el objetivo fue monitorear la concentración de fluoruros y arsénico en el efluente de las columnas hasta obtener la saturación del lecho para ambos contaminantes con la finalidad de comparar ambos medios y conocer el volumen de agua que puede tratar el lecho hasta la saturación.

## **5 RESULTADOS**

### **5.1 Adsorción con carbón de hueso**

Los resultados completos de los experimentos del diseño factorial aplicado (19 ensayos) se muestran de la Tabla 5.1 a la Tabla 5.19 así como las condiciones de operación de cada tratamiento. La respuesta a cada uno de los tratamientos fue el agua producida, expresada como volúmenes de lecho (VL), hasta el punto de quiebre para cada uno de los contaminantes. Estos datos fueron utilizados como respuesta de los factores: concentración de fluoruros, concentración de arsénico, tiempo de contacto de cama vacía (EBCT) y pH. Las pruebas 3, 13 y 18 corresponden a los centros. Los resultados de concentración de arsénico en el efluente de las columnas reportados en dichas tablas son los obtenidos por espectroscopía de absorción atómica (generación de hidruros).

Tabla 5.1. Condiciones de operación y resultados de la prueba 1 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)

Prueba 1	
Parámetro	Valor
Co F (mg/L)	9.00
Ce F (mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	6.100
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.02
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0016
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.25
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.95
EBCT (min)	3.03
Volumen de adsorbente (m <sup>3</sup> )	0.00008
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0232
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0020
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.48
CUR, caso arsénico (gCH/L)	28.98
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	295.30
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	25.26
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	14.93
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.28

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	27			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.70	2.6	0.004
0.25	26			0.39	7.75	5.0	0.007
0.38	27			0.61	7.63	7.7	0.011
0.55	26			0.87	7.60	11.0	0.015
0.72	26		22.80	1.13	7.56	14.3	0.020
0.85	26			1.33	7.60	17.0	0.023
0.98	26			1.54	7.62	19.6	0.027
1.13	26			1.78	7.58	22.6	0.031
1.27	26		24.90	1.98	7.51	25.3	0.035
2.00	26			3.13		39.8	0.054
6.00	26	0.05		9.37	7.15	119.3	0.163
9.00	26	0.18		14.05	7.20	178.8	0.244
11.00	25	0.53		17.05	7.08	217.0	0.296
12.00	26			18.61		236.9	0.324
13.00	26	1.06		20.17	6.99	256.7	0.351
13.50	26	1.21		20.95	6.99	266.7	0.364
14.00	25	1.37		21.70	6.92	276.2	0.377
14.50	25	1.46		22.45	6.93	285.8	0.390
15.00	25	1.54		23.20	6.92	295.3	0.403
Promedio	25.90						

**Tabla 5.2. Condiciones de operación y resultados de la prueba 2 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 2	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	9.00
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.300
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00162
Masa de adsorbente W (g)	77.0
Altura del medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	5.16
EBCT (min)	3.90
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0239
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0006
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	3.22
CUR, caso arsénico (gCH/L)	128.76
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	227.34
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	5.68
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	14.76
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.37

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.83	2.0	0.003
0.25	26			0.39	7.74	3.7	0.005
0.38	26		31.8	0.60	7.71	5.7	0.008
0.55	26			0.86	7.56	8.2	0.011
0.70	26			1.09	7.52	10.4	0.014
2.00	28			3.28		31.1	0.043
4.00	26			6.40		60.8	0.083
6.00	27	0.03		9.64	7.37	91.6	0.125
9.00	28	0.17		14.68	7.47	139.5	0.191
11.00	28	0.57		18.04	7.4	171.4	0.234
13.00	28	1.20		21.40	7.38	203.4	0.278
13.50	28	1.28		22.24	7.4	211.4	0.289
14.00	28	1.40		23.08	7.36	219.4	0.300
14.50	28	1.53		23.92	7.38	227.3	0.311
Promedio	27.00						

**Tabla 5.3. Condiciones de operación y resultados de la prueba 3 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 3	
Parámetro	Valor
Co F (mg/L)	6.08
Ce F (mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.204
pH	6.63
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00159
Masa de adsorbente W (g)	67.15
Altura del medio L (m)	0.292
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	5.06
EBCT (min)	3.46
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000092
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0274
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0011
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.45
CUR, caso arsénico (gCH/L)	58.70
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	298.27
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	12.47
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	17.21
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.72

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	25			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.93	2.3	0.003
0.27	26			0.42	7.86	4.5	0.006
3.77	26			5.88	7.79	64.1	0.088
0.60	26			0.94	7.81	10.2	0.014
0.73	26		25.60	1.14	7.78	12.5	0.017
0.88	26			1.38	7.70	15.0	0.021
1.03	26			1.61	7.90	17.6	0.024
1.18	26			1.85	7.95	20.1	0.027
1.33	26			2.08		22.7	0.031
3.33	28	0.04		5.44	7.51	59.3	0.081
6.38	28	0.03		10.56	7.21	115.1	0.157
11.38	28	0.33		18.96		206.7	0.282
16.38	28	1.57		27.36	7.00	298.3	0.407
Promedio	26.50						

**Tabla 5.4. Condiciones de operación y resultados de la prueba 4 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 4	
Parámetro	Valor
Co F (mg/L)	3.15
Ce F (mg/L)	1.5
As (mg/L)	0.107
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00158
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	5.02
EBCT (min)	2.99
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0425
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0011
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	1.35
CUR, caso arsénico (gCH/L)	50.26
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	541.24
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	14.56
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	26.94
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.72

T. operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acum (L)	pH	VL	1/CUR (L/g)
0.00	27			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.97	2.6	0.004
0.27	26			0.42	7.83	5.3	0.007
0.43	26			0.68	7.81	8.6	0.012
0.60	26			0.94		11.9	0.016
0.73	26		27.8	1.14		14.6	0.020
0.88	26			1.38		17.5	0.024
1.03	26			1.61		20.5	0.028
1.18	26		40.0	1.85		23.5	0.032
1.33	26		39.5	2.08		26.5	0.036
1.48	26			2.31		29.5	0.040
1.63	26			2.55		32.4	0.044
6.38	26	0.07		9.96	7.42	126.8	0.173
11.38	26	0.17		17.76	7.34	226.0	0.309
16.38	25	0.49		25.26	7.19	321.5	0.439
18.68	26	0.71		28.85	7.24	367.2	0.502
20.00	28	0.84		31.06		395.4	0.540
23.00	27	1.21		35.92	7.21	457.2	0.625
25.00	27	1.41		39.16	7.28	498.5	0.681
27.00	28	1.54		42.52	7.3	541.2	0.739
Promedio	26.30						



**Tabla 5.5. Condiciones de operación y resultados de la prueba 5 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 5	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	9.0
Ce F-(mg/L)	1.5
As (mg/L)	0.300
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00154
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.91
EBCT (min)	3.05
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0182
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0006
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	3.16
CUR, caso arsénico (gCH/L)	96.15
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	231.87
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	7.61
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	11.80
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.39

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	27			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.66	2.6	0.004
0.25	26		40.2	0.39	7.71	5.0	0.007
0.38	26		17.9	0.60	7.65	7.6	0.010
0.58	26		55.0	0.91	7.64	11.6	0.016
6.00	25	0.15		9.04	7.41	115.0	0.157
8.00	25	0.43		12.04	7.27	153.2	0.209
9.00	26	0.59		13.60	7.41	173.1	0.236
11.00	26	1.21		16.72	7.33	212.8	0.291
11.50	25	1.32		17.47	7.97	222.3	0.304
12.00	25	1.55		18.22	7.29	231.9	0.317
Promedio	25.73						

**Tabla 5.6. Condiciones de operación y resultados de la prueba 6 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 6	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	3.15
Ce F-(mg/L)	1.5
As (mg/L)	0.300
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00156
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.97
EBCT (min)	3.02
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0451
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0007
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	1.28
CUR, caso arsénico (gCH/L)	83.09
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	573.49
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	8.81
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	28.88
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.44

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	27			0.00		0.0	0.000
0.13	28			0.22	7.94	2.9	0.004
0.27	26			0.43	7.88	5.5	0.008
0.43	26		25.1	0.69	7.77	8.8	0.012
0.60	26		29.0	0.95	7.70	12.1	0.017
0.73	26			1.16	7.67	14.8	0.020
0.88	26			1.39	7.71	17.7	0.024
1.03	26			1.63	7.79	20.7	0.028
1.18	26			1.86	7.79	23.7	0.032
1.33	26			2.10	7.83	26.7	0.036
1.48	26			2.33	7.65	29.7	0.041
6.38	27	0.03		10.27	7.44	130.7	0.179
11.38	26	0.09		18.07	7.27	230.0	0.314
18.68	26	0.44		29.46	7.18	375.0	0.512
20.00	25	0.69		31.43	7.15	400.1	0.547
23.00	25	0.96		35.93	7.26	457.4	0.625
25.00	26	1.28		39.05	7.30	497.1	0.679
27.00	25	1.40		42.05	7.32	535.3	0.731
29.00	25	1.56		45.05	7.32	573.5	0.783
Promedio	26.00						

**Tabla 5.7. Condiciones de operación y resultados de la prueba 7 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 7	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	9.00
Ce F-(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00153
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.88
EBCT (min)	3.07
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0195
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0020
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.95
CUR, caso arsénico (gCH/L)	28.35
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	247.96
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	25.82
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	12.71
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.32

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.64	2.6	0.004
0.28	26			0.44	7.61	5.6	0.008
0.47	26			0.73	7.63	9.3	0.013
0.63	26			0.99	7.56	12.6	0.017
0.78	26			1.22	7.56	15.6	0.021
0.93	26		21.0	1.46	7.56	18.5	0.025
1.12	26		22.9	1.74	7.55	22.2	0.030
1.30	26			2.03	7.54	25.8	0.035
1.45	26		29.0	2.26	7.54	28.8	0.039
1.62	26			2.52	7.51	32.1	0.044
1.77	26			2.76	7.52	35.1	0.048
1.93	26			3.02	7.51	38.4	0.052
2.13	26			3.33	7.56	42.4	0.058
2.28	26			3.56	7.53	45.3	0.062
2.47	26			3.85	7.51	49.0	0.067
2.67	26			4.16	7.38	53.0	0.072
2.83	26			4.42	7.57	56.3	0.077
3.00	26			4.68	7.55	59.6	0.081
3.13	26			4.89	7.49	62.2	0.085
3.33	26			5.20	7.58	66.2	0.090

3.47	26			5.41		68.8	0.094
3.67	26			5.72		72.8	0.099
4.33	26	0.03		6.76	7.51	86.0	0.118
5.48	24			8.42		107.1	0.146
6.13	24			9.35		119.0	0.163
8.33	24	0.24		12.52	7.54	159.4	0.218
11.30	24	0.95		16.79	7.47	213.8	0.292
12.30	24	1.26		18.23	7.40	232.1	0.317
13.00	24	1.47		19.24	7.43	244.9	0.335
13.17	24	1.53		19.48		248.0	0.339
Promedio	25.55						

**Tabla 5.8. Condiciones de operación y resultados de la prueba 8 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 8	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	9.00
Ce F-(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.300
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00156
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.96
EBCT (min)	3.02
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0232
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0012
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.48
CUR, caso arsénico (gCH/L)	47.05
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	295.00
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	15.56
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	14.86
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.78

Tiempo de operación	Q	Ce F <sup>-</sup>	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.53	2.6	0.004
0.28	26			0.44	7.53	5.6	0.008
0.47	26			0.73	7.55	9.3	0.013
0.63	26		18.1	0.99	7.48	12.6	0.017
0.78	26			1.22	7.44	15.6	0.021
0.93	26		34.0	1.46	7.38	18.5	0.025
1.12	26			1.74	7.45	22.2	0.030
1.30	26			2.03	7.36	25.8	0.035
1.45	26			2.26	7.38	28.8	0.039
1.62	26			2.52	7.39	32.1	0.044
1.77	26			2.76	7.41	35.1	0.048
1.93	26			3.02	7.40	38.4	0.052
2.13	26			3.33	7.41	42.4	0.058
2.28	26			3.56		45.3	0.062
2.47	26			3.85		49.0	0.067
2.67	26			4.16		53.0	0.072
2.83	26			4.42		56.3	0.077
3.00	26	0.02		4.68	7.62	59.6	0.081

4.33	26	0.03		6.76	7.31	86.0	0.118
5.48	25			8.48		108.0	0.148
6.13	27			9.54		121.4	0.166
8.33	25.5	0.14		12.90	7.20	164.3	0.224
11.30	25	0.71		17.35	6.96	220.9	0.302
12.30	25	0.88		18.85	6.92	240.0	0.328
13.00	25	1.12		19.90	6.93	253.4	0.346
14.00	28	1.32		21.58	6.91	274.8	0.375
14.50	28	1.40		22.42	6.92	285.5	0.390
15.00	25	1.54		23.17	6.94	295.0	0.403
Promedio	25.98						

**Tabla 5.9. Condiciones de operación y resultados de la prueba 9 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 9	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	9.00
Ce F-(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00154
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura del medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.89
EBCT (min)	4.11
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0318
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0049
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.42
CUR, caso arsénico (gCH/L)	15.75
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	302.00
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	46.47
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	20.67
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	3.18

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	26			0.21	7.51	2.0	0.003
0.28	26			0.44	7.59	4.2	0.006
0.47	26			0.73	7.61	6.9	0.009
0.63	26			0.99	7.57	9.4	0.013
0.78	26			1.22	7.59	11.6	0.016
0.93	26			1.46	7.64	13.8	0.019
1.12	26			1.74	7.56	16.6	0.023
1.30	26			2.03	7.58	19.3	0.026
1.45	26			2.26	7.51	21.5	0.029
1.62	26			2.52	7.55	24.0	0.033
1.77	26			2.76	7.61	26.2	0.036
1.93	26			3.02	7.57	28.7	0.039
2.13	26			3.33	7.58	31.6	0.043
2.28	26			3.56	7.53	33.9	0.046
2.47	26			3.85	7.56	36.6	0.050
2.67	26			4.16	7.50	39.5	0.054
2.83	26			4.42	7.54	42.0	0.057
3.00	26			4.68	7.44	44.5	0.061
3.13	26		26.1	4.89	7.57	46.5	0.063
3.33	26			5.20	7.57	49.4	0.068
3.47	26			5.41	7.58	51.4	0.070

3.67	26			5.72	7.56	54.4	0.074
3.83	26			5.98	7.48	56.8	0.078
4.00	26			6.24	7.49	59.3	0.081
4.15	26			6.47	7.55	61.5	0.084
4.33	26	0.03		6.76	7.51	64.3	0.088
4.50	26			7.02	7.51	66.7	0.091
5.48	24			8.44		80.2	0.110
6.13	24			9.37		89.1	0.122
8.33	22	0.01		12.28	7.41	116.7	0.159
11.30	24	0.03		16.55	7.45	157.3	0.215
12.30	25	0.03		18.05	7.43	171.6	0.234
13.00	26	0.03		19.14		181.9	0.249
15.00	24	0.09		22.02	7.61	209.3	0.286
21.50	25	1.75		31.77	7.28	302.0	0.413
22.50	26	1.95		33.33	7.38	316.8	0.433
Promedio	25.62						



**Tabla 5.10. Condiciones de operación y resultados de la prueba 10 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 10	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	3.15
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00155
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura del medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.94
EBCT (min)	4.07
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.1014
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0048
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	0.76
CUR, caso arsénico (gCH/L)	16.16
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	964.36
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	45.31
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	65.39
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	3.07

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.15	26			0.23	7.88	2.2	0.003
0.30	26			0.47	7.65	4.4	0.006
0.45	26			0.70	7.58	6.7	0.009
0.60	26			0.94	7.53	8.9	0.012
0.75	26			1.17	7.51	11.1	0.015
0.90	26			1.40	7.51	13.3	0.018
1.08	26			1.69	7.47	16.1	0.022
1.23	26			1.92	7.46	18.3	0.025
1.38	26			2.16	7.46	20.5	0.028
1.52	25			2.36	7.43	22.4	0.031
1.73	26			2.70	7.38	25.6	0.035
1.87	26			2.90	7.38	27.6	0.038
2.02	26			3.14	7.38	29.8	0.041
2.15	26			3.35	7.33	31.8	0.043
2.30	26			3.58	7.34	34.0	0.046
2.45	26			3.81	7.32	36.3	0.050
2.60	26			4.05	7.27	38.5	0.053
2.75	26			4.28	7.26	40.7	0.056
2.92	25			4.53	7.28	43.1	0.059
3.07	26		24.4	4.77	7.24	45.3	0.062
3.20	26			4.97	7.26	47.3	0.065

3.37	26			5.23	7.28	49.8	0.068
3.50	26			5.44	7.25	51.7	0.071
3.65	26			5.68	7.28	54.0	0.074
3.82	26			5.94	0.00	56.4	0.077
4.00	26			6.22	7.34	59.1	0.081
4.17	26			6.48	7.28	61.6	0.084
4.33	24			6.72	7.24	63.9	0.087
4.50	24			6.96	7.36	66.2	0.090
4.63	25			7.16	7.24	68.1	0.093
5.81	26			9.00	/	85.5	0.117
7.96	26			12.35	/	117.4	0.160
10.15	26	0.02		15.77	7.56	149.9	0.205
14.33	25	0.02		22.04	7.15	209.5	0.286
17.00	25	0.03		26.04	6.98	247.6	0.338
23.15	24	0.03		34.90	7.14	331.7	0.453
25.50	26	0.03		38.57	7.05	366.6	0.501
27.00	26			40.91	6.99	388.8	0.531
28.50	26	0.07		43.22	7.11	410.8	0.561
29.00	26			44.00	7.08	418.2	0.571
30.50	26			46.34		440.5	0.602
31.00	26	0.10		47.12	7.26	447.9	0.612
34.00	24	0.13		51.44	6.87	489.0	0.668
39.00	25	0.26		58.94	6.82	560.3	0.765
42.00	25	0.38		63.44	6.71	603.0	0.824
47.00	24	0.58		70.64	7.16	671.5	0.917
49.00	24	0.64		73.52	6.82	698.9	0.955
50.00	27			75.14	6.75	714.3	0.976
51.00	27	0.77		76.76	6.78	729.7	0.997
56.00	27	0.87		84.86	6.89	806.7	1.102
58.00	27	0.96		88.10	6.88	837.5	1.144
60.00	26	1.12		91.22	6.72	867.1	1.185
62.50	27	1.27		95.27	6.74	905.6	1.237
64.00	28	1.28		97.79	6.57	929.6	1.270
65.00	27	1.38		99.41	6.64	945.0	1.291
66.00	27	1.45		101.03	6.68	960.4	1.312
66.25	28	1.50		101.45	6.67	964.4	1.318
Promedio	25.86						

**Tabla 5.11. Condiciones de operación y resultados de la prueba 11 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 11	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	3.15
Ce F-(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.300
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00156
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura del medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.95
EBCT (min)	3.03
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0726
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0014
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	0.79
CUR, caso arsénico (gCH/L)	40.95
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	924.23
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	17.87
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	46.68
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.90

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.15	26			0.23	7.79	3.0	0.004
0.30	26			0.47	7.59	6.0	0.008
0.45	26			0.70	7.56	8.9	0.012
0.60	26			0.94	7.58	11.9	0.016
0.75	26		18.9	1.17	7.49	14.9	0.020
0.90	26			1.40	7.47	17.9	0.024
1.08	26		28.7	1.69	7.47	21.5	0.029
1.23	26			1.92	7.42	24.5	0.033
1.38	27			2.17	7.37	27.6	0.038
1.52	27			2.38	7.33	30.3	0.041
1.73	26			2.72	7.29	34.6	0.047
1.87	26			2.93	7.26	37.3	0.051
2.02	26			3.16	7.26	40.3	0.055
2.15	26			3.37	7.24	42.9	0.059
4.60	27	0.03		7.34	7.17	93.4	0.128
5.82	26			9.24		117.6	0.161
7.97	26			12.59		160.3	0.219
10.15	26	0.02		16.00	7.18	203.7	0.278
14.33	26	0.05		22.52	7.05	286.7	0.392

17.00	25	0.09		26.52	6.85	337.6	0.461
23.15	26	0.40		36.12	7.05	459.8	0.628
24.00	26	0.45		37.44	6.98	476.7	0.651
25.05	26	0.50		39.08	6.94	497.5	0.680
26.00	26	0.54		40.56	6.87	516.4	0.705
26.50	26	0.55		41.34	7.04	526.3	0.719
27.00	26	0.55		42.12	6.99	536.2	0.733
28.00	26	0.59		43.68	7.21	556.1	0.760
28.50	26	0.64		44.46	7.01	566.0	0.773
29.00	26	0.62		45.24	7.01	575.9	0.787
30.50	26	0.66		47.58	7.15	605.7	0.828
31.00	26	0.68		48.36	7.13	615.7	0.841
34.00	26	0.83		53.04	6.77	675.2	0.923
39.00	25	1.16		60.54	6.69	770.7	1.053
40.00	26	1.19		62.10	6.63	790.6	1.080
41.00	25	1.26		63.60	6.61	809.7	1.106
42.00	25	1.31		65.10	6.61	828.8	1.132
47.00	25	1.59		72.60	6.99	924.2	1.263
47.50	25	1.61		73.35	6.98	933.8	1.276
Promedio	25.92						

**Tabla 5.12. Condiciones de operación y resultados de la prueba 12 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 12	
Parámetro	Valor
Co F (mg/L)	3.15
Ce F (mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.300
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00156
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura del medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.95
EBCT (min)	4.06
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0927
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0027
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	0.83
CUR, caso arsénico (gCH/L)	28.31
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	881.35
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	25.86
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	59.60
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.75

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	27			0.00		2.2	0.003
0.15	26			0.23	7.75	4.4	0.006
0.30	26			0.47	7.61	6.7	0.009
0.45	26			0.70	7.56	8.9	0.012
0.60	26			0.94	7.56	11.1	0.015
0.75	26			1.17	7.56	13.3	0.018
0.90	26			1.40	7.51	16.1	0.022
1.08	26			1.69	7.5	18.3	0.025
1.23	26			1.92	7.49	20.5	0.028
1.38	26			2.16	7.49	22.6	0.031
1.52	28			2.38	7.45	25.9	0.035
1.73	26		24.4	2.72	7.44	27.8	0.038
1.87	26			2.93	7.43	30.1	0.041
2.02	26			3.16	7.43	32.0	0.044
2.15	26			3.37	7.41	34.3	0.047
2.30	26			3.60	7.39	36.5	0.050
2.45	26			3.84	7.4	38.7	0.053
2.60	26			4.07	7.37	40.9	0.056
2.75	26			4.31	7.38	43.6	0.060
2.92	29			4.59	7.36	45.9	0.063
3.07	26			4.83	7.35	47.8	0.065

3.20	26			5.03	7.35	50.3	0.069
3.37	26			5.29	7.37	52.3	0.071
3.50	26			5.50	7.3	54.5	0.074
3.65	26			5.74	7.34	57.0	0.078
3.81	26			6.00	7.36	59.7	0.082
4.16	26			6.28	7.33	62.2	0.085
4.33	26			6.54	7.34	64.7	0.088
4.50	26			6.80	7.28	67.1	0.092
4.63	28	0.02		7.06	7.34	69.3	0.095
5.81	26			7.29		86.8	0.119
7.96	26			9.13		118.7	0.162
10.15	27	0.02		12.48	7.58	152.3	0.208
10.33	26	0.03		16.02	7.79	214.3	0.293
17.00	26	0.03		22.55	7.3	253.9	0.347
23.15	26	0.08		26.71	7.31	345.1	0.471
24.00	25	0.09		36.30	7.32	357.2	0.488
27.00	27	0.14		37.58	7.43	403.4	0.551
28.50	26	0.18		42.44	7.47	425.6	0.582
29.00	27	0.18		44.78	7.42	433.3	0.592
30.50	26			45.59		455.6	0.622
31.45	27	0.24		47.93	7.56	470.2	0.642
34.00	26	0.40		49.47	7.3	508.0	0.694
39.00	25	0.60		53.44	7.26	579.3	0.791
42.00	25	0.72		60.94	7.09	622.1	0.850
47.00	25	1.02		65.44	7.12	693.4	0.947
48.50	26			72.94		715.6	0.978
48.76	26	1.11		75.28	7.12	719.6	0.983
49.00	24	1.15		75.70	7.12	722.8	0.987
50.50	24	1.25		76.04	7.16	743.3	1.016
51.00	25	1.23		78.20	7.17	750.5	1.025
52.00	25	1.22		78.95	7.14	764.7	1.045
52.33	26	1.24		80.45	7.18	769.7	1.051
53.50	25	1.26		80.97	7.17	786.3	1.074
54.50	25	1.24		82.72	7.27	800.6	1.094
56.00	25	1.33		84.22	7.29	821.9	1.123
58.00	25	1.39		86.47	7.05	850.5	1.162
60.00	25	1.48		89.47	7.01	879.0	1.201
60.17	25	1.52		92.47	7.01	881.3	1.204
Promedio	25.92			92.71			

**Tabla 5.13. Condiciones de operación y resultados de la prueba 13 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 13	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	6.08
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.204
pH	6.63
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00154
Masa de adsorbente W (g)	67.15
Altura del medio L (m)	0.292
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.89
EBCT (min)	3.58
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000092
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0298
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0018
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.25
CUR, caso arsénico (gCH/L)	38.37
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	325.06
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	19.08
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	19.44
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.14

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR (L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	25			0.20	7.78	2.2	0.003
0.30	26			0.46	7.69	5.0	0.007
0.47	26			0.72	7.66	7.8	0.011
0.63	26			0.98	7.62	10.7	0.015
0.80	26			1.24	7.59	13.5	0.018
0.97	26			1.50	7.58	16.4	0.022
1.13	25		24.6	1.75	7.52	19.1	0.026
1.30	26			2.01	7.53	21.9	0.030
1.48	26		33.5	2.30	7.50	25.0	0.034
1.65	26			2.56	7.44	27.9	0.038
1.85	26			2.87	7.45	31.3	0.043
2.00	26			3.10	7.98	33.8	0.046
6.23	24	0.02		9.19	7.45	100.2	0.137
16.83	25	1.31		25.09	7.58	273.5	0.374
17.73	26	1.44		26.50	7.44	288.8	0.395
17.95	26	1.51		26.84	7.44	292.6	0.400
18.00	24	1.43		26.91	7.30	293.4	0.401
18.33	26	1.44		27.43	7.30	299.0	0.408
18.66	26	1.48		27.94	7.23	304.6	0.416
19.33	24	1.49		28.91	7.25	315.1	0.430

---

---

19.92	26	1.54		29.82	7.19	325.1	0.444
Promedio	25.59						



**Tabla 5.14. Condiciones de operación y resultados de la prueba 14 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 14	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	3.15
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00154
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura del medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.91
EBCT (min)	4.09
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.1102
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0030
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	0.70
CUR, caso arsénico (gCH/L)	25.39
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	1047.58
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	28.83
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	71.47
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.97

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.15	27			0.24	7.91	2.3	0.003
0.32	26			0.50	7.86	4.8	0.007
0.45	26			0.71	7.84	6.8	0.009
0.58	26			0.92	7.80	8.7	0.012
0.70	26			1.10	7.74	10.5	0.014
0.83	27			1.32	7.71	12.5	0.017
1.02	26			1.60	7.73	15.2	0.021
1.15	26			1.81	7.73	17.2	0.024
1.32	26			2.07	7.62	19.7	0.027
1.45	26			2.28	7.82	21.7	0.030
1.62	26			2.51	7.82	23.9	0.033
1.78	26		21	2.77		26.4	0.036
1.95	26			3.03	7.83	28.8	0.039
2.10	26			3.29	7.84	31.3	0.043
2.25	26			3.55	7.78	33.8	0.046
2.43	26			3.79	7.81	36.0	0.049
2.57	26			4.02	7.77	38.2	0.052
2.75	26			4.31	7.78	40.9	0.056
5.00	26	0.03		7.82	7.62	74.3	0.102

7.00	25	0.03		10.82	7.61	102.8	0.140
13.00	24	0.02		19.46	7.78	185.0	0.253
16.00	24			23.78		226.0	0.309
22.00	26	0.03		33.14	7.47	315.0	0.430
25.00	26	0.04		37.82	7.47	359.5	0.491
27.00	27			40.94		389.1	0.532
28.50	26	0.06		43.28	7.61	411.4	0.562
30.00	26			45.62		433.6	0.592
31.00	26	0.07		47.18	7.60	448.5	0.613
36.00	25	0.14		54.68	7.62	519.8	0.710
40.00	25	0.24		60.68	7.68	576.8	0.788
42.00	25	0.34		63.68	7.59	605.3	0.827
44.00	25	0.45		66.68	7.63	633.8	0.866
46.00	25	0.52		69.68	7.65	662.3	0.905
50.00	25	0.66		75.68	7.73	719.4	0.983
55.00	26	0.73		83.33	7.75	792.1	1.082
58.00	25	0.81		87.83	7.65	834.9	1.141
61.00	26	0.92		92.51	7.58	879.4	1.201
62.00	26	1.01		94.07	7.60	894.2	1.222
66.00	26	1.10		100.31	7.43	953.5	1.303
67.00	26	1.15		101.87	7.40	968.3	1.323
70.16	25	1.29		106.61	7.41	1013.4	1.385
70.50	26	1.32		107.14	7.41	1018.4	1.391
71.58	26	1.37		108.82	7.39	1034.5	1.413
72.50	25	1.51		110.20	7.37	1047.6	1.431
73.50	25	1.52		111.70	7.42	1061.8	1.451
Promedio	25.73						

**Tabla 5.15. Condiciones de operación y resultados de la prueba 15 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 15	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	3.15
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00154
Masa de adsorbente W (g)	57.50
Altura medio L (m)	0.250
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.91
EBCT (min)	3.05
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000079
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.1081
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0028
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	0.53
CUR, caso arsénico (gCH/L)	20.31
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	1376.24
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	36.03
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	70.07
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.83

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.15	27			0.24	7.79	3.1	0.004
0.32	26			0.50	7.69	6.4	0.009
0.48	26			0.76	7.69	9.7	0.013
0.65	26			1.02	7.62	13.0	0.018
0.82	26			1.28	7.60	16.3	0.022
0.97	26			1.52	7.60	19.3	0.026
1.13	26			1.78	7.73	22.6	0.031
1.28	26			2.01	7.69	25.6	0.035
1.47	26			2.30	7.67	29.2	0.040
1.65	26			2.58	7.69	32.9	0.045
1.80	28		25.5	2.83	7.70	36.0	0.049
1.95	26			3.06	7.64	39.0	0.053
2.10	26			3.30	7.60	42.0	0.057
2.25	26			3.53	7.57	45.0	0.061
2.38	26			3.74	7.56	47.6	0.065
5.00	26	0.02		7.82	7.35	99.6	0.136
7.00	26	0.02		10.94	7.27	139.3	0.190
13.00	25	0.04		19.94	7.49	253.9	0.347
16.00	25			24.44		311.1	0.425

22.00	26	0.01		33.80	7.09	430.3	0.588
25.00	26	0.02		38.48	7.04	489.9	0.669
27.00	26			41.60		529.6	0.724
28.50	25	0.24		43.85	7.11	558.2	0.763
30.00	26			46.19		588.0	0.803
31.00	25	0.21		47.69	7.14	607.1	0.829
36.00	25	0.36		55.19	7.06	702.6	0.960
39.00	25	0.54		59.69	7.23	759.9	1.038
41.00	25	0.64		62.69	7.02	798.1	1.090
43.00	25	0.69		65.69	7.05	836.2	1.142
44.00	26			67.25		856.1	1.170
46.00	26	0.86		70.31	6.99	895.1	1.223
50.00	26	0.96		76.55	7.08	974.5	1.331
58.00	25	0.99		88.55	7.14	1127.3	1.540
61.00	24	1.11		92.87	7.09	1182.2	1.615
63.00	25	1.18		95.87	7.06	1220.4	1.667
66.00	25	1.28		100.37	6.89	1277.7	1.746
67.00	25	1.33		101.87	6.90	1296.8	1.772
70.16	26	1.42		106.80	6.90	1359.6	1.857
70.58	26	1.48		107.46	6.90	1367.9	1.869
71.00	26	1.51		108.11	6.88	1376.2	1.880
71.58	26	1.52		109.02	6.84	1387.8	1.896
72.50	26	1.63		110.45	6.93	1406.0	1.921
Promedio	25.72						

**Tabla 5.16. Condiciones de operación y resultados de la prueba 16 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 16	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	9.00
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.107
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00153
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.87
EBCT (min)	4.13
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0267
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0024
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.88
CUR, caso arsénico (gCH/L)	32.46
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	253.84
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	22.55
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	17.47
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.55

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.18	26			0.29	7.69	2.7	0.004
0.33	26			0.52	7.64	4.9	0.007
0.50	26			0.78	7.65	7.4	0.010
0.67	26			1.04	7.66	9.9	0.014
0.83	26			1.30	7.66	12.4	0.017
1.00	24			1.54	7.66	14.6	0.020
1.22	26			1.88	7.63	17.9	0.024
1.37	26			2.11	7.62	20.1	0.027
1.53	26		25.6	2.37	7.63	22.5	0.031
1.72	26			2.66	7.59	25.3	0.035
1.85	24			2.85	7.64	27.1	0.037
2.00	26			3.08	7.59	29.3	0.040
2.15	24			3.30	7.60	31.4	0.043
2.33	26			3.59	7.65	34.1	0.047
2.50	26			3.85	7.59	36.6	0.050
2.67	26			4.11	7.59	39.0	0.053
2.85	26			4.39	7.63	41.8	0.057
3.00	24	0.03		4.61	7.57	43.8	0.060
13.00	25	0.73		19.61	7.78	186.4	0.255

---

15.00	26	1.14		22.73	7.52	216.1	0.295
15.50	25	1.22		23.48	7.63	223.2	0.305
16.00	25	1.28		24.23	7.61	230.3	0.315
16.50	26	1.38		25.01	7.57	237.7	0.325
17.00	25	1.45		25.76	7.55	244.9	0.335
17.63	25	1.50		26.70	7.60	253.8	0.347
Promedio	25.50						

**Tabla 5.17. Condiciones de operación y resultados de la prueba 17 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 17	
Parámetro	Valor
Co F-(mg/L)	3.15
Ce F-(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.300
pH	7.15
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00153
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.87
EBCT (min)	4.13
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0984
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0023
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	0.78
CUR, caso arsénico (gCH/L)	33.80
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	935.66
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	21.65
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	67.36
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.56

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.15	26			0.23	7.95	2.2	0.003
0.32	26			0.49	7.69	4.7	0.006
0.48	26			0.75	7.85	7.2	0.010
0.65	25			1.00	7.81	9.5	0.013
0.82	26			1.26	7.80	12.0	0.016
0.97	26			1.50	7.82	14.2	0.019
1.13	26			1.76	7.90	16.7	0.023
1.28	26		21.6	1.99	7.89	18.9	0.026
1.47	26			2.28	7.87	21.7	0.030
1.65	26			2.56	7.87	24.4	0.033
1.80	27			2.81	7.88	26.7	0.036
1.95	26			3.04	7.87	28.9	0.039
2.10	26			3.28	7.85	31.1	0.043
2.25	26			3.51	7.83	33.4	0.046
2.38	26			3.72	7.82	35.3	0.048
5.00	26	0.02		7.80	7.69	74.1	0.101
7.00	25	0.04		10.80	7.64	102.7	0.140
13.00	24	0.02		19.44	7.81	184.8	0.252
16.00	24			23.76		225.9	0.309

22.00	26	0.03		33.12	7.60	314.8	0.430
25.00	26	0.04		37.80	7.60	359.3	0.491
27.00	25			40.80		387.8	0.530
28.50	25	0.08		43.05	7.63	409.2	0.559
30.00	26			45.39		431.5	0.589
31.00	24	0.10		46.83	7.77	445.2	0.608
36.00	24	0.18		54.03	7.71	513.6	0.702
40.00	26	0.33		60.27	7.68	572.9	0.783
42.00	25	0.50		63.27	7.62	601.4	0.822
44.00	25	0.61		66.27	7.69	630.0	0.861
46.00	26	0.76		69.39	7.67	659.6	0.901
50.00	26	0.93		75.63	7.71	718.9	0.982
55.00	26	1.04		83.43	7.72	793.1	1.083
58.00	26	1.15		88.11	7.79	837.6	1.144
61.00	24	1.29		92.43	7.79	878.6	1.200
62.00	24	1.35		93.87	7.77	892.3	1.219
63.00	26	1.39		95.43	7.75	907.1	1.239
63.71	25	1.40		96.49	7.56	917.3	1.253
64.50	25	1.45		97.68	7.54	928.5	1.269
65.00	25	1.52		98.43	7.53	935.7	1.278
Promedio	25.50						



**Tabla 5.18. Condiciones de operación y resultados de la prueba 18 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 18	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	6.08
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.204
pH	6.63
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00154
Masa de adsorbente W (g)	67.15
Altura medio L (m)	0.292
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.91
EBCT (min)	3.57
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000092
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0250
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0015
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.68
CUR, caso arsénico (gCH/L)	44.29
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	272.69
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	16.52
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	16.23
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	0.98

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	27			0.22	7.81	2.4	0.003
0.30	26			0.48	7.71	5.2	0.007
0.47	26			0.74	7.65	8.0	0.011
0.63	26			1.00	7.61	10.9	0.015
0.80	26			1.26	7.60	13.7	0.019
0.97	26		25.1	1.52	7.55	16.5	0.023
1.13	24			1.76	7.55	19.1	0.026
1.30	26			2.02	7.53	22.0	0.030
1.48	26			2.30	7.52	25.1	0.034
1.65	26			2.56	7.39	27.9	0.038
1.85	26			2.87	7.43	31.3	0.043
2.00	26			3.11	7.37	33.9	0.046
6.23	24	0.02		9.20	7.38	100.3	0.137
16.83	22	1.16		23.19	7.60	252.8	0.345
18.00	26	1.55		25.02	7.52	272.7	0.373
18.33	28	1.63		25.57	7.31	278.7	0.381
Promedio	25.71						

**Tabla 5.19. Condiciones de operación y resultados de la prueba 19 con carbón de hueso (Dp= 0.4018 mm)**

Prueba 19	
Parámetro	Valor
Co F(mg/L)	9.00
Ce F(mg/L)	1.50
As (mg/L)	0.300
pH	6.10
Diámetro carbón (mm)	0.4018
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad del carbón (g/L), densidad aparente del lecho	731.96
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.00156
Masa de adsorbente W (g)	77.00
Altura medio L (m)	0.335
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.000314
Carga hidráulica (m/h)	4.95
EBCT (min)	4.06
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000105
Volumen de agua tratada, caso fluoruros (m <sup>3</sup> )	0.0262
Volumen de agua tratada, caso arsénico (m <sup>3</sup> )	0.0020
CUR, caso fluoruros (gCH/L)	2.93
CUR, caso arsénico (gCH/L)	38.12
Volúmenes de lecho tratados (caso fluoruros)	249.50
Volúmenes de lecho tratados (caso arsénico)	19.20
Tiempo de operación, ruptura fluoruros (h)	16.87
Tiempo de operación, ruptura arsénico(h)	1.30

Tiempo de operación	Q	Ce F	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)			(L/g)
0.00	26			0.00		0.0	0.000
0.13	25			0.20	7.76	1.9	0.003
0.30	26			0.46	7.67	4.4	0.006
0.47	26			0.72	7.61	6.8	0.009
0.63	26			0.98	7.60	9.3	0.013
0.80	26			1.24	7.59	11.8	0.016
0.97	26			1.50	7.51	14.3	0.019
1.13	26		21.0	1.76	7.46	16.7	0.023
1.30	26		28.5	2.02	7.53	19.2	0.026
1.48	26			2.31	7.48	21.9	0.030
1.65	26			2.57	7.37	24.4	0.033
1.85	26			2.88	7.40	27.4	0.037
2.00	26			3.11	7.36	29.6	0.040
6.23	26	0.04		9.71	7.21	92.3	0.126
16.83	26	1.59		26.25	7.11	249.5	0.341
17.26	26	1.73		26.92	7.15	255.9	0.350
Promedio	25.94						

### 5.1.1 Análisis estadístico

En la Tabla 5.20 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos para las dos variables de respuesta: VL a la ruptura para fluoruros y para arsénico. De estos datos es evidente que el carbón de hueso tiene una capacidad muy limitada para remover arsénico. La cantidad de agua obtenida hasta la concentración de ruptura para arsénico con respecto a la obtenida hasta la ruptura para fluoruros es sólo entre 2 y 15%, dependiendo de la condición de cada tratamiento.

**Tabla 5.20. Volúmenes de lecho al llegar al valor establecido en la NOM 127-SSA1994**

Corridas	F (mg/L)	As (mg/L)	EBCT (min)	pH	VL	VL
					Fluoruros	As
1	9.00	0.107	3.00	6.10	295.30	25.26
2	9.00	0.300	4.00	7.15	227.34	5.68
3	6.08	0.204	3.50	6.63	298.27	12.47
4	3.15	0.107	3.00	7.15	541.24	14.56
5	9.00	0.300	3.00	7.15	231.87	7.61
6	3.15	0.300	3.00	7.15	573.49	8.81
7	9.00	0.107	3.00	7.15	247.96	25.82
8	9.00	0.300	3.00	6.10	295.00	15.56
9	9.00	0.107	4.00	6.10	302.00	46.47
10	3.15	0.107	4.00	6.10	964.36	45.31
11	3.15	0.300	3.00	6.10	924.23	17.87
12	3.15	0.300	4.00	6.10	881.35	25.86
13	6.08	0.204	3.50	6.63	325.06	19.08
14	3.15	0.107	4.00	7.15	1047.58	28.83
15	3.15	0.107	3.00	6.10	1376.24	36.03
16	9.00	0.107	4.00	7.15	253.84	22.55
17	3.15	0.300	4.00	7.15	935.66	21.65
18	6.08	0.204	3.50	6.63	272.69	16.52
19	9.00	0.300	4.00	6.10	249.50	19.20

Los volúmenes de lecho (VL) tratados hasta la ruptura para fluoruros y arsénico, de las pruebas 3, 13 y 18, que corresponden a los valores centrales de los factores en estudio mostraron una baja variabilidad. Para fluoruros el valor promedio de la respuesta fue de 298.6, la desviación estándar de 26.19 y el coeficiente de variación de 0.09. Para arsénico el valor promedio de la respuesta es de 16.02, la desviación estándar de 3.33 y el coeficiente de variación de 0.21. En la Figura 5.1 se presentan los gráficos de columnas con los valores de la respuesta (VL a la ruptura) correspondientes a los ensayos centrales para cada uno de los contaminantes. Estos datos demuestran que los resultados son confiables.

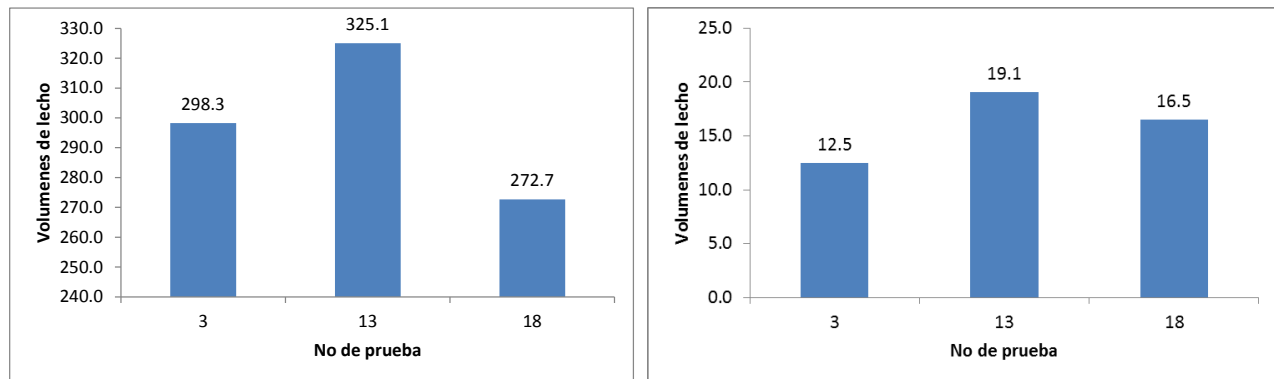


Figura 5.1. Valores de VL a la ruptura para el caso fluoruros (izq) y para arsénico (der) en las pruebas de valores centrales del diseño experimental

#### 5.1.1.1.1 Análisis con el programa estadístico Statgraphics centurión para fluoruros

De las variables estudiadas (concentración de fluoruros, concentración de arsénico, EBCT y pH) solo la variable concentración de fluoruros resultó significativa ya que el estadístico P fue menor que 0.05 (Tabla 5.21), indicando que es significativamente diferente de cero con un nivel de confianza de 95%. Es decir, fue la que mostró mayor peso específico sobre la respuesta volúmenes de lecho tratados. Este efecto se muestra en la gráfica de Pareto (Figura 5.2) y en la Figura 5.3 se muestran los efectos principales de las variables estudiadas donde se observa que el incremento del número de volúmenes de lecho tratados se ve favorecidos cuando la concentración de fluoruros estuvo en su nivel bajo.

Tabla 5.21. Anova para las variables del diseño experimental estudiado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentración F	1.65209E6	1	1.65209E6	36.62	0.0003
B:Concentración As	31513.4	1	31513.4	0.70	0.4275
C:EBCT	8850.11	1	8850.11	0.20	0.6696
D:pH	94402.6	1	94402.6	2.09	0.1860
AB	16854.5	1	16854.5	0.37	0.5580
AC	12723.8	1	12723.8	0.28	0.6098
AD	47026.1	1	47026.1	1.04	0.3371
BC	1644.71	1	1644.71	0.04	0.8533
BD	13546.6	1	13546.6	0.30	0.5987
CD	116182.	1	116182.	2.58	0.1472
Error total	360893.	8	45111.7		
Total (corr.)	2.35572E6	18			

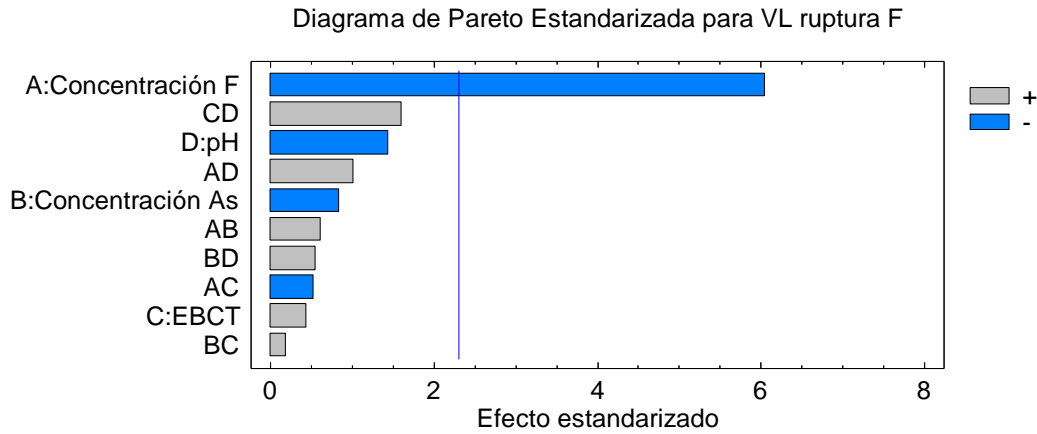


Figura 5.2. Gráfico de Pareto para el nivel de significancia

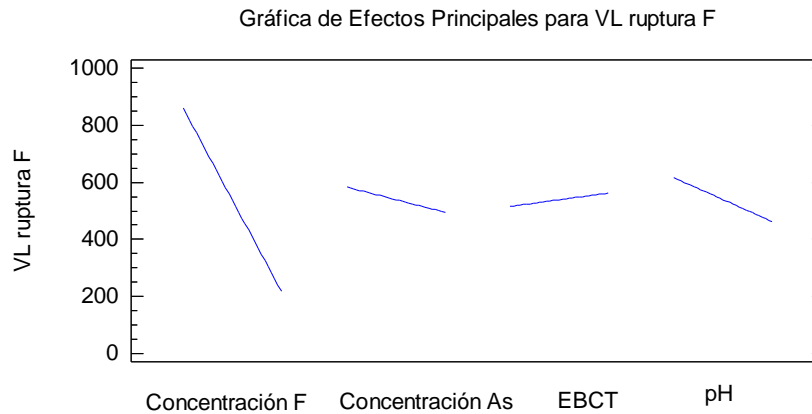
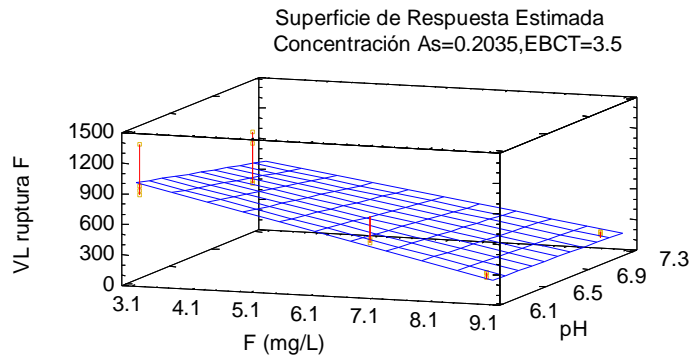


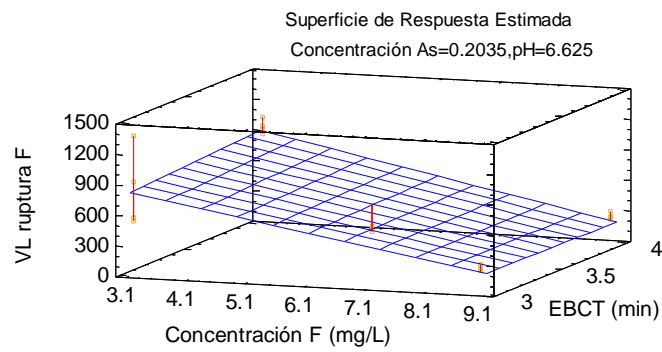
Figura 5.3. Gráfico de efectos principales de las variables estudiadas

De estos datos se puede decir que las siguientes condiciones favorecen el desempeño del carbón de hueso como adsorbente de fluoruros: concentración baja de fluoruros y en menor medida pH en su valor bajo. Da lo mismo cualquier concentración de arsénico y tiempo de contacto entre los niveles estudiados.

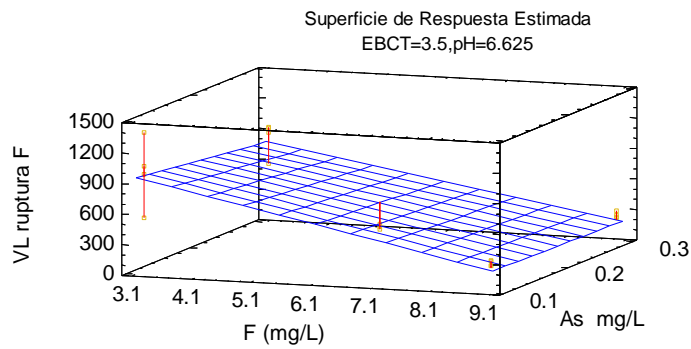
La gráfica de superficie de respuesta mostró un comportamiento lineal (Figura 5.4) ), se destaca que cuando las concentraciones de fluoruros fueron bajas se tuvieron cantidades mayores de volúmenes de lecho tratados sin importar el nivel de los otros factores en estudio.



a)



b)



c)

Figura 5.4. Gráficos de superficie de respuesta

En la Tabla 5.22 se muestran los coeficientes de regresión para un modelo lineal para predecir la variable VL fluoruros.

**Tabla 5.22 Coeficientes de regresión para VL fluoruros**

Coeficiente	Estimado
constante	11709.0
A:Concentración F	-299.659
B:Concentración As	-5698.89
C:EBCT	-2029.22
D:pH	-1613.84
AB	114.986
AC	-19.2821
AD	35.304
BC	210.13
BD	574.34
CD	324.624

Revisando la información presentada en el gráfico de Pareto Figura 5.2, los factores concentración de fluoruros, pH y la interacción pH-tiempo son los que más contribuyen a la respuesta VL fluoruros. Por lo anterior el modelo se propone como sigue:

$$VL \text{ ruptura } F = 11709.0 - 299.659 * \text{Concentración } F - 2029.22 * \text{EBCT} - 1613.84 * \text{pH} + 324.624 * \text{EBCT} * \text{pH}$$

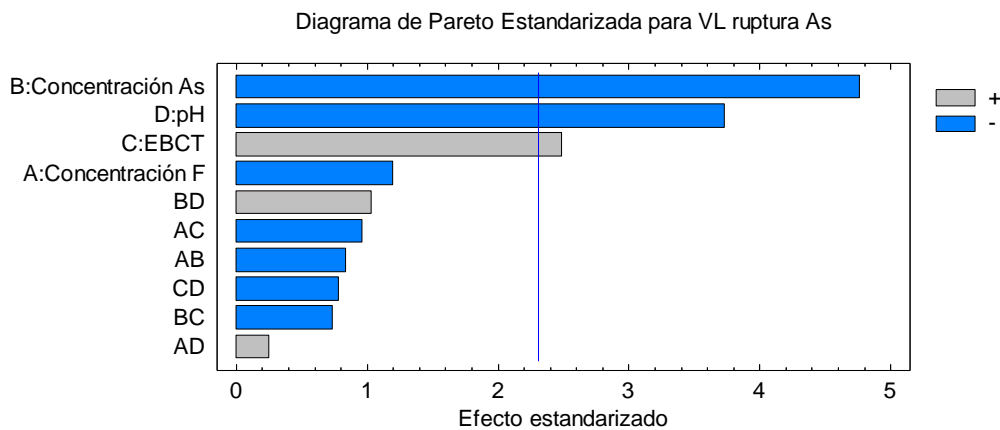
Este modelo lineal tiene un coeficiente de correlación  $R^2 = 84 \%$  que es aceptable y puede ser usado para realizar predicciones.

### 5.1.1.1.2 Análisis con el programa estadístico Statgraphics centurión para arsénico

La Tabla 5.23 muestra el análisis de varianza obtenido para el caso arsénico. Los factores que tuvieron un efecto significativo ( $\alpha$ , 0.05) sobre la variable de respuesta volúmenes de lecho (VL) fueron la concentración de arsénico, el pH y el tiempo de contacto de lecho vacío. La concentración de fluoruros y las interacciones entre factores no tuvieron influencia significativa. Lo mismo puede verse gráficamente en la (Figura 5.5, Gráfico de Pareto).

**Tabla 5.23. Análisis de varianza del diseño experimental estudiado**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Concentración F	59.1746	1	59.1746	1.43	0.2661
B:Concentración As	939.269	1	939.269	22.69	0.0014
C:EBCT	256.24	1	256.24	6.19	0.0376
D:pH	576.6	1	576.6	13.93	0.0058
AB	28.9175	1	28.9175	0.70	0.4275
AC	38.2233	1	38.2233	0.92	0.3647
AD	2.55201	1	2.55201	0.06	0.8102
BC	22.4439	1	22.4439	0.54	0.4826
BD	44.1228	1	44.1228	1.07	0.3321
CD	25.5278	1	25.5278	0.62	0.4549
Error total	331.162	8	41.3952		
Total (corr.)	2324.23	18			

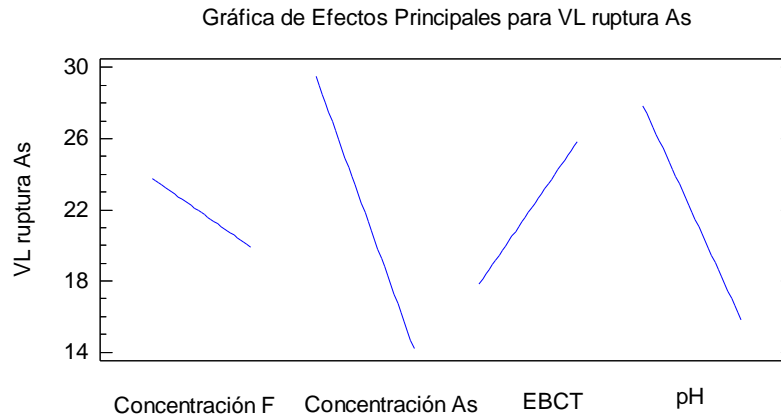


**Figura 5.5. Gráfico de Pareto (nivel de significancia)**

Aunque la capacidad de adsorción de arsénico brindada por el carbón de hueso fue baja (manifestada en los volúmenes de lecho obtenidos a la concentración de ruptura). Se tiene evidencia suficiente para señalar que el aumento en la concentración inicial de arsénico tuvo

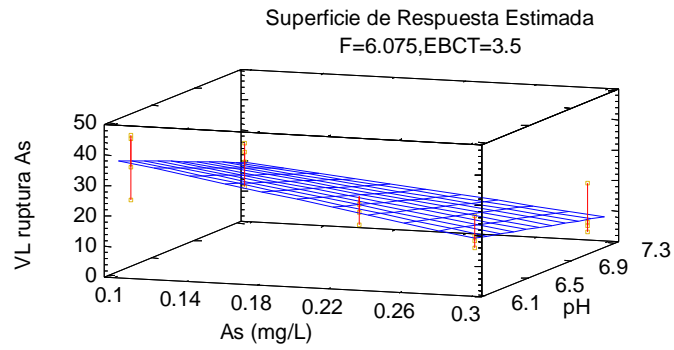


efectos negativos, es decir los volúmenes de lecho tratados disminuyeron; así mismo el aumento en el pH reveló el mismo efecto sobre la variable; por el contrario un aumento en el tiempo de contacto favorece el incremento de VL.

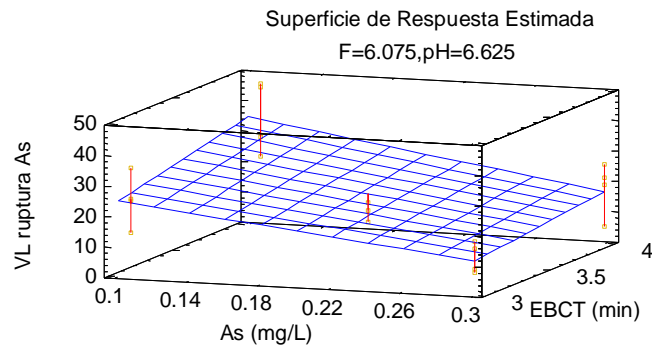


**Figura 5.6. Gráfico de efectos principales. Caso arsénico.**

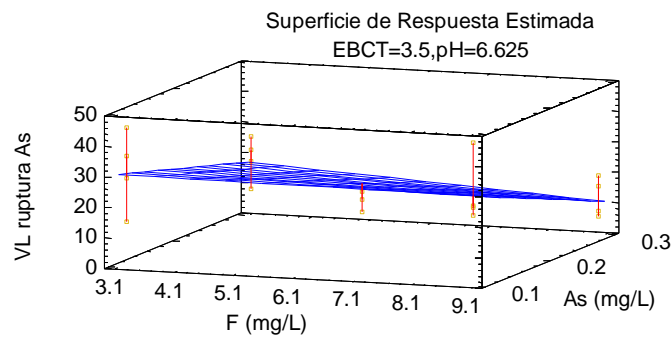
Se tuvo un comportamiento lineal de los factores estudiados, esto se muestra en la gráfica de superficie de respuesta (Figura 5.7), (a) el aumento en los volúmenes de lecho (VL) fue favorecido a valores de pH bajos así como en concentraciones bajas de arsénico; (b) se obtienen valores más altos de VL para tiempos de contacto altos y concentración de arsénico baja y (c) La concentración de fluoruro no tiene impacto sobre el valor de VL.



a)



b)



c)

Figura 5.7. Superficie de respuesta. Caso arsénico

**Tabla 5.24 Coeficientes de regresión para VL a ruptura de As**

Coefficiente	Estimado
constante	-13.0186
A:Concentración F	2.28771
B:Concentración As	-181.706
C:EBCT	51.2981
D:pH	-2.84316
AB	-4.76285
AC	-1.05684
AD	0.260073
BC	-24.5466
BD	32.7782
CD	-4.8119

La ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos, considerando los factores de influencia es el siguiente:

$$VL \text{ ruptura As} = -13.0186 - 181.706 * \text{Concentración As} + 51.2981 * \text{EBCT} - 2.84316 * \text{pH}$$

Este modelo tiene una  $R^2 = 85.75\%$  que se considera suficiente para establecer que el modelo puede predecir de manera adecuada la respuesta del sistema.

De acuerdo a los resultados obtenidos se establece que:

a) el carbón de hueso es un adsorbente específico para fluoruros y no es eficiente para remover arsénico.

b) de los factores estudiados el que más influye sobre la cantidad de agua que puede tratarse, hasta antes de rebasar el límite permisible de fluoruros, es la concentración de fluoruros del agua que se somete a tratamiento, sin embargo condiciones de pH bajo ( $\text{pH} = 6.1$ ) y tiempos de contacto de 4 minutos incrementan ligeramente el desempeño del medio adsorbente. Para tratar agua con una concentración de fluoruros de  $3.15 \text{ mg/L}$ , un pH de 6.1 y tiempo de contacto de 4 minutos, un adsorbente en columna con un lecho de  $1 \text{ m}^3$  de carbón de hueso puede producir  $1376 \text{ m}^3$  de agua que cumple el valor permisible de  $1.5 \text{ mg/L}$  de fluoruros.

c) la presencia de arsénico en las concentraciones abarcadas en este estudio no tiene un impacto negativo en la eficiencia del adsorbente para remover fluoruros.

## 5.2 Adsorción con Phoslock

### 5.2.1 Caracterización de Phoslock

#### 5.2.1.1 Composición elemental

El resultado emitido por el IPICYT es mostrado en la Tabla 5.25 que muestra los valores de cada elemento detectado, se destaca un mayor porcentaje de Ca con un 26.20 %, Fe con un 21.0 % y Al 14.68 %. Este estudio relaciona la cantidad de masa de elemento presente por kilogramo de material. Este análisis no detectó Lantano y es posible que esté presente en el material en cantidades muy pequeñas que no pueda ser cuantificado por este procedimiento.

Tabla 5.25. Composición elemental del phoslock

Analito	Unidades	Valor	Analito	Unidades	Valor
Ag	mg/Kg	0.00	Mn	mg/Kg	17.50
Al	mg/Kg	519.98	Mo	mg/Kg	0.83
As	mg/Kg	3.21	Na	mg/Kg	168.36
B	mg/Kg	6.60	Ni	mg/Kg	0.50
Ba	mg/Kg	118.66	P	mg/Kg	37.43
Be	mg/Kg	0.00	Pb	mg/Kg	12.90
Ca	mg/Kg	927.77	Sb	mg/Kg	2.59
Cd	mg/Kg	0.00	Se	mg/Kg	0.00
Co	mg/Kg	0.20	Si	mg/Kg	261.98
Cr	mg/Kg	0.30	Sn	mg/Kg	161.85
Cu	mg/Kg	6.85	Sr	mg/Kg	5.12
Fe	mg/Kg	743.55	Tl	mg/Kg	0.00
K	mg/Kg	118.90	V	mg/Kg	0.80
Li	mg/Kg	2.36	Zn	mg/Kg	30.71
Mg	mg/Kg	391.47			

#### 5.2.1.2 Análisis de área superficial y porosidad

El área superficial BET determinada para el Phoslock (Tabla 5.26) fue de 30.02 m<sup>2</sup>/g, la cual es 3.25 veces más chica que la del carbón de hueso (97.70 m<sup>2</sup>/g) y 10.35 veces menor que la de la alúmina activada (310.96 m<sup>2</sup>/g). El diámetro de poro promedio encontrado estuvo entre 9.6 y 16.25 nm, por lo tanto el material es clasificado como mesoporoso, de acuerdo a la Unión de Química Pura y Aplicada (IUPAC), que por convención clasifica en esta clase a las sustancias cuyo diámetro de poro está entre 20 y 500 nm.

El ancho de poro promedio BET (una forma de medir el diámetro de poro) del Phoslock es de 130 Å y es similar al de carbón de hueso (116 Å = 11.6 nm) y mayor a de la alúmina activada (41 Å = 4.1 nm).

**Tabla 5.26. Análisis de área superficial y porosidad del phoslock**

Tipo de análisis	Valor	Unidades
Área superficial BET (Brunauer-Emett-Teller)	30.02	m <sup>2</sup> /g
Área superficial (Langmuir)	42.19	m <sup>2</sup> /g
Área de microporo (t-plot)	3.24	m <sup>2</sup> /g
Área superficial acumulativa por el Método BJH (Barrett, Joyner y Halenda)	29.66	m <sup>2</sup> /g
Volumen de microporo (t-plot)	0.0015	cm <sup>3</sup> /g
Volumen de poro acumulativo (Método BJH)	0.12	cm <sup>3</sup> /g
Ancho de poro promedio (BET)	130.55	Å
Diámetro de poro promedio (Adsorción BJH)	162.95	Å
Diámetro de poro promedio (Adsorción BJH)	96.43	Å
Volumen en poro menor a 14.83 A por el método Density Functional Theory (DFT)	0.002	cm <sup>3</sup> /g
Volumen total en poros menores a 1005.60 A (Método DFT)	0.098	cm <sup>3</sup> /g
Área total en poros menores a 1005.60 A (Método DFT)	7.65	m <sup>2</sup> /g
Área total (Método DFT)	31.23	m <sup>2</sup> /g
Mediana del ancho de poro (Método Horvath-Kawazoe)	493.14	Å
Área superficial de microporo (Método Dubinin-Astakhov)	24.25	m <sup>2</sup> /g

1 Å = 0.1 nm

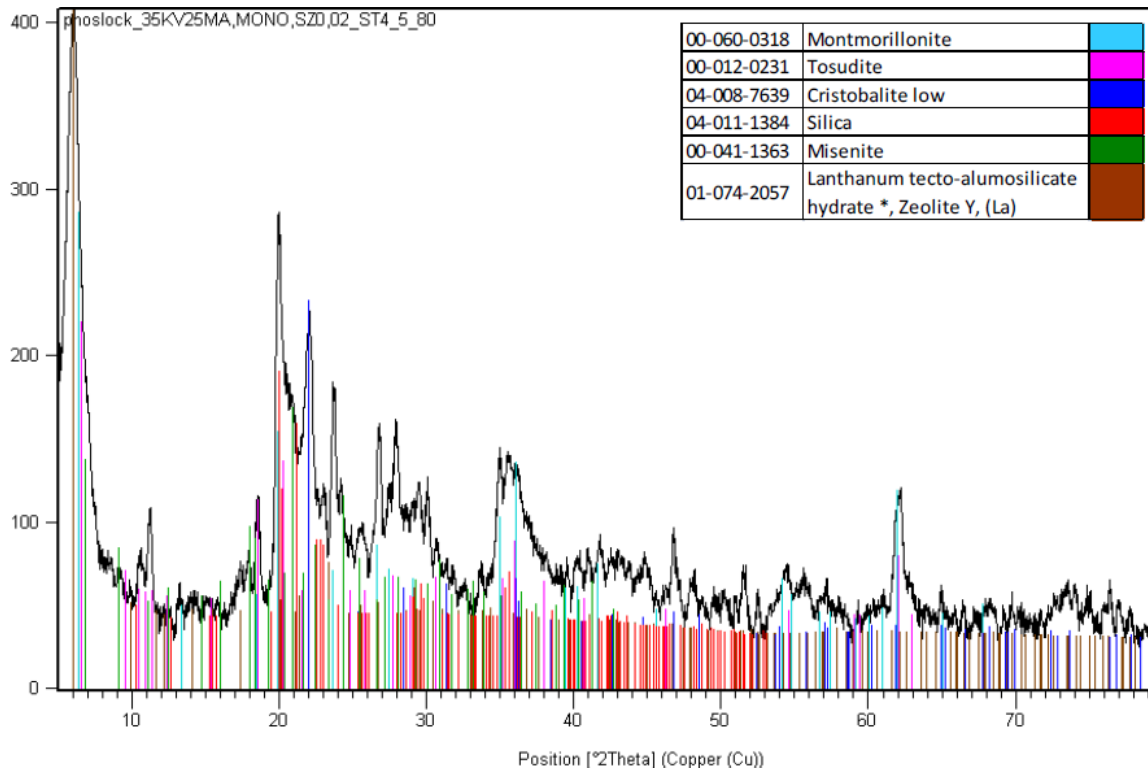
### 5.2.1.3 Difracción de rayos X

El conjunto de patrones de difracción encontrados en este análisis fueron seis, montmorillonita, tosudita, cristobalita, sílice, misenita y zeolita (tecto-aluminosilicato de lantano hidratado), esto es mostrado en la Tabla 5.27 y la Figura 5.8, esta tabla muestra también la composición química de cada una de las fases cristalinas.

A diferencia de los resultados obtenidos en el análisis de composición elemental, en estos resultados si se observa presencia de lantano en algunas de las fases cristalinas del material.

**Tabla 5.27. Fases cristalinas encontradas en el análisis de difracción de rayos X**

Referencia ICDD: PDF-4+ 2012	Nombre del compuesto	Fórmula química
00-060-0318	Montmorillonite	( Ca , Na )0.3 Al2 ( Si , Al )4 O10 ( O H )2 ·x H2 O
00-012-0231	Tosudite	Na0.3 Al6 ( Si , Al )8 O20 ( O H )10 ·4 H2 O
04-008-7639	Cristobalite low	Si O2
04-011-1384	Silica	Si O2
00-041-1363	Misenite	K8 ( S O4 ) ( S O3 O H )6
01-074-2057	Lanthanum tecto-alumosilicate hydrate*, Zeolite Y, (La)	La20.7 Al62 Si130 O384 ( H2 O )34.2



**Figura 5.8. Fases cristalinas del phoslock identificadas por rayos X**

#### 5.2.1.4 Microscopía electrónica de barrido SEM

En las micrografías del Phoslock analizado (Figura 5.9), se observa la forma general donde se aprecian muy variados tamaños de partículas, mismos que comprenden un intervalo de entre 5 y 380 micrómetros. Cabe señalar que cada uno de estos aglomerados se conforma por partículas más pequeñas del orden de 10 micras y menores.

En general, la muestra presenta partículas de mayor brillantez con un tamaño promedio de 3.0 micrómetros, mismas que resaltan en contraste debido a que presentan mayor contenido de lantano (Figura 5.10).

Después de caracterizar superficialmente la muestra en polvo de Phoslock se puede argumentar que el material se conforma por una matriz con alto contenido de Si-O atribuible a la variada base de silicatos de la cual está hecha, misma razón por la que se presentan en menor proporción cantidades de elementos como Al, Mg, Ca, Na y Fe. En forma generalizada se aprecia una distribución uniforme de partículas con alto contenido de lantano, con tamaño promedio de 3.0 micrómetros, cuyo porcentaje en peso en la composición elemental de La por Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) fluctúa de entre el 6 y 20%.

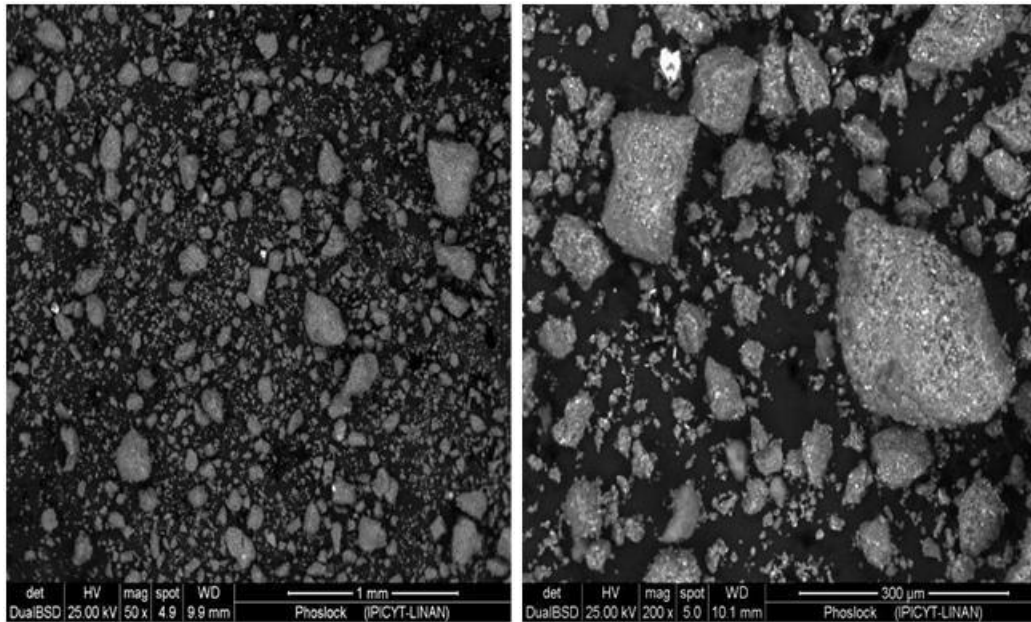


Figura 5.9. Morfología general de la muestra de phoslock

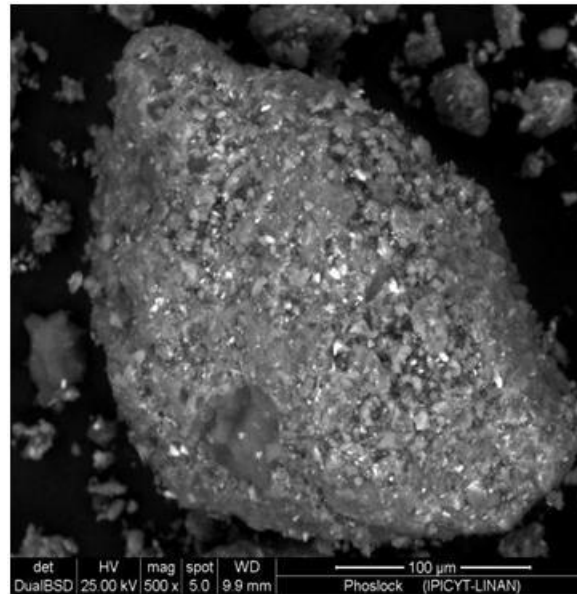


Figura 5.10. Aglomerado con contenidos de lantano

## 5.2.2 Isotermas de adsorción

### 5.2.2.1 Isotermas de adsorción a pH 7.0

La Tabla 5.28 muestra las condiciones de operación en que se trabajó para las isotermas de adsorción realizadas a pH 7.0. A manera de control se dejó un testigo (jarra 6) con el fin de detectar variaciones del pH con y sin los iones en estudio. El valor de conductividad eléctrica (CE) corresponde a los niveles alcanzados antes de la adición de Phoslock. Co F<sup>-</sup> y Co As corresponden a las concentraciones iniciales de fluoruros y arsénico respectivamente

Tabla 5.28. Condiciones de operación a pH 7.0

Jarra	Co F (mg/L)	Co As (µg/L)	pH	T (°C)	CE (µS/cm)
1	1.53	22	7.0	23	38
2	3.45	59	7.0	23	42.8
3	5.4	96	7.0	23	57.9
4	7.57	300	7.0	23	120.3
5	10	480	7.0	23	156.6
6	-	-	7.0	23	21.5

### 5.2.2.1.1 Concentración de fluoruros en equilibrio

El comportamiento de la concentración de fluoruros en cada una de las jarras es mostrado en la Figura 5.11. Las jarras 1, 2 y 3 mostraron una tendencia muy similar. También se observa que en todas las concentraciones trabajadas a partir de las 50 horas de operación tienden al equilibrio. Al detectar este punto se dejó correr el experimento para asegurarse que no hubiera variaciones en las concentraciones de fluoruros. Los datos completos para cada una de las concentraciones que se trabajaron son mostrados en la Tabla 5.29. Con la finalidad de conocer las posibles variaciones del pH (Tabla 5.30) se dejó un testigo al cual solo se le adicionó la misma masa de phoslock (2.0 g) que en el resto de las jarras. Las variaciones del pH para cada experimento fueron muy similares a las que presentó el testigo (ausencia de los iones en estudio) con valores que estuvieron entre 7.47 y 7.69.

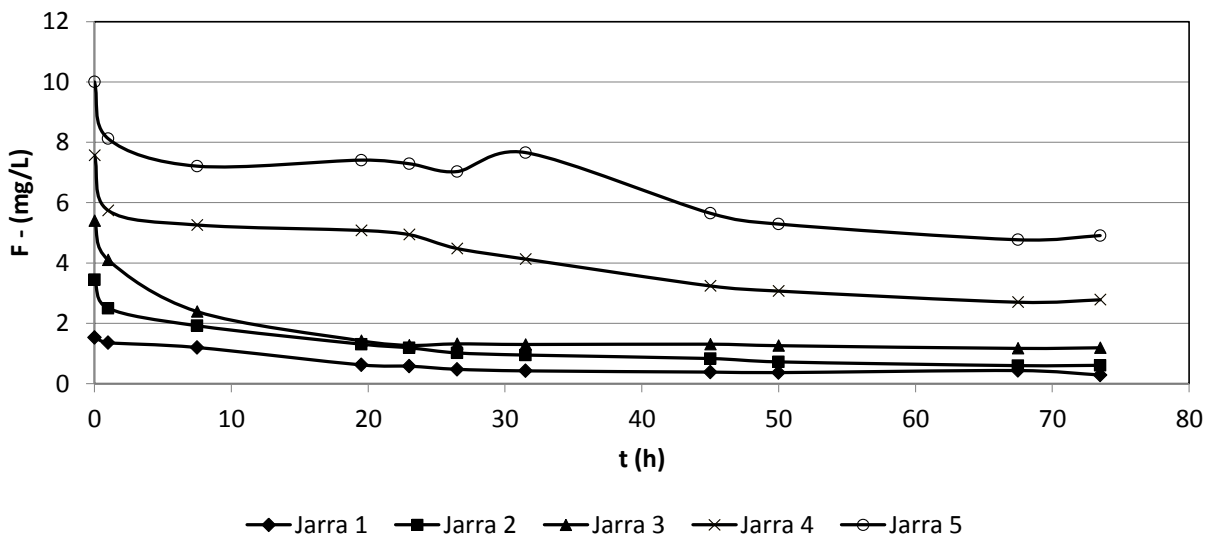


Figura 5.11. Comportamiento de las concentraciones de fluoruros a pH 7.0



**Tabla 5.29. Concentraciones de fluoruros hasta el equilibrio**

Jarra	Co F <sup>-</sup> (mg/L)	1 h	7.5 h	19.5 h	23 h	26.5 h	31.5 h	45 h	50 h	67.5 h	73.5 h
		Concentración de fluoruros (mg/L)									
1	1.53	1.36	1.2	0.622	0.581	0.477	0.425	0.385	0.368	0.436	0.288
2	3.45	2.5	1.92	1.31	1.19	1.02	0.949	0.835	0.723	0.599	0.609
3	5.40	4.1	2.39	1.42	1.27	1.32	1.3	1.31	1.26	1.17	1.19
4	7.57	5.74	5.26	5.08	4.94	4.48	4.13	3.24	3.07	2.7	2.78
5	10.0	8.12	7.21	7.41	7.29	7.03	7.66	5.65	5.29	4.77	4.91
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabla 5.30. Valores de pH registrados durante el monitoreo de las pruebas de adsorción**

Jarra	F <sup>-</sup> (mg/L)	1 h	7.5 h	19.5 h	23 h	26.5 h	31.5 h	45 h	50 h	67.5 h	73.5 h
		Valores de pH registrados									
1	1.53	-	-	7.69	7.68	7.56	-	7.60	7.56	7.57	7.56
2	3.45	-	-	7.62	7.60	7.57	-	7.56	7.54	7.54	7.50
3	5.40	-	-	7.62	7.60	7.59	-	7.58	7.55	7.56	7.49
4	7.57	-	-	7.51	7.48	7.51	-	7.49	7.48	7.47	7.45
5	10.0	-	-	7.52	7.48	7.48	-	7.50	7.52	7.50	7.47
6	-	-	-	7.59	7.53	7.49	-	7.43	7.45	7.45	7.44

En la Figura 5.12 se puede observar que no se presentaron incrementos significativos de sólidos disueltos en el agua durante los experimentos desarrollados para la obtención de las isotermas de adsorción, ya que al determinar la conductividad eléctrica (CE) una vez concluidas las pruebas, esta se mantuvo muy similar que en un inicio (sin adición de adsorbente). Respecto a los valores monitoreados de temperatura del agua durante el desarrollo de estos experimentos estuvieron entre 20 y 23 °C.

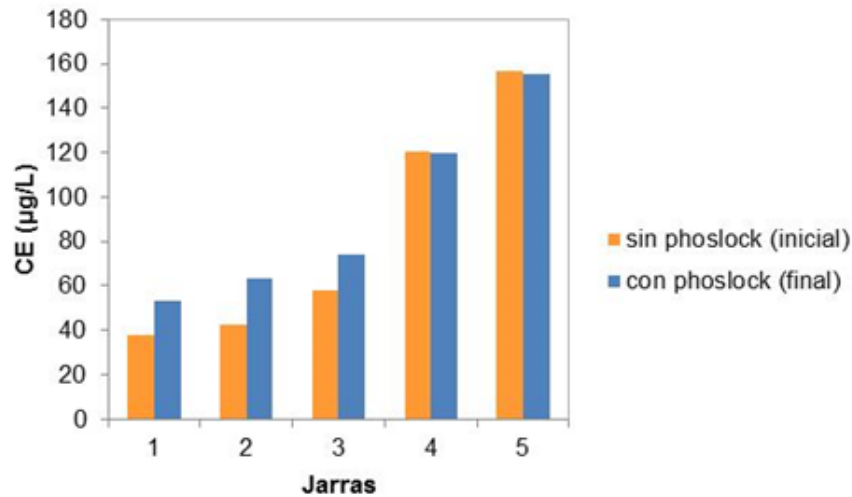


Figura 5.12. Conductividad eléctrica antes y después de la adición de phoslock

#### 5.2.2.1.2 Obtención de las constantes de adsorción (Langmuir y Freundlich) a pH 7.0

Los cálculos para la obtención de las isothermas de adsorción representados en los modelos de Langmuir y Freundlich se muestran en la Tabla 5.31 y las formas linealizadas de estos modelos se presentan en la Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15 destacándose que el adsorbente Phoslock obedece a un modelo de Langmuir tipo II ya que tuvo un mejor ajuste ( $R^2 = 0.98$ ).

Tabla 5.31. Cálculo de las isothermas de adsorción para Freundlich y Langmuir a pH 7.0

Co	Ce	Co-Ce	F <sup>-</sup> removidos	qe=x/m	Freundlich		Langmuir		
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/g	log qe	log Ce	1/Ce	1/qe	Ce/qe
1.53	0.29	1.24	2.48	2.48	0.0941	-0.541	3.4722	0.8052	0.2319
3.45	0.61	2.84	5.68	5.68	0.4535	-0.215	1.6420	0.3520	0.2144
5.40	1.19	4.21	8.42	8.42	0.6243	0.0755	0.8403	0.2375	0.2827
7.57	2.78	4.79	9.58	9.58	0.6803	0.4440	0.3597	0.2088	0.5804
10.00	4.91	5.09	10.18	10.18	0.7067	0.6911	0.2037	0.1965	0.9646

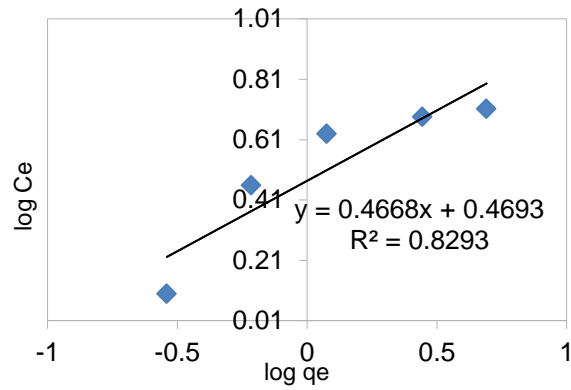


Figura 5.13. Modelo linealizado de la isoterma de Freundlich a pH 7.0

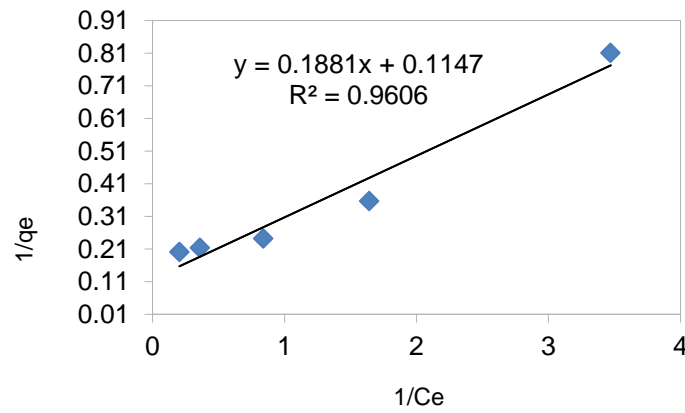


Figura 5.14. Modelo linealizado de la isoterma de Langmuir tipo I a pH 7.0

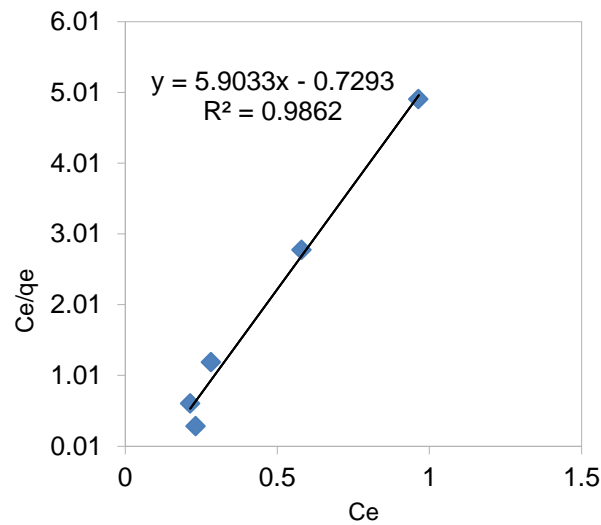


Figura 5.15. Modelo linealizado de la isoterma de Langmuir tipo II a pH 7.0

La Tabla 5.32 muestra los valores de las constantes de adsorción obtenidas a pH 7.0 para los modelos de Freundlich, Langmuir I y Langmuir II. La diferencia de los valores de  $q_m$  entre las isothermas tipo I y tipo II de Langmuir fue de 2.74 mg/g. La forma de la isoterma encontrada se muestra en la Figura 5.16, la cual tiene una forma de isoterma favorable según Cooney, 1999.

Atendiendo a que el ajuste con el modelo linealizado de Langmuir II es al que más se ajustan los datos experimentales, la  $q$  máxima es de 5.98 mg F<sup>-</sup>/g de Phoslock, éste es un valor similar a lo encontrado para alúmina activada (K de la ecuación de Freundlich = 4.93 mg/g para pH=6.5) o carbón de hueso (K de la ecuación de Freundlich = 4.56 mg/g para pH=7.0).

Tabla 5.32. Constantes de adsorción obtenidas a pH 7.0

Constantes Freundlich			Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II	
1/n	nf	Kf	$q_m$	b	$q_m$	b
0.47	2.14	2.95	8.72	0.61	5.98	1.30

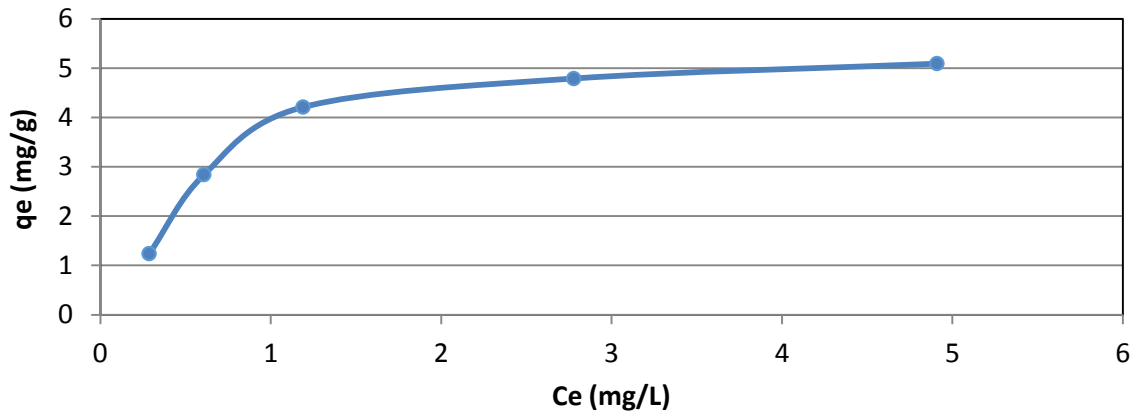


Figura 5.16. Forma de isoterma encontrada a pH 7.0

#### 5.2.2.1.3 Remoción de arsénico al tiempo de tener las concentraciones en equilibrio de fluoruros.

Una vez que se logró el equilibrio de las concentraciones de fluoruros en cada ensayo, en este tiempo se colectaron muestras y se filtraron por 0.45  $\mu$ m para realizar las determinaciones de arsénico y obtener las eficiencias de remoción (ER) logradas por el adsorbente phoslock. Estos resultados son mostrados en la siguiente Tabla 5.33.

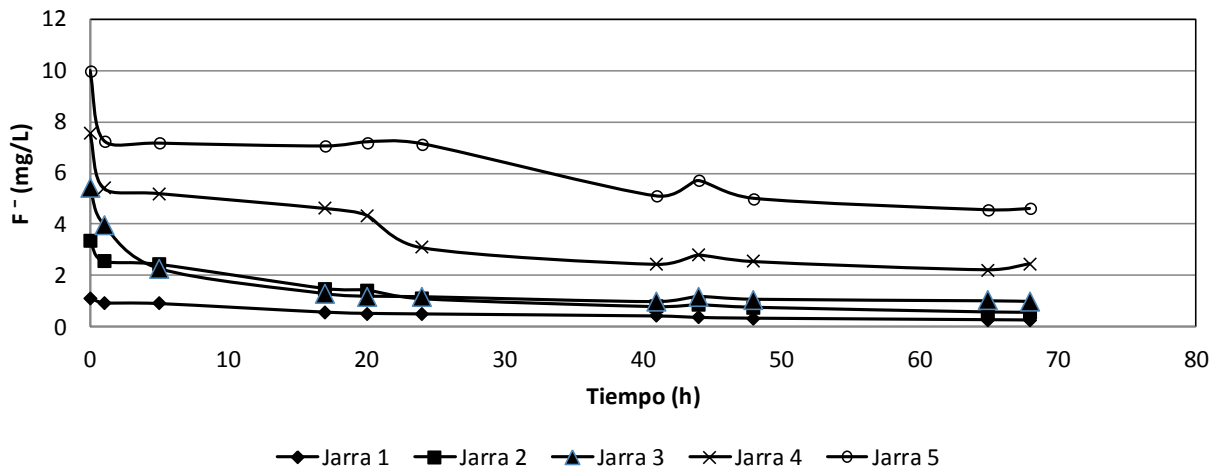
**Tabla 5.33. Eficiencias de remoción de arsénico al tiempo de equilibrio de fluoruros**

Jarra	F <sup>-</sup> eq (mg/L)		As (µg/L)		Remoción As(%)
	Inicial	final	Inicial	final	
1	1.53	0.288	22	12	45.45
2	3.45	0.609	59	15	74.57
3	5.4	1.19	96	0	100
4	7.57	2.78	300	20	93.33
5	10	4.91	480	63	86.87

#### 5.2.2.1.4 Isotermas de adsorción a pH 6.0

Las condiciones de operación en esta etapa del estudio fueron las mismas que se mencionan en el apartado 5.2.2.1, lo único que se modificó fue el valor del pH inicial. Posteriormente se hizo el mismo análisis para obtener las isotermas de adsorción, esto para la condición de concentración en equilibrio de fluoruros y en este tiempo se obtuvieron las remociones de arsénico.

La Figura 5.17 muestra las curvas de comportamiento para cada una de las concentraciones que se evaluaron, de manera general, estos experimentos tuvieron un comportamiento similar a los ensayos con pH 7.0.



**Figura 5.17. Comportamiento de las concentraciones de fluoruros a pH 6.0**

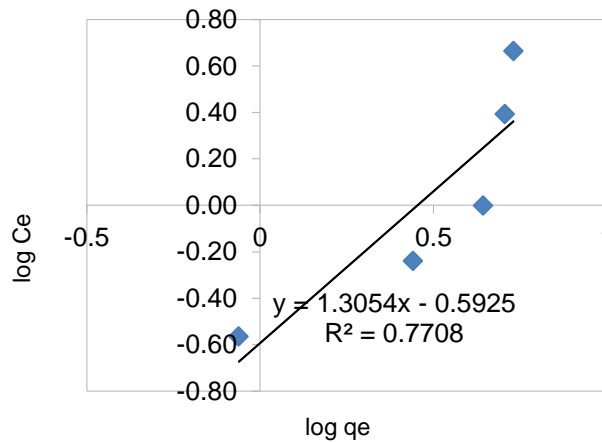
#### 5.2.2.1.5 Obtención de las constantes de adsorción (Langmuir y Freundlich) a pH 6.0

A continuación se muestran los resultados de los cálculos realizados para la obtención de las isotermas de Langmuir y Freundlich (Tabla 5.34) y las formas linealizadas de estos modelos se muestran en la Figura 5.18, Figura 5.19 y Figura 5.20. Se puede ver que al igual que en las

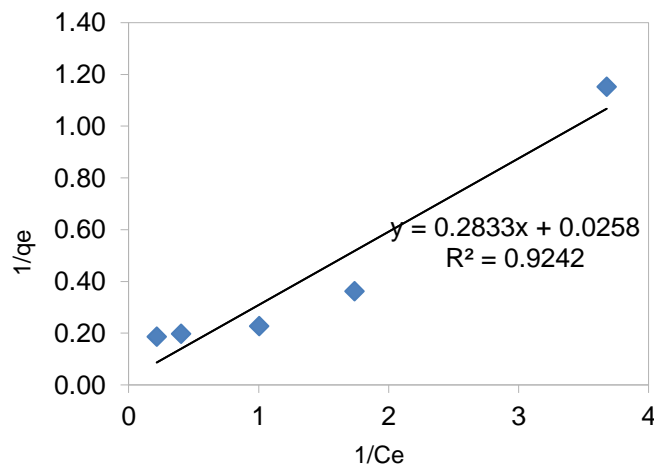
pruebas a pH 7.0, en estos ensayos el modelo mejor ajustado fue el de Langmuir con estrechos valores de correlación en los modelos tipo I y tipo II (0.924 y 0.923) respectivamente.

**Tabla 5.34. Cálculo de las isotermas de adsorción para Freundlich y Langmuir a pH 6.0**

Co	Ce	Co-Ce	F removido	qe=x/m	Freundlich		Langmuir		
mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/g	log qe	log Ce	1/Ce	1/qe	Ce/qe
1.14	0.27	0.87	1.74	0.87	-0.061	-0.565	3.6765	1.1521	0.3134
3.34	0.58	2.77	5.53	2.77	0.4417	-0.24	1.7391	0.3617	0.208
5.40	1.00	4.40	8.81	4.40	0.6438	-0.002	1.004	0.2271	0.2262
7.55	2.47	5.08	10.16	5.08	0.7059	0.3927	0.4049	0.1969	0.4862
10.00	4.62	5.38	10.76	5.38	0.7308	0.6646	0.2165	0.1859	0.8587



**Figura 5.18. Modelo de adsorción de Freundlich a pH 6.0**



**Figura 5.19. Modelo linealizado de la isoterma de Langmuir tipo I a pH 6.0**

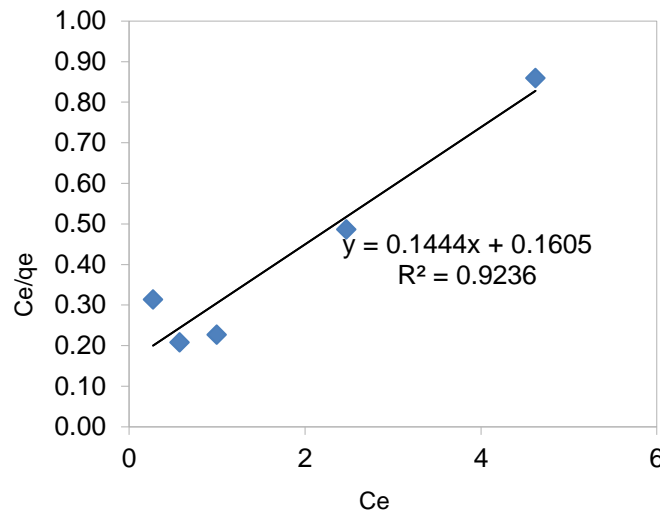


Figura 5.20. Modelo linealizado de la isoterma de Langmuir tipo II a pH 6.0

La forma de la isoterma obtenida a este valor de pH trabajado es mostrada en la Figura 5.21 y en la Tabla 5.35 se mencionan los valores de las constantes obtenidas en este estudio. Al igual que para pH=7.0, en este caso también se presenta una forma de la isoterma favorable para la adsorción de fluoruros. Comparando las constantes  $q_m$  del modelo de Langmuir II obtenidos para las dos diferentes condiciones de pH se observa que a pH más ácido el Phoslock incrementa ligeramente su capacidad de adsorción de fluoruros.

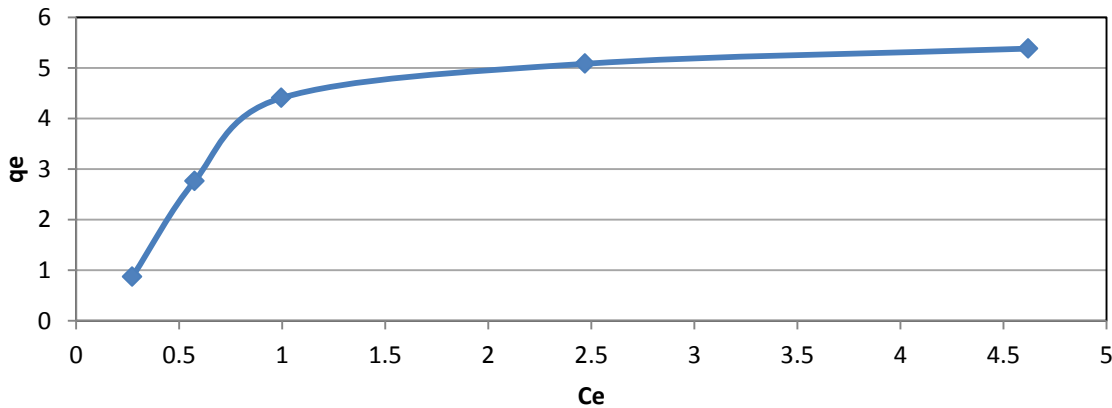


Figura 5.21. Forma de isoterma encontrada a pH 6.0

**Tabla 5.35. Constantes de adsorción a pH 6.0**

Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
qm	b	qm	b	1/n	nf	Kf
38.76	0.09	6.93	0.90	0.59	1.69	2.90

5.2.2.1.6 Eficiencias de remoción de arsénico en el equilibrio de las concentraciones de fluoruros

La Tabla 5.36 muestra las eficiencias de remoción de arsénico logradas cuando la concentración de fluoruros alcanzó el equilibrio, para este caso se consideró un tiempo de 68 h de tiempo de contacto.

**Tabla 5.36. Eficiencias de remoción de arsénico al tiempo de equilibrio de fluoruros a pH 6.0**

Jarra	F <sup>-</sup> (mg/L)		As (µg/L)		Remoción As (%)
	Inicial	final	Inicial	final	
1	1.14	0.27	22	4	81.82
2	3.34	0.58	59	21	64.41
3	5.4	1.00	96	51	46.88
4	7.55	2.47	300	24	92.00
5	10	4.62	480	63	86.88

### 5.3 Adsorción con lodos de hidróxidos de aluminio

#### 5.3.1 Caracterización del Lodo producido por electrocoagulación

##### 5.3.1.1 Composición elemental

La composición elemental de la muestra determina que el componente principal es el aluminio, otros elementos están presentes en cantidades mínimas. Los resultados se presentan en la Tabla 5.37.

**Tabla 5.37 Resultados composición elemental LEC**

Analito	Cantidad (%)
Al	32.18
Ca	0.39
Fe	0.08
K	0.03
Na	0.23
Si	0.07



### 5.3.1.2 Área superficial y porosidad

Se determinaron diferentes parámetros físicos de las muestras entre los cuales se encuentran; área superficial (BET y Langmuir), área superficial externa (t-plot), área acumulativa de poros, distribución del área de poro, volumen de poro y tamaño de poro, entre otros, Tabla 5.38.

**Tabla 5.38 Análisis de área superficial y porosidad de lodos de electrocoagulación, LEC**

	Valor	Unidades
Área superficial BET (Brunauer-Emett-Teller)	350.19	m <sup>2</sup> /g
Área superficial (Langmuir)	501.77	m <sup>2</sup> /g
Área de microporo (t-plot)	20.66	m <sup>2</sup> /g
Área superficial externa (t-Plot)	329.53	m <sup>2</sup> /g
Área superficial acumulativa en poros de diámetro entre 17 y 3000 Å por el Método BJH (Barrett, Joyner y Halenda)	358.86	m <sup>2</sup> /g
Volumen de microporo (t-plot)	0.007	cm <sup>3</sup> /g
Volumen acumulativo en poros de diámetro entre 17 y 3000 Å por adsorción por el método BJH	0.76	cm <sup>3</sup> /g
Ancho de poro promedio (Método BET 4V/A)	84.38	Å
Diámetro de poro promedio (Por adsorción por el método BJH 4V/A)	84.94	Å
Diámetro de poro promedio (Por desorción por el método BJH 4V/A)	74.27	Å
Volumen en poro menor a 14.83 A por el método Density Functional Theory (DFT)	0.04	cm <sup>3</sup> /g
Volumen total en poros menores a 3433.37A (Método DFT)	0.71	cm <sup>3</sup> /g
Área total en poros mayores a 3433.37 A (Método DFT)	11.42	m <sup>2</sup> /g
Área total en poros > 14.83 Å (Método DFT)	160.89	m <sup>2</sup> /g
Mediana del ancho de poro (Método Horvath-Kawazoe)	165.19	Å
Área superficial de microporo (Método Dubinin-Astakhov)	24.25	m <sup>2</sup> /g

1 Å = 0.1 nm

### 5.3.1.3 Difracción de Rayos X

Los análisis se llevaron a cabo en un intervalo en 2Theta de 10 a 80°, un paso de 0.025° y una velocidad de 4 segundos por paso. En la Figura 8 se muestra el difractograma obtenido.

Se le realizó el análisis de datos e identificación de fases cristalinas utilizando el Software de la marca PANalytical: X'PertHighScore Plus, versión 2.2.3. Mientras que la base de datos usada fue la de ICDD: PDF-4+ 2012

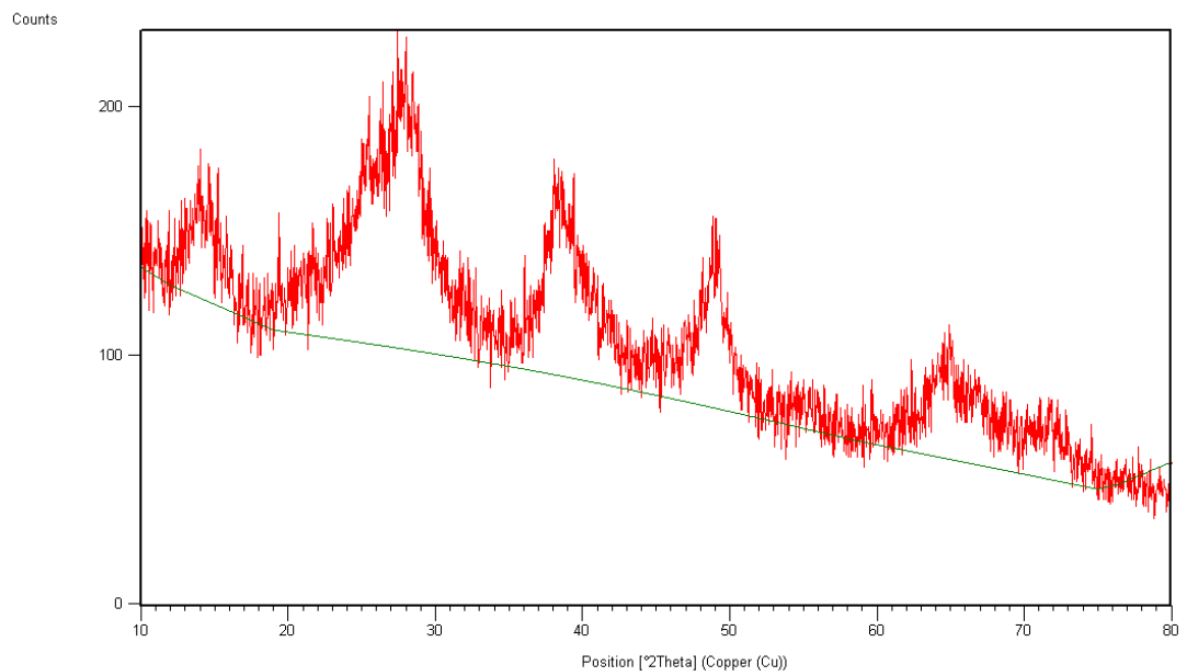
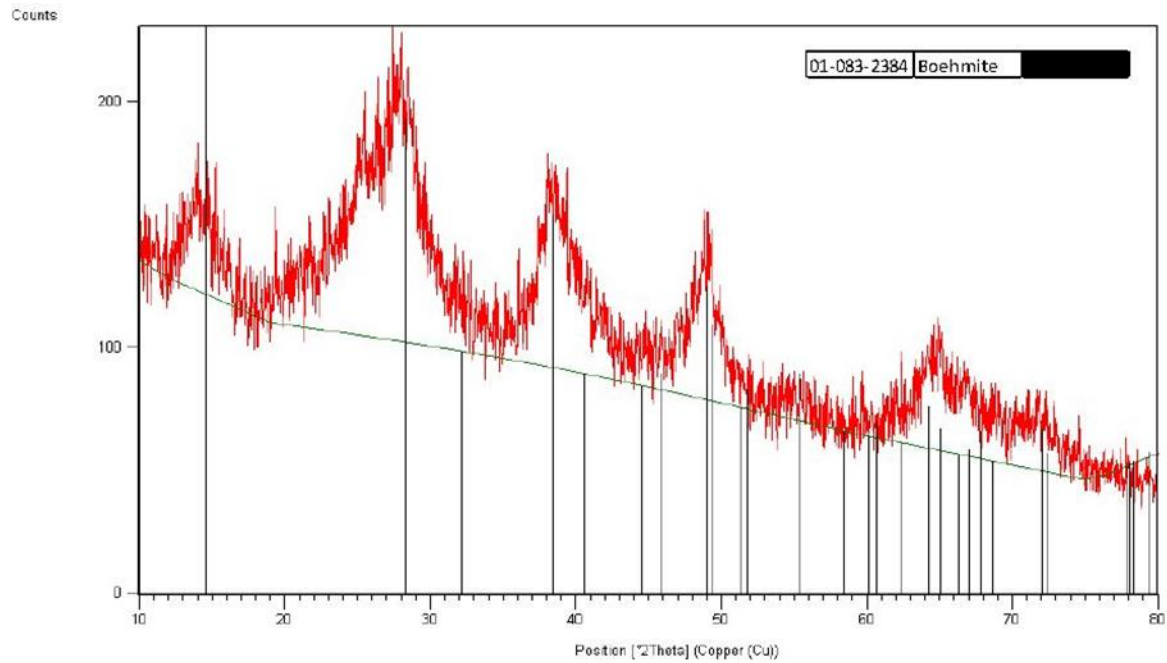


Figura 5.22 Difractograma de la muestra de LEC

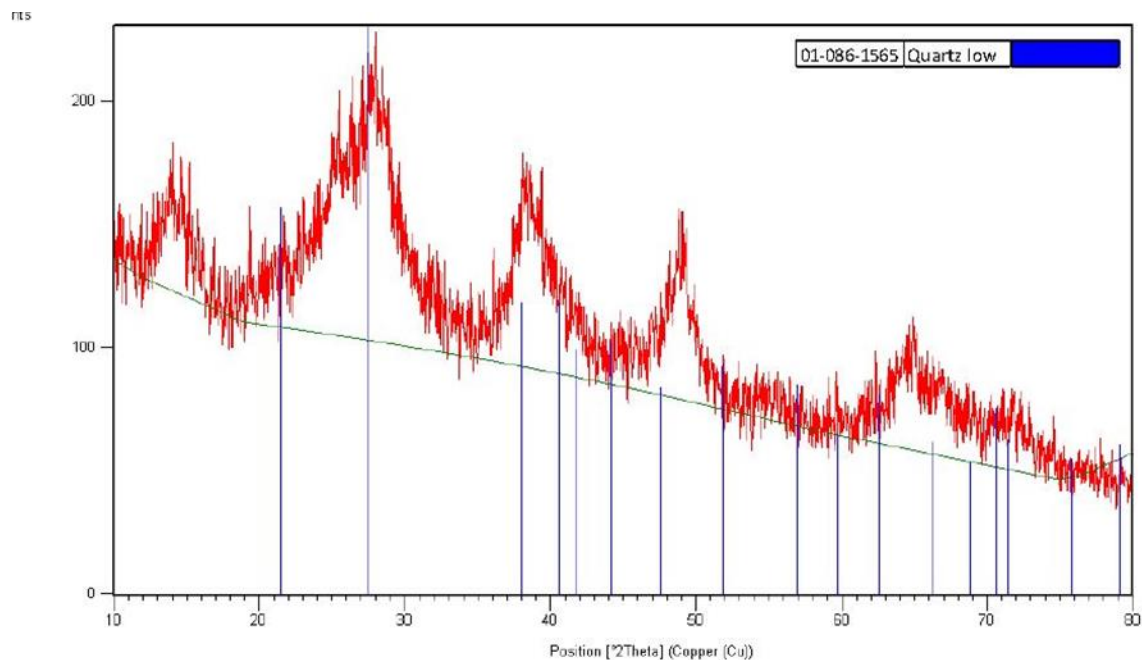
En la Tabla 5.39 se enlista el conjunto de patrones de difracción que se encontraron con mayor correspondencia con el difractograma experimental y en las siguientes figuras los patrones de difracción identificados.

Tabla 5.39 Patrones de difracción identificados en el difractograma de la muestra LEC

Referencia ICDD: PDF-4+ 2012	Nombre del compuesto	Fórmula química	Figura
01-086-2384	Bohemita	$Al(OH)_3$	
01-086-1565	Cuarzo bajo	$SiO_2$	
01-088-2487	Óxido de silicio	$SiO_2$	
00-042-1331	Grumantita	$Na_2Si_2O_7 \cdot H_2O$	



**Figura 5.23 Patrón de difracción correspondiente a la boehmite (ICDD PDF-4+ 2012: 01-083-2384–Boehmite) identificado sobre el difractograma de la muestra de LEC**



**Figura 5.24 Patrón de difracción correspondiente a cuarzo (ICDD PDF-4+ 2012: 01-086-1565–Quartz low) identificado sobre el difractograma de la muestra de LEC**

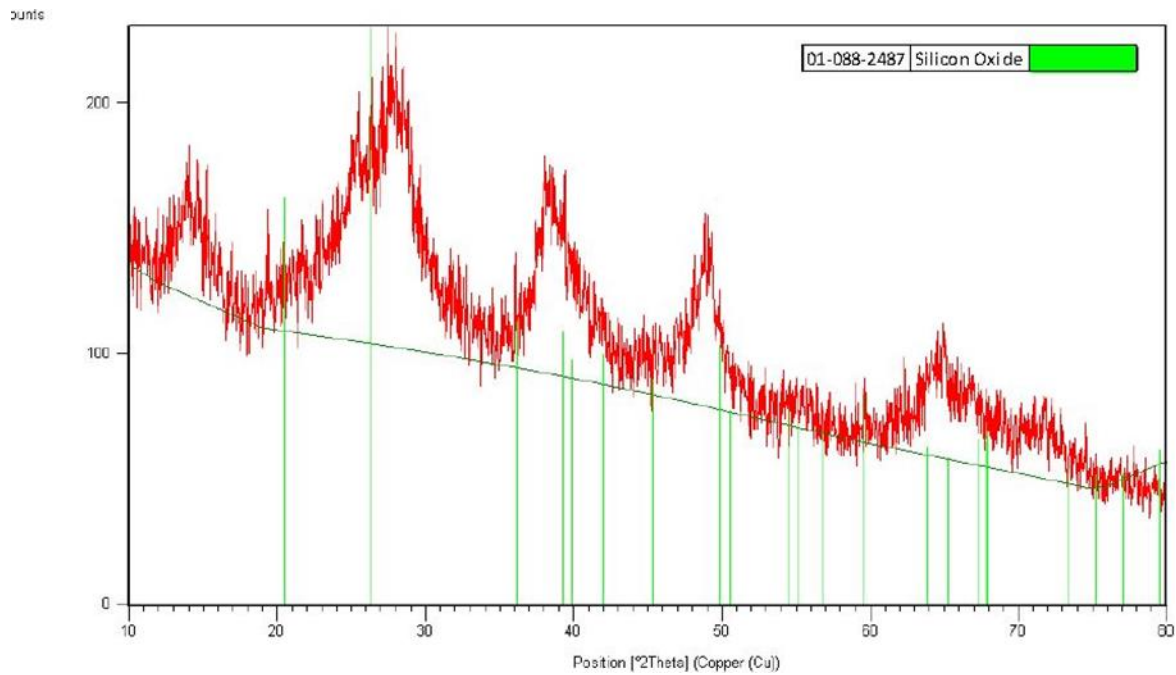


Figura 5.25 Patrón de difracción correspondiente al óxido de silicio (ICDD PDF-4+ 2012: 01-088-2487–Silicon oxide) identificado sobre el difractograma de la muestra de LEC

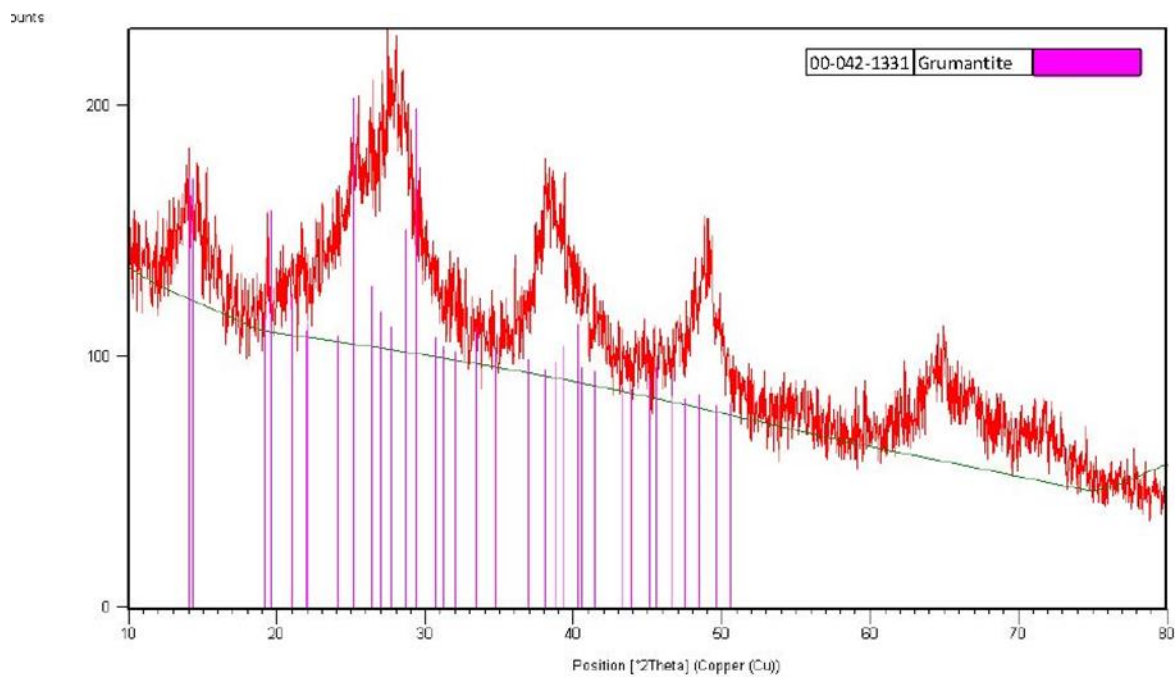
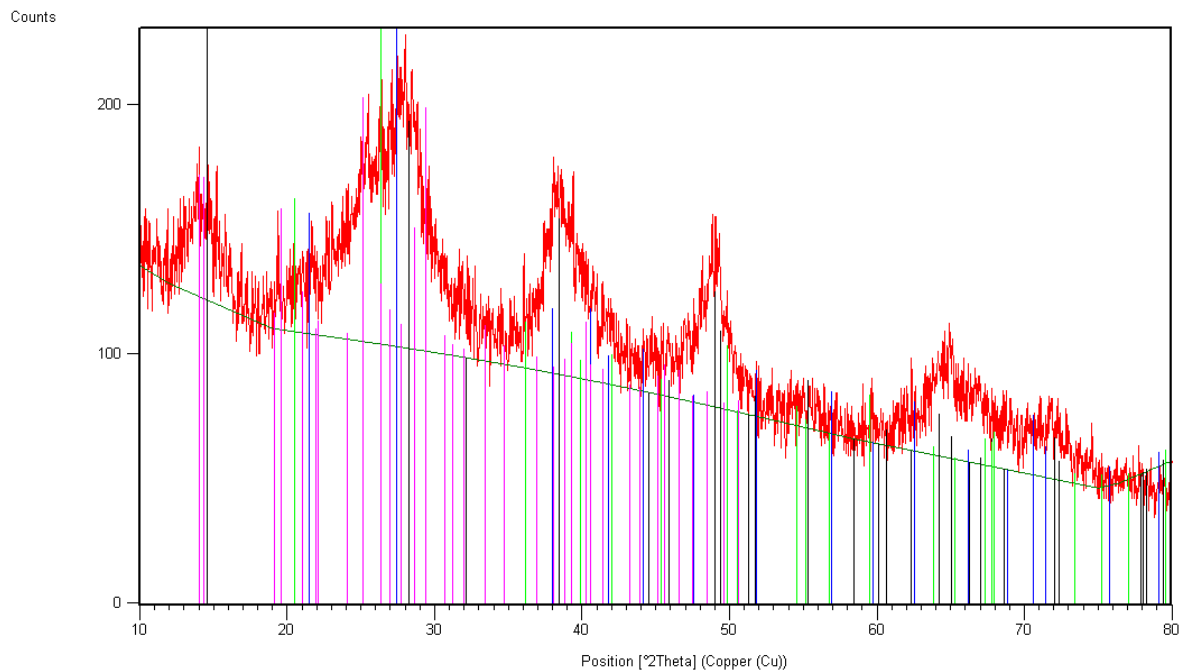


Figura 5.26 Patrón de difracción correspondiente a la grumantita (ICDD PDF-4+ 2012: 00-042-1331–Grumantite) identificado sobre el difractograma de la muestra de LEC

En la Figura 5.27 está representada la totalidad de las fases cristalinas identificadas en el difractograma experimental



**Figura 5.27 Patrones de difracción identificados sobre el difractograma de la muestra LEC**

Mediante los gráficos anteriores se concluye que la muestra analizada está compuesta principalmente por hidróxido de óxido de aluminio, cuyo nombre mineralógico es bohemita, su fórmula química es  $\text{AlO}(\text{OH})$  y su sistema cristalino es ortorrómbico (ref: 00-060-0318). Así mismo se identifican estructuras cristalinas correspondientes al cuarzo y al óxido de silicio, cuya fórmula química es  $\text{SiO}_2$  y su sistema cristalino es hexagonal (referencias: 01-086-1565 y 01-088-2487, respectivamente). La Grumantita también fue identificada en la muestra (referencia: 00-042-1331) como un ortosilicato de sodio hidratado, de fórmula química  $\text{NaSi}_2\text{O}_4(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$ .

#### 5.3.1.4 Microscopía electrónica de Barrido

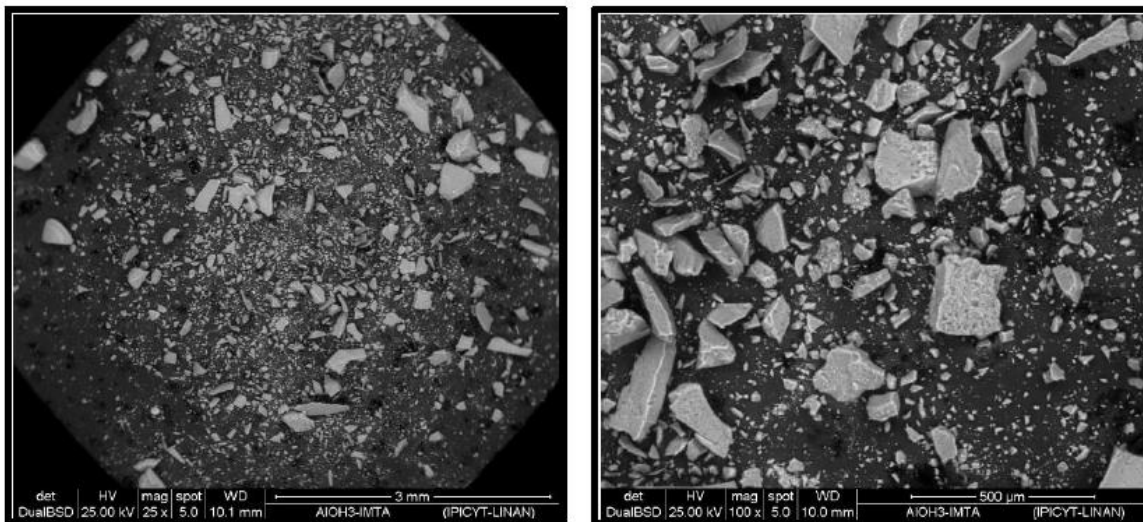
Este tipo de análisis es útil para determinar el tipo de partículas predominantes así como la uniformidad química superficial que presenta la muestra.

Se caracterizó la morfología superficial de la muestra a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), empleando la señal de electrones retrodispersados (BSE), la cual permite observar cambios en el contraste de las partículas originado por cambios en la composición elemental de los materiales, mostrando con mayor brillantez las regiones compuestas de elementos con mayor número atómico promedio.

Se realizaron análisis de la composición química elemental empleando la técnica de espectroscopía de energía dispersiva (EDS), donde es posible detectar elementos con número atómico mayor a 6 (carbono en adelante). Las regiones analizadas fueron señaladas en las imágenes con recuadros en color verde, de las cuales se obtuvo la composición *semicuantitativa*, indicada como porcentaje en peso (%W) y porcentaje atómico (%At) de cada elemento detectado. Se definen como análisis semicuantitativos debido a que no se hacen correcciones de cálculo comparadas con muestras estandarizadas del material analizado. El porcentaje de error de la microsonda de análisis empleada es de  $\pm 3.0\%$

El montaje del LEC pulverizado se hizo sobre portamuestras de aluminio cubiertos con cinta adhesiva de carbón conductor. El polvo se depositó de forma directa para su análisis por SEM.

La Figura 5.28 muestra la morfología general de la muestra donde se aprecian muy variados tamaños de partículas, mismos que comprenden un intervalo de entre 5 y 350 micrómetros. En términos generales la muestra presenta una brillantez superficial muy similar en todas las regiones de análisis, lo que indica uniformidad química y que en términos cualitativos se refieren principalmente a elementos como el Al, O, Si y C. Se localizaron muy pocas partículas de mayor contraste aparentemente adheridas a la matriz rica en Al, mismas que se muestran con mayor detalle en las siguientes figuras.



**Figura 5.28** Morfología general de la muestra de LEC.

Las imágenes de la Figura 5.29 presentan algunas de las partículas de mayor tamaño existentes en la muestra, así como su composición química elemental mostrada en las tablas de composición semicuantitativa, donde se indican el porcentaje en peso (Wt%) y porcentaje atómico (At%) para cada elemento analizado en dicha región. En dichas figuras las tablas de análisis EDS indican una mayor concentración elemental de oxígeno, aluminio y carbono. En el reporte realizado por el personal responsable de los análisis en el IPICYT se menciona que la lectura de carbono puede estar siendo incrementada debido a la cinta de carbón conductor

donde se adhiere el material para su análisis, hecho que en este caso debe ser cierto debido a que el material del que proviene el lodo es placa de aluminio cuya pureza es mayor al 99% y el agua que se trató por electrocoagulación, es agua limpia del pozo que abastece al IMTA .

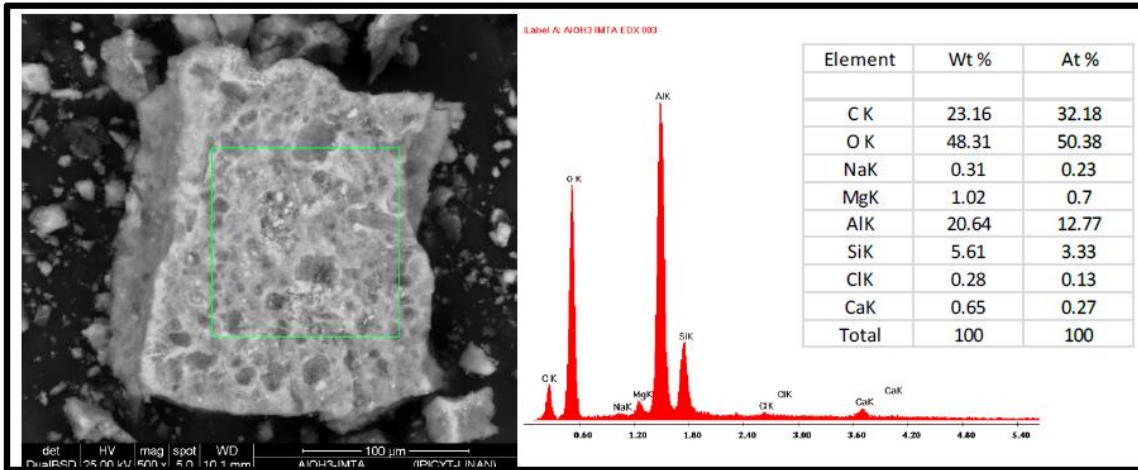


Figura 3

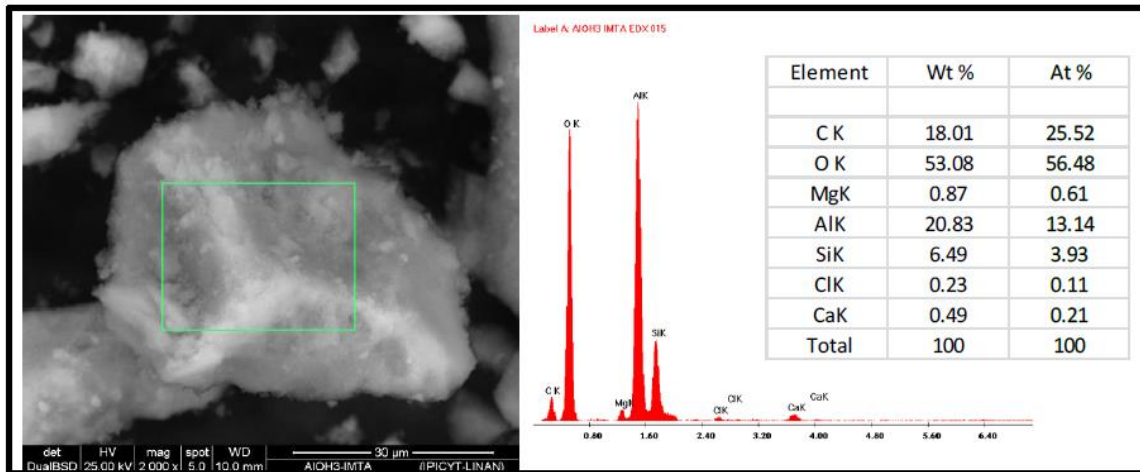


Figura 5.29 Composición química elemental

El grupo de imágenes que integran la Figura 5.30, muestran un acercamiento a una de las partículas con contenido mayoritario de Al-O-C-Si, como las mostradas anteriormente, sin embargo; en los bordes de la misma se aprecian pequeñas partículas de alrededor de 10 micrómetros con un contraste más evidente, lo que indica que están compuestas de elementos con mayor número atómico que la matriz en que se encuentran aparentemente adheridas. Después de realizar el análisis por EDS en dichas regiones, se encontró que presentaban oro (Au) en su composición elemental, en aproximadamente 19% en peso, de ahí el cambio en la brillantez de la imagen de electrones retro dispersados.

Cabe señalar que los resultados mostrados en las tablas de análisis por EDS se refieren exclusivamente a las dimensiones señaladas por los recuadros verdes, por lo que, en términos

generales, se consideran áreas de dimensiones similares para determinar la composición química elemental.

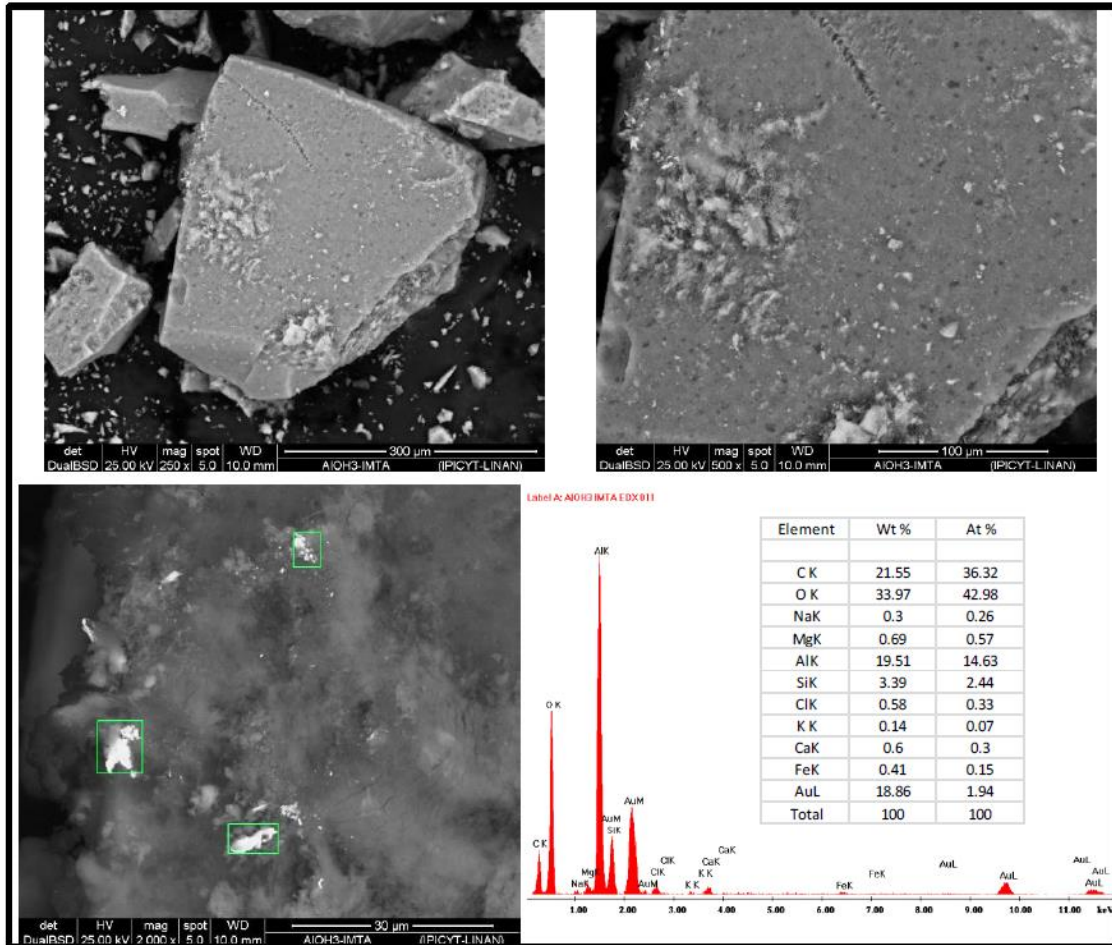


Figura 5.30 Partículas con contenido mayoritario de Al-O-C-Si.

En el grupo de imágenes que integran la Figura 5.31 nuevamente se muestran pequeñas partículas adheridas en la matriz de contenido mayoritario de Al-O-C-Si, dichas partículas presentan un contraste más evidente. Después de realizar el análisis por EDS en dichas regiones se encontró que presentaban plomo (Pb) en su composición elemental, en aproximadamente 20% en peso.



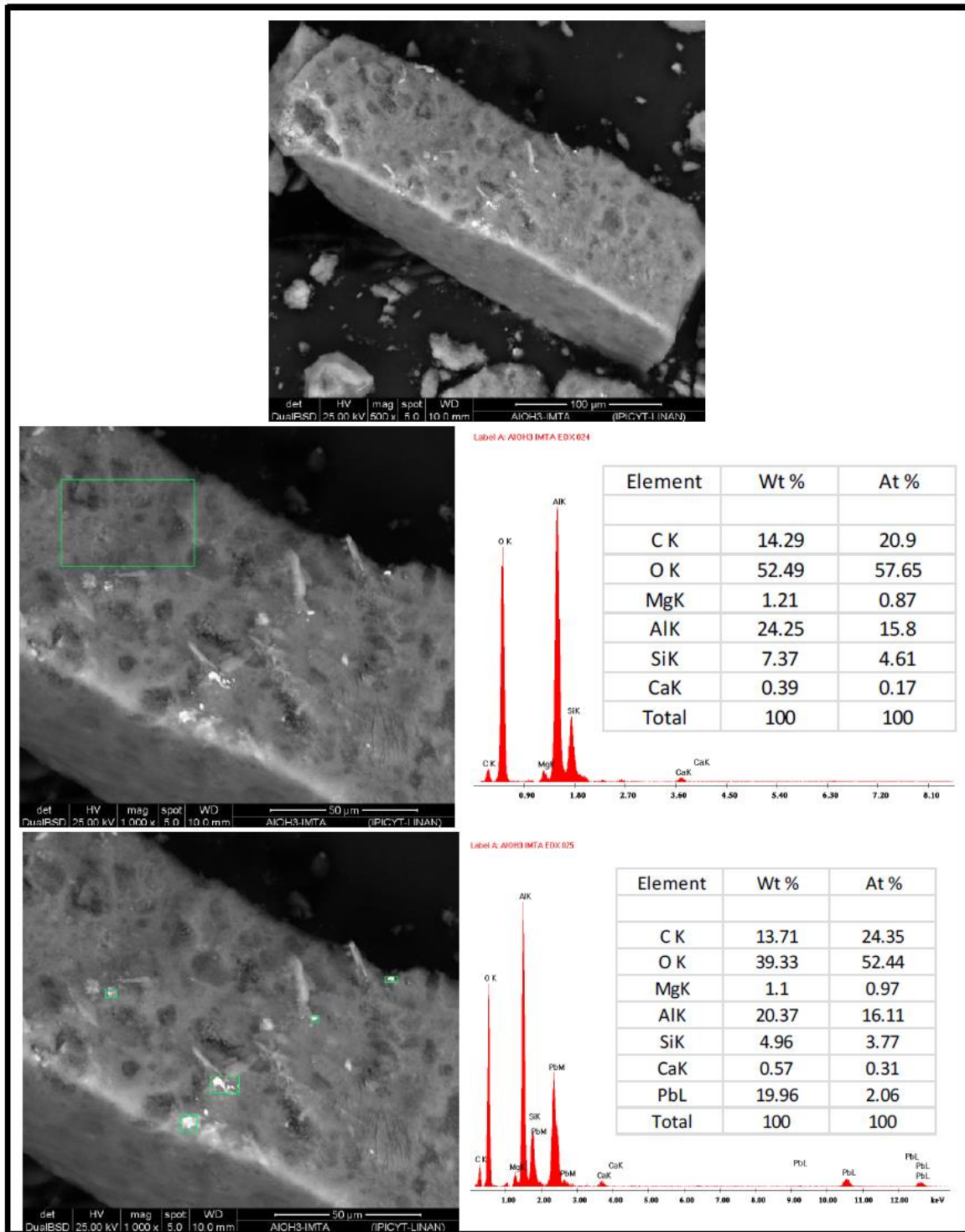


Figura 5.31 Partículas con presencia de Pb.

En la Figura 5.31 se aprecian las micrografías y análisis por EDS de partículas que presentaron contenidos de hierro (Fe) adicional a los elementos generales constitutivos de la matriz (Al-O-C-Si).

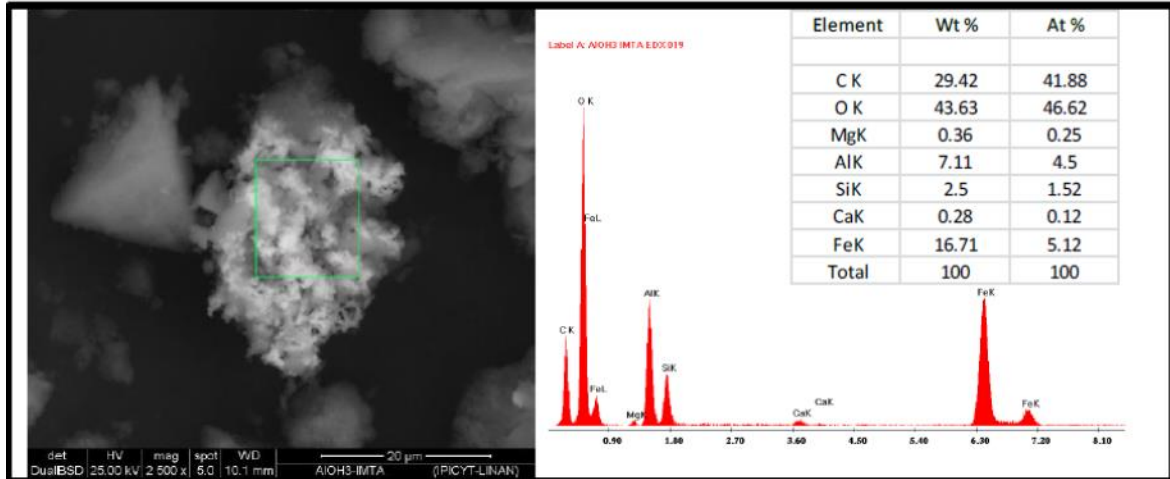


Figura 8

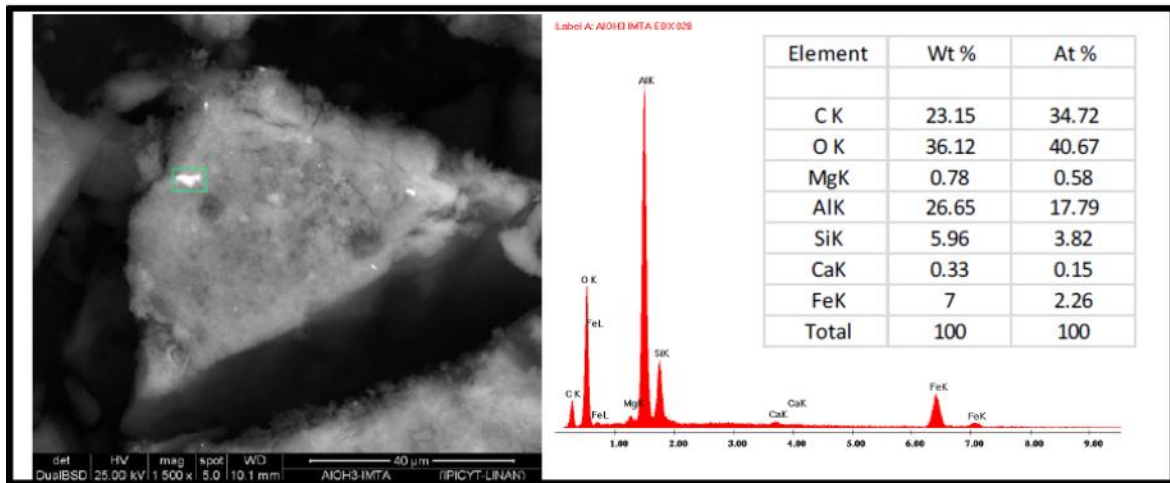


Figura 5.32 Partículas con presencia de Fe.

Después de caracterizar superficialmente la muestra en polvo de LEC se puede argumentar que el material se conforma por una matriz de contenido mayoritario en Al-O-Si-C atribuible a la naturaleza original de la muestra. La muestra pulverizada presentó un amplio intervalo de tamaño de partículas, de entre 5 y 350 micrómetros, que podría ser ocasionado por las aglomeraciones naturales de este material. Se encontró muy escasa proporción de partículas con presencia de elementos como Au, Fe y Pb, detectados por EDS, con tamaño entre 5 y 15 micrómetros. En términos generales se aprecia que la muestra de presenta una composición

química superficial uniforme donde la matriz principal está compuesta por elementos como Al-O-Si y C.

### 5.3.2 Pruebas de disolución del material adsorbente LEC en función del pH

Las pruebas de disolución demuestran el intervalo de pH en el material se disuelve en un medio líquido, en la figura 3 se observa la cantidad de aluminio disuelto en el medio, a partir de pH 10 se incrementó considerablemente la disolución de aluminio. El intervalo de pH que permite trabajar con mayor seguridad para evitar la disolución del material es de 5.5 a 7.5.

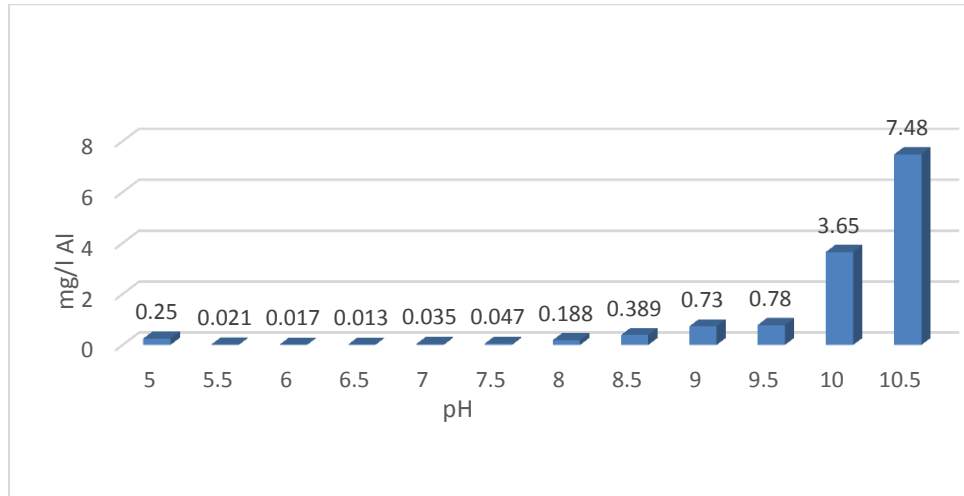


Figura 5.33 Efecto del pH en la disolución del adsorbente LEC

### 5.3.3 Pruebas de adsorción en lotes (Isotermas de adsorción).

En las Figura 5.34 y Tabla 5.35 se puede observar el comportamiento de cada prueba experimental, a partir de las 21 horas todas las pruebas presentan el equilibrio y empiezan un proceso de desorción. En estas gráficas el número en el recuadro indica la condición de la prueba referida a la Tabla 4.6.

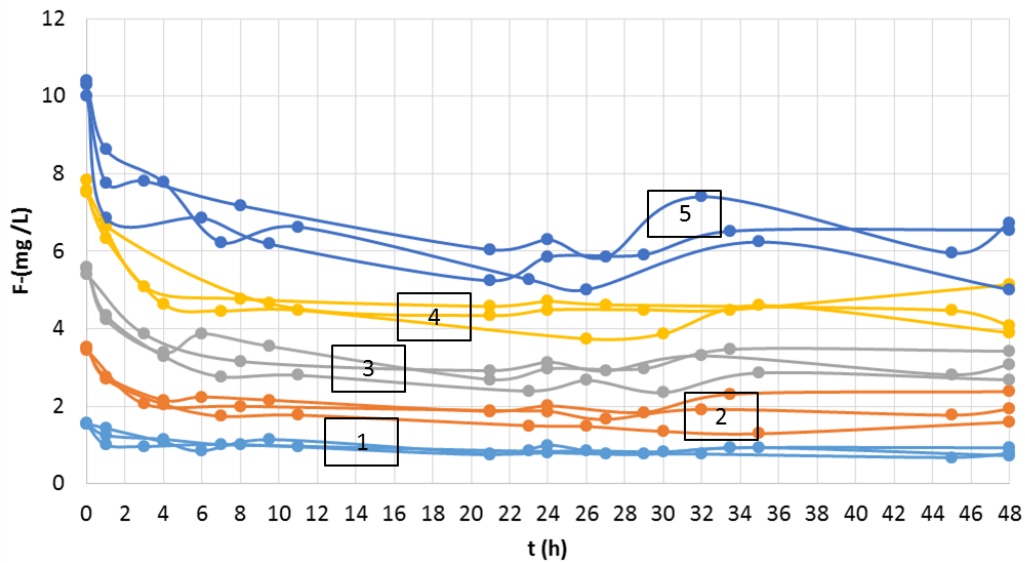


Figura 5.34 Evolución de la concentración de F- respecto al tiempo, LEC particulado

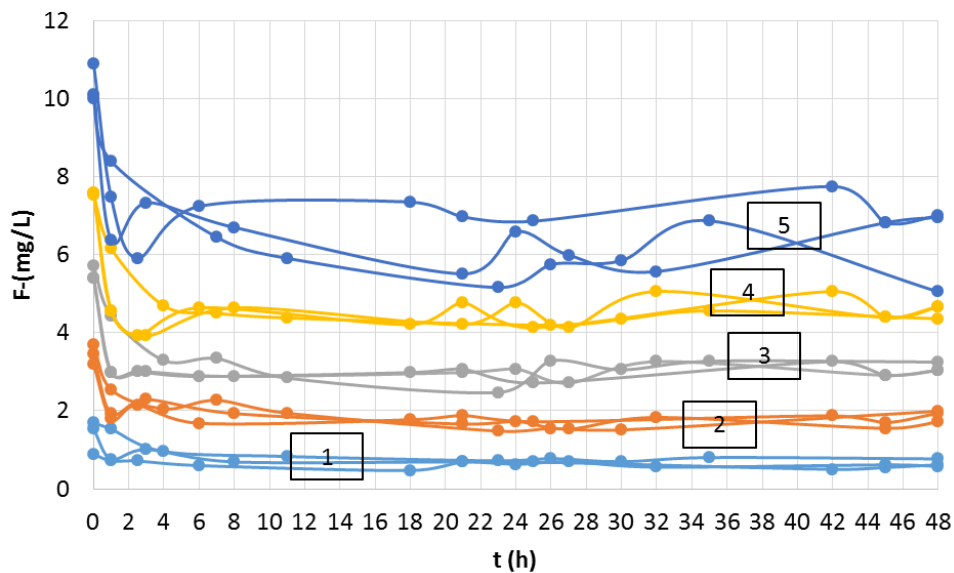
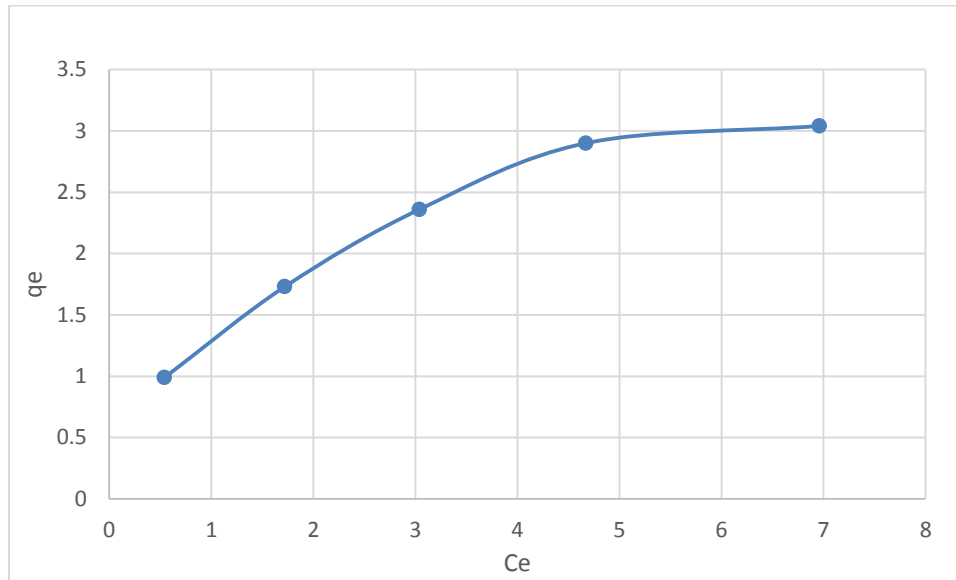
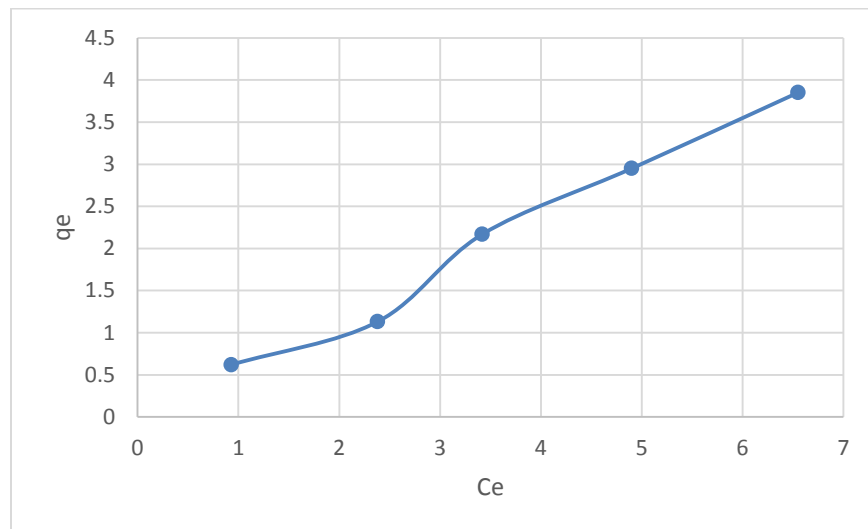


Figura 5.35 Evolución de la concentración de F- respecto al tiempo, LEC polvo

Los datos de la concentración de fluoruros en equilibrio para cada una de las masas son útiles para obtener la isoterma de adsorción de fluoruros como se muestra en las Figura 5.36. y Figura 5.37, como ejemplo ya que para cada muestra de LEC polvo o particulado se realizaron tres pruebas



**Figura 5.36** Isotherma de adsorción de LEC polvo, prueba 2



**Figura 5.37** Isotherma de adsorción de LEC particulado, prueba 1

Los datos obtenidos fueron tratados para explorar si siguen uno de los dos modelos matemáticos más usados para describir el comportamiento de un sistema de adsorción, el modelo de Langmuir y el modelo de Freundlich. Las Tabla 5.40 y Tabla 5.41 presentan los cálculos realizados para la obtención de dichos modelos. Donde  $C_e$  (mg/L) representa la concentración de fluoruro al equilibrio;  $C_0$  (mg/L) es la concentración inicial de fluoruro;  $V$  (L) es el volumen de solución;  $X$  (mg) la masa de fluoruro removida y  $q_e$  (mg/g) la masa de fluoruro adsorbida por masa de adsorbente.

**Tabla 5.40 Cálculos para la obtención de los modelos linealizados de la isoterma LEC polvo, prueba 2**

Co	Ce	Co-Ce	V	masa F removida (Co-Ce)*V	masa en 2L	qe=x/m	log qe	log Ce	1/Ce	1/qe	Ce/qe
mg/L	mg/L	mg/L	L	(mg)	g	mg/g					
1.53	0.541	0.989	2	1.978	2	0.989	-0.0048	-0.266	1.848	1.011	0.547
3.45	1.72	1.73	2	3.46	2	1.73	0.2380	0.235	0.581	0.578	0.994
5.4	3.04	2.36	2	4.72	2	2.36	0.3729	0.482	0.328	0.423	1.288
7.57	4.67	2.9	2	5.8	2	2.9	0.4623	0.669	0.214	0.344	1.610
10	6.96	3.04	2	6.08	2	3.04	0.48287	0.842	0.143	0.328	2.289

**Tabla 5.41 Cálculos para la obtención de los modelos linealizados de la isoterma LEC ´particulado, prueba 1**

Co	Ce	Co-Ce	V	masa F removida (Co-Ce)*V	masa en 2L	qe=x/m	log qe	log Ce	1/Ce	1/qe	Ce/qe
mg/L	mg/L	mg/L	L	(mg)	g	mg/g					
1.55	0.93	0.62	2	1.24	2	0.62	-0.2076	-0.031	1.075	1.613	1.5
3.51	2.38	1.13	2	2.26	2	1.13	0.0530	0.376	0.420	0.884	2.106
5.59	3.42	2.17	2	4.34	2	2.17	0.3364	0.534	0.292	0.460	1.576
7.85	4.9	2.95	2	5.9	2	2.95	0.4698	0.690	0.204	0.338	1.661
10.4	6.55	3.85	2	7.7	2	3.85	0.5854	0.816	0.152	0.259	1.701

En las siguientes figuras se muestra el ajuste para cada uno de los modelos linealizados, con su respectiva ecuación y su coeficiente de correlación  $R^2$ .

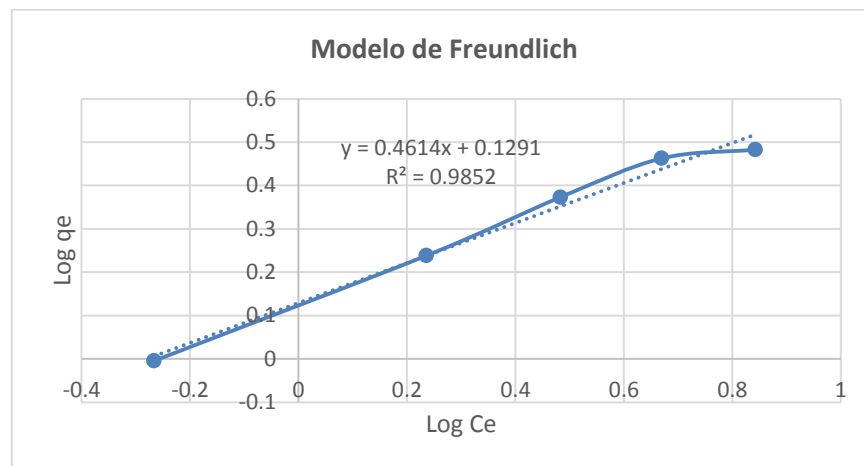
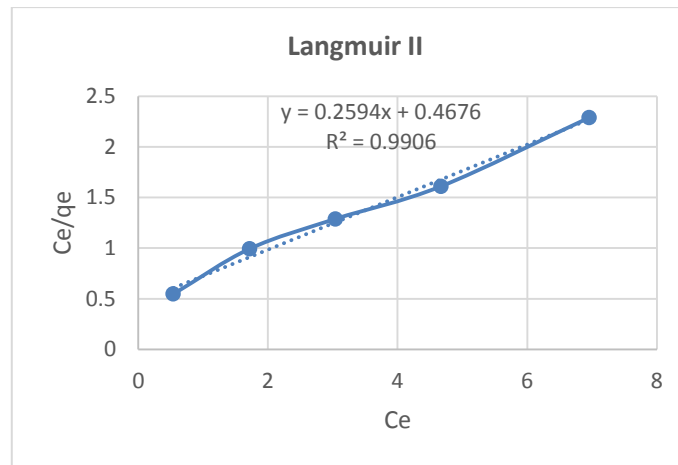
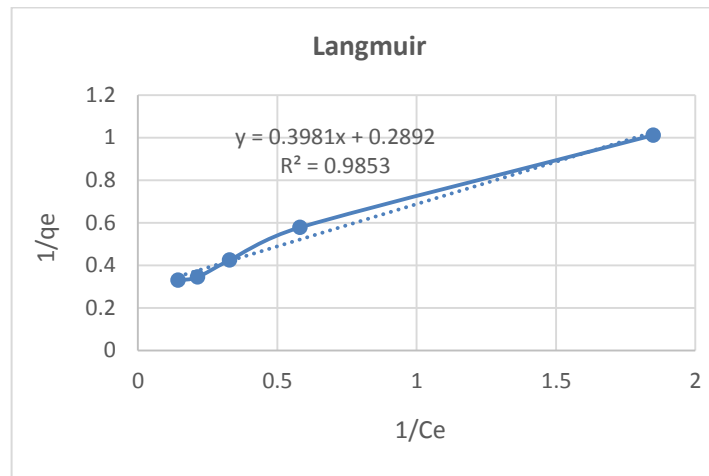


Figura 5.38 Modelos linealizados de las isothermas de adsorción, LEC polvo, prueba 2

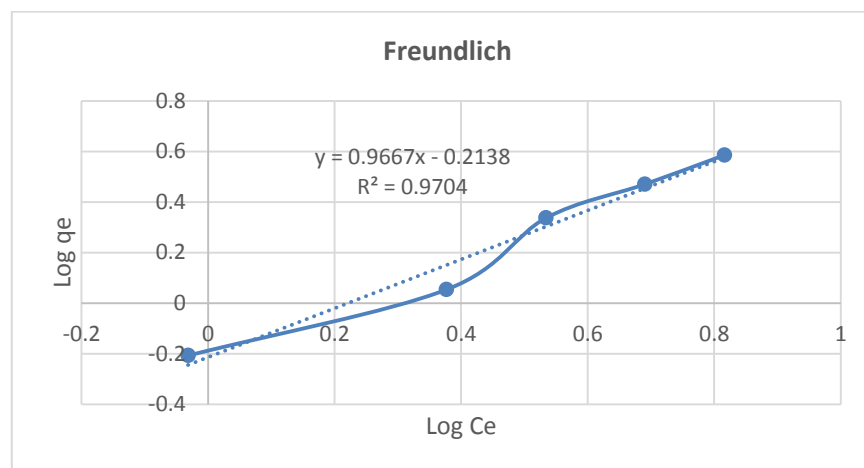
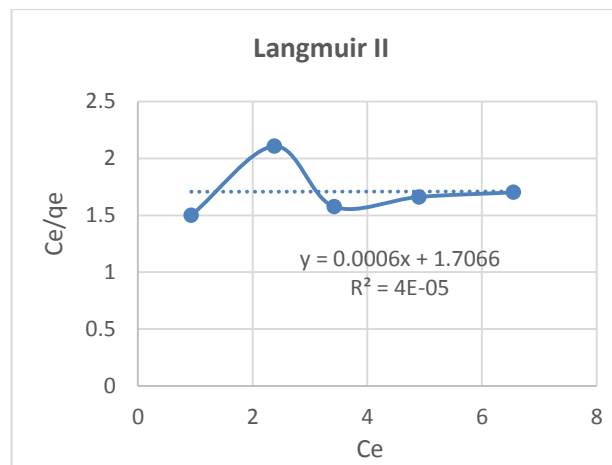
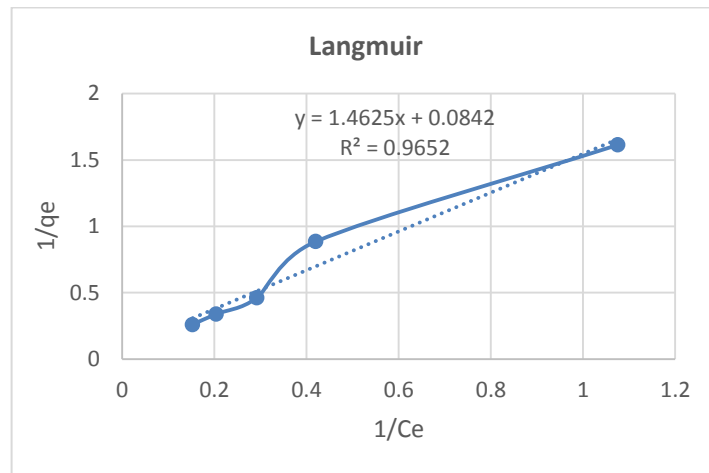


Figura 5.39 Modelos linealizados de las isothermas de adsorción, LEC particulado, prueba 1



A modo de resumen en la Tabla 5.42 y en la Tabla 5.43 se presentan las constantes de los modelos y los coeficientes de correlación, para cada una de las tres pruebas experimentales que se realizó con cada uno de los tipos de muestra *polvo* y *particulado*.

**Tabla 5.42. Constantes de adsorción para fluoruros, LEC polvo**

Prueba 1	Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
	qm =	7.0323488	qm =	16.5289256	1/n	nf	Kf
	b =	0.19146358	b =	0.06329776	0.8197	1.21995852	1.0543869
	R <sup>2</sup>	0.96	R <sup>2</sup>	0.21		R <sup>2</sup>	0.94
Prueba 2	Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
	qm =	3.45781466	qm =	3.85505012	1/n	nf	Kf
	b =	0.72645064	b =	0.55474765	0.4616	2.16637782	1.34617029
	R <sup>2</sup>	0.98	R <sup>2</sup>	0.99		R <sup>2</sup>	0.98
Prueba 3	Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
	qm =	71.4285714	qm =	9.41619586	1/n	nf	Kf
	b =	0.00779467	b =	0.06235688	0.9304	1.07480653	0.59483977
	R <sup>2</sup>	0.99	R <sup>2</sup>	0.34		R <sup>2</sup>	0.94

**Tabla 5.43 Constantes de adsorción para fluoruros, LEC particulado**

Prueba 1	Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
	qm =	11.8764846	qm =	1666.66667	1/n	nf	Kf
	b =	0.05757265	b =	0.00035158	0.9667	1.03444709	0.61122344
	R <sup>2</sup>	0.96	R <sup>2</sup>	0.00004		R <sup>2</sup>	0.90
Prueba 2	Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
	qm =	31.6455696	qm =	25.0626566	1/n	nf	Kf
	b =	0.0379762	b =	0.04885515	0.9058	1.10399647	1.16976871
	R <sup>2</sup>	0.99	R <sup>2</sup>	0.47		R <sup>2</sup>	0.98
Prueba 3	Constantes Langmuir I		Constantes Langmuir II		Constantes Freundlich		
	qm =	8.38926174	qm =	6.58327847	1/n	nf	Kf
	b =	0.12292462	b =	0.17413734	0.7578	1.3196094	0.94514839
	R <sup>2</sup>	0.98	R <sup>2</sup>	0.76		R <sup>2</sup>	0.93

#### 5.3.4 Resultados de los medios adsorbentes a flujo continuo en minicolumnas

##### 5.3.4.1 Pruebas de saturación con 2.5 mg F<sup>-</sup>/L y 100 µg/L de arsénico. 1<sup>ra</sup> etapa

###### 5.3.4.1.1 Alúmina activada (AA)

La Tabla 5.44 y Tabla 5.45, muestran las condiciones de operación y los resultados hasta saturación con 2.5 mgF<sup>-</sup>/L y 100 µg/L de arsénico, este experimento se hizo por duplicado con alúmina activada. En la columna 1 se trataron 6860 volúmenes de lecho para el caso de

fluoruros y para el arsénico se logró una cantidad de 8929. En la columna 2 fueron 6857 para fluoruros y 7546 para arsénico.

**Tabla 5.44. Condiciones de operación de alúmina activada, columna 1**

Alúmina activada columna 1	
Co F <sup>-</sup> (mg/L)	2.50
Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	2.5
pH	6.0
As (mg/L)	0.10
Diámetro alúmina (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad aparente lecho (g/L)	746.7
Masa de adsorbente W (g)	15.20
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.065
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.91
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.79
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000020
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.14
CUR (gCH/L) caso F <sup>-</sup>	0.11
VL tratados hasta saturación caso F <sup>-</sup>	6860.23
Tiempo de saturación (h) caso F <sup>-</sup>	90.52
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.18
CUR (gCH/L) caso As	0.08
VL tratados hasta saturación caso As	8929.27
Tiempo de saturación (h) caso As	117.82

**Tabla 5.45. Resultados de la prueba de saturación con alúmina activada, columna 1**

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH Efluente	Volúmenes de lecho	1/CUR (g/L)
0.0	26	-	-	0.00	-	-	-
0.5	26	0.072		0.78	-	38.3	0.051
0.9	26		0	1.40		69.0	0.092
1.08	26	0.03		1.68	-	82.8	0.111
2.03	26	0.04		3.17	-	155.6	0.208
3.4	26	0.11	5.00	5.23	-	256.7	0.344
5.5	25	0.17		8.38	6.26	411.4	0.551

7.2	26	0.327		11.15	-	547.9	0.734
8.7	26	0.479	0	13.49	-	662.8	0.888
13.5	26	0.929	0	20.98	-	1030.6	1.380
18.7	26	1.13		29.05	5.98	1426.8	1.911
24.0	25	1.33	24	37.00	5.94	1817.3	2.434
27.0	25	1.36	24	41.50	-	2038.4	2.730
30.0	25	1.49	17	46.00	6.05	2259.4	3.026
31.0	25	1.48		47.50	-	2333.1	3.125
34.0	25	1.55		52.00	-	2554.2	3.421
38.0	26	1.69	41	58.24	-	2860.7	3.831
40.0	26	1.77		61.36	-	3014.0	4.037
46.0	25	1.92	50	70.36	6.24	3456.1	4.629
52.0	26	2.03	44	79.72	6.29	3915.8	5.244
55.0	26	1.98		84.40	6.21	4145.7	5.552
70.0	25	2.12	72	106.90	6.28	5251.0	7.033
78.0	26	2.10		119.38	6.20	5864.0	7.854
85.0	26	2.46	77	130.30	6.15	6400.4	8.572
91.0	26	2.44	55	139.66	-	6860.2	9.188
100	26	-	79	153.70	-	7549.9	10.112
102	26	-	71	156.82	-	7703.2	10.317
111	26	-	82	170.86		8392.9	11.241
118	26	-	97	181.78	6.4	8929.3	11.959

Respecto a la columna 2 (Tabla 5.46 y Tabla 5.47), la cantidad de volúmenes de lecho fueron 6973.4 para fluoruros y para arsénico el valor fue de 7663.1, los tiempos de saturación fueron de 91 y 100 h respectivamente.

**Tabla 5.46. Condiciones de operación de alúmina activada, columna 2**

Alúmina activada columna 2	
Co F-(mg/L)	2.50
Ce F-(mg/L)	2.5
pH	6.0
As (mg/L)	0.100
Diámetro alúmina (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad aparente lecho (g/L)	746.7
Masa de adsorbente W (g)	15.20

Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.065
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.90
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.79
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000020
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.14
CUR (gCH/L) caso F <sup>-</sup>	0.11
VL tratados hasta saturación caso F-	6857.29
Tiempo de saturación (h) caso F <sup>-</sup>	90.65
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.15
CUR (gCH/L) caso As	0.10
VL tratados hasta saturación caso As	7546.96
Tiempo de saturación (h) caso As	99.76

**Tabla 5.47. Resultados de la prueba de saturación con alúmina activada, columna 2**

Tiempo de operación	Q	Ce F <sup>-</sup>	Ce As	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)	Efluente		(g/L)
0.0	26	-	-	0.0	-	-	-
0.5	26	0.067	-	0.78	-	38.3	0.051
1.1	26	0.0281	-	1.68	-	82.8	0.111
1.7	26	-	0	2.57	-	126.4	0.169
2.0	26	0.04	-	3.17	-	155.6	0.208
2.3	26	-	5.0	3.51	-	172.4	0.231
3.4	26	0.10	3.0	5.23	-	256.7	0.344
5.5	25	0.20	-	8.38	6.26	411.4	0.551
7.2	26	0.297	-	11.15	-	547.9	0.734
8.7	26	0.433	5	13.49	-	662.8	0.888
13.5	26	0.858	0	20.98	-	1030.6	1.380
18.7	26	1.08	6	29.05	5.98	1426.8	1.911
24.0	25	1.61	24	37.00	5.95	1817.3	2.434
27.0	25	1.44	32	41.50	-	2038.4	2.730
30.0	25	1.36	23	46.00	6.02	2259.4	3.026
31.0	25	1.55	-	47.50	-	2333.1	3.125
34.0	25	1.65	24	52.00	-	2554.2	3.421
38.0	26	-	-	58.24	-	2860.7	3.831
40.0	26	1.66	-	61.36	-	3014.0	4.037
46.0	25	1.9	47	70.36	6.03	3456.1	4.629

52.0	26	1.97	54	79.72	6.21	3915.8	5.244
55.0	26	1.81	-	84.40	6.12	4145.7	5.552
60.0	26	-	79	92.20	-	4528.9	6.066
70.0	25	2.14	69	107.20	6.35	5265.7	7.052
76.0	25	-	80	116.20	-	5707.8	7.644
78.0	26	2.20	-	119.32	6.29	5861.1	7.850
85.0	26	2.32	-	130.24	6.19	6397.5	8.568
91.0	26	2.38	-	139.60	-	6857.3	9.184
100.0	26	-	92	153.64	-	7547.0	10.108

Los tiempos de saturación de fluoruros fueron muy similares, aproximadamente 91 h en ambas columnas, respecto a la saturación de arsénico se tuvo una diferencia de 18 horas. Esto es mostrado en la Figura 5.40.

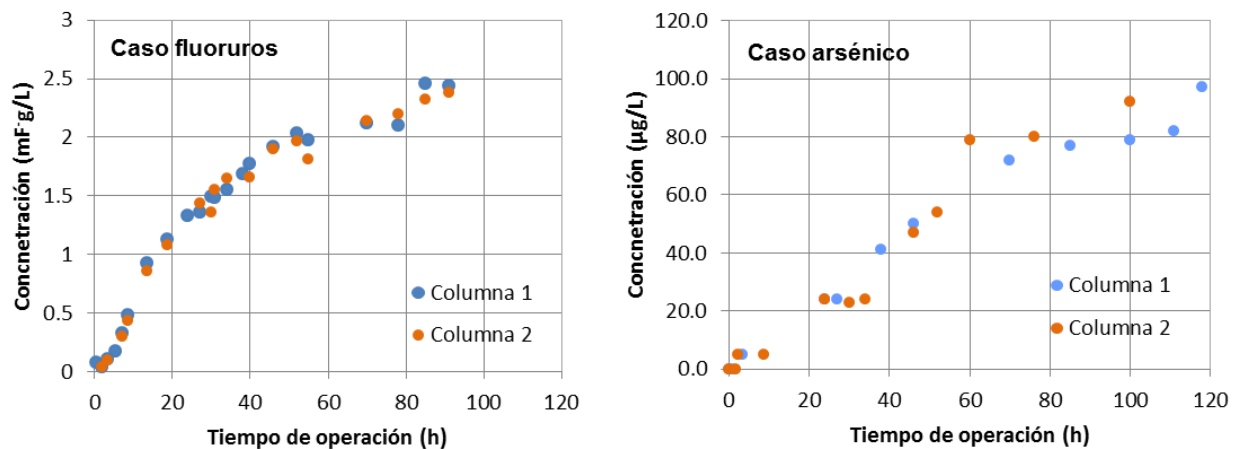


Figura 5.40 Evolución de concentraciones de F y As en pruebas en columna con AA, Co F = 2.5 mg/L y Co As = 100 µg/L

#### 5.3.4.1.2 Lodo generado por electrocoagulación (LEC)

Los resultados de las columnas 1 y 2, las dos trabajando bajo las mismas condiciones, son mostrados a partir de la Tabla 5.48 a la Tabla 5.51. En la columna 1 la saturación de fluoruros hasta 2.5 mg/L aproximadamente se logró a las 24 h de operación con 1800 volúmenes de lecho tratados y en la columna 2 se trataron 1614 con un tiempo de saturación de 22 h. Respecto a la saturación de arsénico (100 µg/L) en la columna 1, el tiempo de operación coincidió con el de saturación para fluoruros a las 24 h, tratándose 1800 volúmenes de lecho y en la columna 2 se trataron 1794 VL a un tiempo de saturación de 25 h, la diferencia de estos se originó debido a una ligera variación del flujo entre las dos columnas.

**Tabla 5.48. Condiciones de operación de LEC, columna 1**

Lodo generado por electrocoagulación col 1	
Co F-(mg/L)	2.50
Ce F-(mg/L)	2.50
pH	7.0
As (mg/L)	0.100
Diámetro alúmina (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad aparente lecho (g/L)	450.0
Masa de adsorbente W (g)	9.4
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.067
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.93
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.81
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000021
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.0377
CUR (gCH/L) caso F <sup>-</sup>	0.25
VL tratados hasta saturación caso F <sup>-</sup>	1800.81
Tiempo de saturación (h) caso F <sup>-</sup>	24.38
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.0377
CUR (gCH/L) caso As	0.25
VL tratados hasta saturación caso As	1800.81
Tiempo de saturación (h) caso As	24.38

**Tabla 5.49. Resultados de la prueba de saturación con LEC, columna 1**

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F <sup>-</sup> (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH Efluente	Volúmenes de lecho	1/CUR (g/L)
0	26	-	-	0.0	-	0.0	0.0
0.33	26	0.197	-	0.52	-	24.8	0.055
0.72	26	0.265	-	1.12	7.41	53.4	0.119
0.90	26	0.35	0	1.40	-	67.0	0.149
1.28	26	0.55	-	2.00	-	95.5	0.212
1.83	25	0.72	-	2.83	-	134.9	0.300
2.21	25	-	15	3.39	-	161.9	0.360
2.95	25	-	30	4.50	-	214.8	0.477
3.35	25	0.964	38	5.10	-	243.5	0.541
4.38	25	1.29	57	6.65	-	317.4	0.705

4.92	26	1.45	61	7.48	7.16	357.1	0.794
5.45	26	1.63	75	8.32		396.8	0.882
7.20	26	1.75	-	11.05	7.02	527.1	1.171
8.73	25	1.75	82	13.35	-	636.9	1.415
13.28	26	2.09	82	20.44	-	975.6	2.168
14.70	26	2.06	89	22.65	-	1081.0	2.402
16.12	25	2.08	87	24.78	-	1182.5	2.628
18.70	26	2.14	88	28.81	7.03	1374.8	3.055
19.70	25	2.07	-	30.31	-	1446.3	3.214
20.70	25	-	-	31.81	6.80	-	3.373
22.00	26	2.45	-	33.84	6.91	1614.7	3.588
24.00	26	2.40	90.00	36.96	6.82	1763.6	3.919
24.50	26	2.54	95	37.74	6.86	1800.8	4.002

**Tabla 5.50. Condiciones de operación de LEC, columna 2**

Lodo generado por electrocoagulación col 2	
Co F-(mg/L)	2.50
Ce F-(mg/L)	2.50
pH	7.0
As (mg/L)	0.100
Diámetro alúmina (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad aparente lecho (g/L)	450.0
Masa de adsorbente W (g)	9.4
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.067
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.81
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.83
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000021
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.0338
CUR (gCH/L) caso F <sup>-</sup>	0.28
VL tratados hasta saturación caso F <sup>-</sup>	1614.42
Tiempo de saturación (h) caso F <sup>-</sup>	22.40
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.0377
CUR (gCH/L) caso As	0.25
VL tratados hasta saturación caso As	1799.09
Tiempo de saturación (h) caso As	24.97

**Tabla 5.51. Resultados de la prueba de saturación con LEC, columna 2**

Tiempo de operación (h)	Q (mL/min)	Ce F (mg/L)	Ce As (µg/L)	V tratado acumulado (L)	pH Efluente	Volúmenes de lecho	1/CUR (g/L)
0	26	-	-	0.0	-	0.0	0.0
0.33	26	0.222	-	0.52	-	24.8	0.055
0.72	26	0.341	-	1.12	-	53.4	0.119
0.90	26	0.43	19.00	1.40	-	67.0	0.149
1.28	26	0.50	-	2.00	7.29	95.5	0.212
1.65	22	-	22.00	2.49	-	118.6	0.264
1.83	25	-	-	2.76	-	131.8	0.293
2.21	25	-	21.00	3.33	-	158.7	0.353
2.95	25	-	30.00	4.44	-	211.7	0.470
3.35	25	-	-	5.04	-	240.3	0.534
4.38	25	1.11	33	6.59	-	314.3	0.698
4.92	26	1.21	41	7.42	7.18	354.0	0.787
5.45	26	1.65	49	8.25	7.21	393.7	0.875
6.16	26	-	63	9.36	7.16	446.5	0.992
7.20	26	1.72	-	10.98	7.09	524.0	1.164
8.73	25	1.77	79	13.28	-	633.7	1.408
13.61	26	1.99	90	20.89	-	996.8	2.215
14.70	26	2.10	82	22.59	-	1077.9	2.395
16.12	25	2.11	93	24.71	-	1179.3	2.621
18.70	26	2.23	86	28.74	7.04	1371.6	3.048
19.70	25	2.24	-	30.24	-	1443.2	3.207
22.00	26	2.56	-	33.83	6.95	1614.4	3.588
24.00	26	2.37	-	36.95	6.85	1763.3	3.918
24.50	25	2.44	105	37.70	6.98	1799.1	3.998

La Figura 5.41 muestra el comportamiento de la concentración de ambos contaminantes respecto al tiempo de operación. Para el caso fluoruros, se tuvo una diferencia en el tiempo de saturación de 2.5 h, lo cual indica que en la columna 2 se tuvo una menor cantidad de volúmenes de lecho tratados. En el caso arsénico, en ambas columnas (1 y 2), los tiempos de saturación fueron muy similares 24.5 h aproximadamente. Este tiempo fue prácticamente el mismo que para la saturación de fluoruros, es decir el medio adsorbente se saturó con ambos elementos a un mismo tiempo.



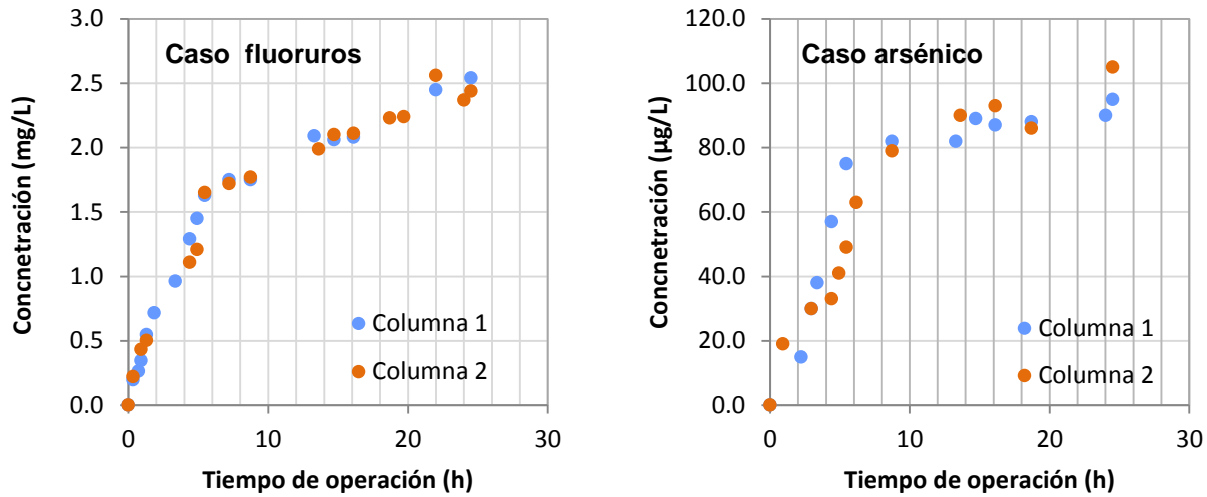


Figura 5.41. Comportamiento de fluoruros y arsénico en el medio LEC

5.3.4.2 Pruebas de saturación con 10.0 mg F<sup>-</sup>/L y 100 µg/L de arsénico. 2<sup>da</sup> etapa

De la Tabla 5.52 a la

Tabla 5.57 se muestran los resultados de las pruebas a flujo continuo llevadas a saturación con 10.0 mg F<sup>-</sup>/L y 100 µg/L de arsénico con los adsorbentes alúmina activada (AA), lodo generado por electrocoagulación (LEC) y el lodo químico de la planta Los Berros (LLB).

Tabla 5.52. Condiciones de operación de AA, 2<sup>da</sup> etapa.

Alúmina activada	
Co F-(mg/L)	10.0
Ce F-(mg/L)	10.0
pH	6.50
As (mg/L)	0.10
Diámetro alúmina (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.02
Densidad aparente lecho (g/L)	746.7
Masa de adsorbente W (g)	7.95
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.034
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.84
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.42
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000011

Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.026
CUR (gCH/L) caso F <sup>-</sup>	0.33
VL tratados hasta saturación, caso F <sup>-</sup>	2268
Tiempo de saturación (h), caso F <sup>-</sup>	17.41
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.072
CUR (gCH/L) caso As	0.11
VL tratados hasta saturación caso As	6779.1
Tiempo de saturación (h) caso As	47.43

**Tabla 5.53. Resultados de la prueba de saturación con AA, 2<sup>da</sup> etapa.**

Tiempo de operación	Q	Ce F <sup>-</sup>	Ce As <sup>-</sup>	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)	Efluente		(g/L)
0	25	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0
0.5	25		10	0.75	6.92	70.4	0.09
2	25	3.86	19	3.00	6.98	281.8	0.38
3	25	5.51	28	4.50	6.56	422.6	0.57
6.5	25	8.20		9.75	-	915.7	1.23
13.5	25	9.42		20.25	-	1901.9	2.55
16	26	9.66	82	24.15	6.84	2268.2	3.04
17.5	26	10.5		26.49	6.52	2487.9	3.33
19.5	25			29.49	6.48	2769.7	3.71
22.5	26		89	34.17	6.64	3209.2	4.30
26	25			39.42	-	3702.3	4.96
47	26		90	72.18	6.72	6779.1	9.08

**Tabla 5.54. Condiciones de operación de LEC, 2<sup>da</sup> etapa.**

Lodo generado por electrocoagulación	
Co F-(mg/L)	10.0
Ce F-(mg/L)	10.0
pH	7.00
As (mg/L)	0.10
Diámetro de partícula (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad aparente lecho (g/L)	450.0
Masa de adsorbente W (g)	4.71
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.033
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.87
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.41
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000010
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.037
CUR (gCH/L), caso F <sup>-</sup>	0.13
VL tratados hasta saturación, caso F <sup>-</sup>	3530
Tiempo de saturación (h), caso F <sup>-</sup>	24.18
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.037
CUR (gCH/L) caso As	0.13
VL tratados hasta saturación caso As	3530.0
Tiempo de saturación (h) caso As	24.18

**Tabla 5.55. Resultados de la prueba de saturación con LEC, 2<sup>da</sup> etapa.**

Tiempo de operación	Q	Ce F <sup>-</sup>	Ce As <sup>-</sup>	V tratado acumulado	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)		(g/L)
0	25	-	-	0.00	0.0	0.00
0.2	25	2.65	23	0.30	28.6	0.06
0.4	25	3.9	45	0.60	57.3	0.13
0.6	25	4.66	-	0.90	85.9	0.19
0.8	25	5.33	-	1.20	114.5	0.25
1.0	25	5.82	-	1.55	147.9	0.33
1.2	26	6.28	-	1.86	177.7	0.39
1.4	26	6.06	-	2.17	207.4	0.46
1.6	25	6.3	-	2.47	236.1	0.52
1.8	26	7.07	62	2.79	265.8	0.59

2.0	25	6.86	-	3.09	294.5	0.65
2.2	26	7.12	-	3.40	324.2	0.72
5.0	26	7.65	67	7.71	736.1	1.64
7.0	26.5	8.7	-	10.89	1039.5	2.31
10.0	25	8.85	-	15.39	1468.9	3.26
15.0	26	9.23	-	23.19	2213.2	4.92
19.0	26	9.18	-	29.43	2808.6	6.24
21.0	25	9.21	-	32.43	3094.8	6.88
22.0	26	9.35	-	33.99	3243.7	7.21
24.0	25	9.58	88	36.99	3530.0	7.84

**Tabla 5.56. Condiciones de operación del lodo de la planta Los Berros, 2<sup>da</sup> etapa.**

Lodo planta Los Berros	
Co F-(mg/L)	10.0
Ce F-(mg/L)	10.0
pH	6.50
As (mg/L)	0.10
Diámetro AIOH3 (mm)	0.40
Diámetro columna (m)	0.020
Densidad aparente lecho (g/L)	706.7
Masa de adsorbente W (g)	7.40
Flujo Q (m <sup>3</sup> /h)	0.0015
Altura medio L (m)	0.033
Área transversal columna (m <sup>2</sup> )	0.0003
Carga hidráulica (m/h)	4.80
Tiempo de contacto EBCT (min)	0.42
Volumen adsorbente Va (m <sup>3</sup> )	0.000010
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso F <sup>-</sup>	0.0203
CUR (gCH/L), caso F <sup>-</sup>	0.37
VL tratados hasta saturación, caso F <sup>-</sup>	1933.79
Tiempo de saturación (h), caso F <sup>-</sup>	13.42
Volumen de agua tratada (m <sup>3</sup> ) caso As	0.0045
CUR (gCH/L) caso As	1.64
VL tratados hasta saturación caso As	429.7
Tiempo de saturación (h) caso As	2.98

Tabla 5.57. Resultados de la prueba de saturación con LLB, 2<sup>da</sup> etapa.

Tiempo de operación	Q	Ce F <sup>-</sup>	Ce As <sup>-</sup>	V tratado acumulado	pH	Volúmenes de lecho	1/CUR
(h)	(mL/min)	(mg/L)	(µg/L)	(L)	Efluente		(g/L)
0	25	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0
0.5	25	-	61	0.75	6.70	71.6	0.10
2.0	25	5.72	79	3.00	6.98	286.5	0.41
3.0	25	7.21	96	4.50	6.66	429.7	0.61
6.5	25	9.61	-	9.75	6.70	931.1	1.32
13.5	25	10.01	-	20.25	-	1933.8	2.74
16.0	26	-	-	24.15	6.68	2306.2	3.26
17.5	25	-	94	26.40	6.56	2521.1	3.57
19.5	25	-	94	29.40	-	2807.6	3.97
22.5	25	-	93	33.90	-	3237.3	4.58

Para la saturación de fluoruros a 10 mg/L, el adsorbente LEC tuvo un mayor tiempo de saturación (24 h), en este tiempo se logró una cantidad de volúmenes de lecho (VL) de 3530 (Figura 5.42), el lecho de AA se saturó a las 17.5 h con un valor de VL de 2564.0 y para LLB se tuvo un valor de 1933.8 VL en un tiempo de saturación de 13.5 h.

Respecto a la saturación de arsénico (100 µg/L) el adsorbente AA logró un valor de 6886.2 VL en un tiempo de saturación de 47 h, mientras que el valor para LEC fue 3435.1 en un tiempo de 24 y para LLB se trataron 429.7 VL en un tiempo de saturación de 3.0 h de operación (Figura 5.43).

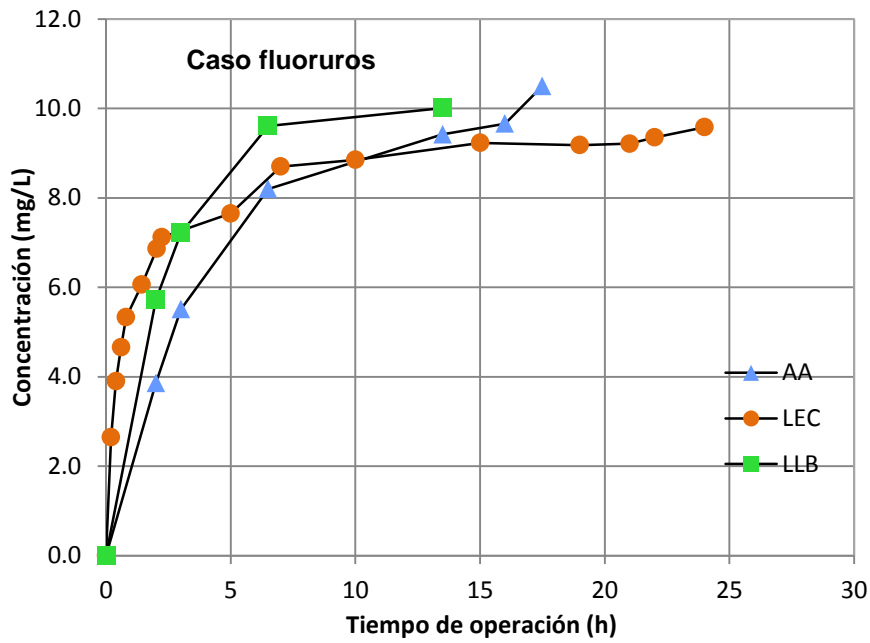


Figura 5.42. Comportamiento de la concentración de fluoruros en los medios evaluados

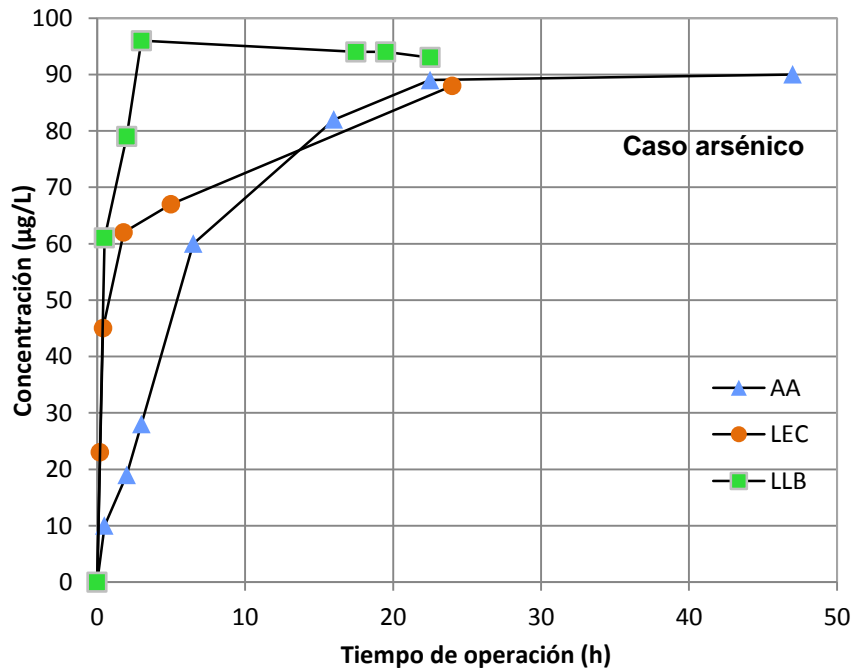


Figura 5.43. Comportamiento de la concentración de arsénico en los medios evaluados.

En la Tabla 5.58, se muestra una comparación de volúmenes de lecho (VL) tratados de los adsorbentes empleados en este trabajo de investigación bajo las diferentes condiciones evaluadas. El adsorbente AA tuvo una mayor cantidad de VL tanto de fluoruros como de arsénico esto al trabajar con la concentración mas baja de fluoruros. Para la concentración alta de fluoruros trabajada, el adsorbente LEC tuvo la mayor cantidad de volúmenes de lecho, esto para el caso fluoruros, mientras que para el caso arsénico la alúmina activada tuvo un mejor rendimiento al tratar 6886.2 VL.

**Tabla 5.58. Comparación de los adsorbentes evaluados**

	Condiciones de operación				Resultados			
	F (mg/L)	As (mg/L)	pH	EBCT (min)	VLr F	VLs F	VLr As	VLs As
<b>Alúmina activada</b>	2.5	100	6.0	0.8	2333	6860	2038	8929
	2.5	100	6.0	0.8	2333	6857	2554	7547
	10	100	6.5	0.4	-	2487	422	6779
<b>Lodo EC</b>	2.5	100	7.0	0.8	357	1800	214	1800
	2.5	100	7.0	0.8	393	1614	211	1799
	10	100	7.0	0.4	-	2268	28	3530
<b>Lodo PP LB</b>	10	100	6.5	0.4	-	1933	-	429

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Coagulación química con sulfato de aluminio

- Los trenes de tratamiento simulados (coagulación química convencional y coagulación-microfiltración resultaron ser muy semejantes en cuanto a las eficiencias de remoción de arsénico, fluoruros y aluminio, solo el parámetro turbiedad fue más alto en coagulación convencional para la mayoría de las pruebas realizadas.
- Las condiciones de operación donde se lograron las mejores eficiencias de remoción de fluoruros fueron a valores de pH de 6.5 con dosis de aluminio superiores a 34.36 mg/L.
- Para la concentración de arsénico trabajada (273 µg/L) al utilizar dosis de aluminio superiores a 10 mg/L se lograron eficaces remociones de arsénico, sin embargo la remoción de este también es dependiente de la remoción de aluminio.
- La remoción de aluminio es dependiente del pH del agua al que se trabaja y la concentración del catión para que este pueda formar  $AlOHx$ , en este estudio las mejores

condiciones donde se tuvieron las mejores remociones del catión  $Al^{3+}$  ocurrieron a valores de pH neutros con dosis de aluminio superiores a 34.46mg/L.

- Para las pruebas donde se logró cumplir con los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA respecto a fluoruros, arsénico y aluminio el costo total de tratamiento estuvo entre 1.40 y 3.23 \$/m<sup>3</sup> de agua tratada.

## 6.2 Adsorción sobre carbón de hueso

- Es importante lograr la desorción de CO<sub>2</sub> cuando se trabaje con valores de pH bajos en el agua (menores a 6.0), esto para evitar el taponamiento de las minicolumnas, es decir, evitar que este gas se acumule en el carbón de hueso e impida el flujo de agua y provoque desajustes del tiempo de retención hidráulica así como cortos circuitos o flujos preferenciales.
- Como resultado del diseño experimental evaluado para el caso fluoruros, solo la concentración inicial de fluoruros tuvo un efecto significativo ( $\alpha$ , 0.05) mientras que el resto de los factores de la matriz experimental planteada no tuvieron ningún peso específico sobre la variable de respuesta volúmenes de lecho.
- El mayor valor de volúmenes de lecho tratados fue de 1409.95 para el caso fluoruros a un valor de pH de 6.10, concentración inicial de arsénico de 0.107 mg/L, concentración inicial de fluoruros de 3.15 mg/L y un tiempo de contacto de 3.0 minutos. Estas fueron las mejores condiciones de operación del diseño experimental evaluado.
- Par el caso fluoruros, el análisis de regresión múltiple del modelo evaluado tuvo una valor estadístico de 0.0147, el cual es menor al grado de significancia 0.05, por lo tanto es confiable para la toma de decisiones en posteriores trabajos.
- Los factores que fueron significativos ( $\alpha$ , 0.05) fueron la concentración inicial de arsénico y el pH. El resto no mostró efectos significativos en la matriz experimental para el caso arsénico.
- En el caso arsénico, la mayor cantidad de volúmenes de lecho fue 46.47 esto en la prueba 9 de la matriz experimental, bajo las siguientes condiciones: concentración inicial de fluoruros de 9.0 mg/L, pH 6.10, concentración inicial de arsénico de 0.107 mg/L y un tiempo de contacto de 4.11 min.
- El análisis de regresión múltiple del modelo evaluado para el caso arsénico tuvo una valor estadístico de 0.0312 el cual es menor al grado de significancia 0.05, por lo tanto puede ser considerado en posteriores trabajos.



- El carbón de hueso mostró una baja capacidad de adsorber arsénico ya que al comparar los volúmenes de lecho en las mejores condiciones de ambos elementos, el caso fluoruros es 30.21 veces mas que el caso arsénico esto hasta llegar al tiempo de ruptura en ambas situaciones.
- Es recomendable tener un adecuado acondicionamiento del medio adsorbente que incluya las etapas de tamizado, molienda, lavado de polvos finos y secado esto para favorecer el correcto funcionamiento de minicolumnas de adsorción ya que se asegura que se esté trabajando con tamaños de partículas que se aproximan al tamaño requerido en cada ensayo experimental.
- Una manera práctica de desorber de CO<sub>2</sub> cuando se trabaje con minicolumnas de adsorción de este tipo es haciendo pasar el flujo de agua por una cama de arena de diversa granulometría para que quede retenido este gas sobre la superficie de los granos, esto antes de que el flujo llegue a las minicolumnas.
- Si solo se requiere remover fluoruros del agua, esto se logra tomando en consideración los resultados obtenidos de este trabajo experimental.
- Se recomienda explorar otros materiales para lograr la remoción simultánea de ambos elementos en una misma matriz ya que el carbón de hueso tuvo una aceptable eficiencia para la adsorción de fluoruros mas no así para el arsénico.

### **6.3 Adsorbentes a flujo continuo en minicolumnas alúmina activada (AA), lodo generado por electrocoagulación (LEC) y lodo químico de la planta Los Berros (LLB).**

- Para el caso fluoruros, de los tres adsorbentes evaluados alúmina activada (AA), lodo generado por electrocoagulación (LEC) y lodo de la planta Los Berros (LLB) a concentraciones bajas de fluoruros (2.5 mg/L), el adsorbente AA tuvo la capacidad de tratar la mayor cantidad de volúmenes de lecho con un valor de 6973.2. Por otro lado, para concentraciones altas de fluoruros, LEC brindó una cantidad de 3435.1 volúmenes de lecho.
- Para el caso arsénico, el adsorbente AA brindó la mayor cantidad de VL tanto en concentraciones bajas como altas de fluoruros.
- La alúmina activada resultó ser el mejor adsorbente ya que en la mayoría de los experimentos mostró la mejor capacidad de volúmenes de lecho a diferentes condiciones de operación tanto para el caso fluoruros como arsénico.
- A concentraciones bajas de fluoruros, la alúmina activada se saturó tanto de fluoruros como de arsénico en el mismo tiempo de operación. Mientras que el adsorbente LEC tuvo el mismo efecto en concentraciones bajas como altas de fluoruros.
- El lodo de la planta Los Berros fue 1.77 veces menor su capacidad de volúmenes de lecho (hasta la saturación de fluoruros) con respecto al mejor adsorbente para

concentraciones altas de fluoruros (LEC) y para la saturación con arsénico a concentraciones altas de fluoruros tuvo muy baja capacidad ya que fue 16.02 veces menor el valor de VL con respecto al mejor adsorbente (AA) para este contaminante.

- Se recomienda explorar las variables EBCT, pH, concentración inicial de fluoruros y arsénico con el fin de encontrar las condiciones óptimas que permitan el mejor aprovechamiento del lodo de la planta Los Berros considerado como un residuo en dicha planta. Si bien la capacidad de adsorber arsénico es muy baja, podría aprovecharse el medio para la remoción de fluoruros. También es importante estudiar la disolución y composición elemental de este residuo para saber si no desprende elementos contaminantes en el agua durante el proceso de adsorción.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón M., Bundschuh J., Nath B., Nicolli H., Gutierrez M., Reyes V., Nuñez D., Martín I. and Sracek O. (2012) Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.005>.
- Alarcón M., Flores I. y Sánchez I. (1999) Remoción de flúor y arsénico del agua potable por precipitación química. *Cátedra del Medio Ambiente, Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, La Habana, Cuba*. pp. 168–172.
- Almazán F. 2011. Remoción de fluoruros en agua mediante un sistema electroquímico. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Brunson y Sabatini 2009. An evaluation of fish bone char as an appropriate arsenic and fluoride removal technology for emerging regions. *Environmental Engineering Science*. 26 (12) pp 1777-1784.
- Calderón C., Rivera M. y Linares J. 2012. Nanofiltración para potabilizar agua de mina. Congreso de Ingeniería Sanitaria. Asociación Brasileña de Ingeniería Sanitaria. Rio de Janeiro. Brasil.
- Cooney, D. O. (1998). *Adsorption design for wastewater treatment*. Lewis Publishers, Washington, D.C. USA.
- Cusimano, N.O.; Deambrossi, N.E.; Albina, L.C.; Callegaro, R.S. Arsenic in potable waters of the republic Argentina, techniques for its removal International Seminar Proceedings Arsenic in the Environmental and its Incidence on Health. Universidad de Chile, Santhiago de Chile, 1992; 51-58.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 2006. Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos. International Congress Mexico City Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America, 20-24 June.
- Chouhan S. y Flora A. 2020. Arsenic and flouride: Two major ground water pollutants. *Indian Journal of Experimental Biology*. Vol 48. Pp 666-678.
- Environmental Protection Agency. 2000. Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water. Disponible en [www.epa.gov/safewater](http://www.epa.gov/safewater).
- Flores-Montenegro I., 1998., Evaluación de las concentraciones de flúor y arsénico en el agua del valle del Guadiana: Alternativas de remoción, Master of Sci. Thesis, Instituto Tecnológico de Durango, Química y Bioquímica, Durango Dgo., México

- Golden J., Dick P., Krulik G., Jung J. y Sverdlov G. 2002. System and method for simultaneous removal of arsenic and fluoride from aqueous solutions. International Patent Clasification C02F1/56.
- Gonzalez, A., Rivera, M.L., Pérez S, S. (2002) Evaluación de un sistema compacto de potabilización de agua para casas habitación o pequeños comercios. Proyecto Vatech-IMTA/TC0206
- Ingalinella A.M., (2008) Remoción de arsénico y flúor en aguas subterráneas por procesos de coagulación adsorción-doble filtración, V Congreso Iberoamericano de Física y Química Ambiental. Mar de Plata, Argentina.
- Ingallinella, Ana, Pacini, V., Fernández, R, Vidini, R y Sanguinetti, G. (2011) Simultaneous removal of arsenic and fluoride from groundwater by coagulation-adsorption with polyaluminum chloride. Journal of Environmental Science and Health. Part A, 46, 1288-1296.
- Martínez M., Pérez M., Vicencio M. y González C. (2013) Concentration of fluoride and arsenic in bottled drinking water in Durango City, Mexico. Journal of Environmental Protection. 4 pp 8-13.
- Martínez M., Pérez M., Villanueva I. y González C. 2013. Behavior of arsenic and fluoride concentration of Guadiana Valley aquifer of Durango, Mexico. Journal of Environmental Protection. 4 pp 14-20.
- Piñón M., Bautista R. and Pérez A. (2003) Removal of arsenic and fluoride from drinking water with cake alum and a polymeric anionic flocculent. Fluoride. 36(2) pp 122-128.
- Reyes V., Alarcón M., Núñez D. y Cruz R. 2010. Dinámica del arsénico en el Valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México, Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 6 pp 21-31.
- Rivera M. L, Martín A. Análisis Técnico y Económico de Tecnologías para remoción de fluoruros. Proyecto Interno IMTA TC1108.1
- Rivera M. L, Cortés J, Martín A, Calderón G, Montellano, L., Pérez, S. Análisis Técnico Económico de Tecnologías para remoción de fluoruros 2ª parte y evaluación de riesgos a la salud por exposición a fluoruros presentes en agua. Proyecto Interno IMTA TC1203.1
- Rubel, F., Williams F. (1980) Pilot Study of Fluoride and Arsenic Removal from Potable Water Municipal Environmental Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati, Ohio 45268 EPA-600/2-80-100.
- Ruiping L., Wenxin G., Huachun L., Tianming Y., Huijuan L., Jiuhui Q. 2012. Simultaneous removal of arsenate and fluoride by iron and aluminum binary oxide: Competitive adsorption effects. Separation and Purification Technology 92 pp 10-105.

- Streat M., Hellgardt K and Newton N. 2008. Hydrous ferric oxide as an adsorbent in water treatment part 3: Batch and mini-column adsorption of arsenic, phosphorus, fluorine and cadmium ions. *Process Safety and Environmental Protection* 86 pp 21-30.
- Tang, Y., T. Wang J. and Gao N. 2010. Characteristics and model studies for fluoride and arsenic adsorption on goethite. *Journal of Environmental Sciences*. 22(11)pp 1689-1694.
- Wasay A., Haron M. and Tokunaga S. 1996. Adsorption of fluoride, phosphate, and arsenate ions on lanthanum-impregnated silica gel. *Water Environment Research*. 68(3). Water Environment Federation. Pp 295-300
- Wei Li., Chang Y., Ling Y., Mao F. and Wei G. 2011. Superb fluoride and arsenic removal performance of highly ordered mesoporous aluminas. *Journal of Hazardous Materials*. Pp 143-150.
- Xu Z., Baofeng Z., Huijuan L. and Jiuwei Q. 2001. Simultaneous removal of arsenite and fluoride via an integrated electro-oxidation and electrocoagulation process. *Chemosphere* 83 pp 726–729.
- Yu Z., Xiao M., Min Y., Hong He., Chang Y. and Zi Y. 2010. Removal of arsenate from water by using an Fe-Ce oxide adsorbent: effects of coexistent fluoride and phosphate. *Journal of Hazardous Materials*. pp 208-214.
- Yulin T., Jianmin W. and Naiyun G. 2010. Characteristic and model studies for fluoride and arsenic adsorption on goethite. *Journal of Environmental Sciences*. 22 (11) pp 1689-1694.