



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN - MANAGUA

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**  
**CARRERA: QUÍMICA AMBIENTAL**

**Financiada por los Fondos de Proyectos de Investigación UNAN- Managua**

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADA EN:**  
**QUÍMICA AMBIENTAL**

**TÍTULO: Valoración de la eficiencia de carbón activado de jícara  
sabanero (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro  
para la remoción de arsénico en agua, 2016**

**Autora:**

Bra. Kathia Vanessa Rojas Cerda

**Tutora:**

MSc. Maximina Altamirano Espinoza

**Asesora:**

MSc. María Elena Vargas López

Managua, Diciembre 2017

*“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”*

Aristóteles  
Filósofo y científico griego  
(384 a. C - 322 a. C)

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo monográfico:

A Jehová Dios por brindarme la sabiduría y perspicacia necesaria para culminar satisfactoriamente cada una de mis metas.

A mis padres: Martha Cerda y Wilfredo Rojas quienes han dedicado toda su vida en inculcarme buenos valores y suministrarme todo lo necesario para llegar a cumplir cada una de mis metas y afrontar las tribulaciones de la vida.

A mi Hermano y Hermanas: Milton, Mileydi, Hazell, Yancis y Francela Rojas quienes están a mi lado en cada meta planteada.

A mis sobrinos Owen, Josué y Eithan quienes me inspiran a seguir luchando por alcanzar mis sueños.

A Lic. Luz Ramona quien me enseñó con amor mis primeras letras.

A cada uno de los Docentes que han contribuido significativamente en mi formación académica y profesional.

## **Agradecimiento**

Agradezco primeramente a Jehová por regalarme la vida y abrirme cada una de las puertas para el cumplimiento de mis metas.

A mi tutora y Jefa del Laboratorio de contaminantes metálicos del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) MSc. Maximina Altamirano Espinoza quien ha dedicado de su tiempo y energía para guiarme en el transcurso de esta investigación.

A mi asesora MSc. María Elena Vargas López por dedicar parte de su tiempo en dirigirme en esta investigación.

A MSc. Selvia Flores y MSc. Luis Moreno directores del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) por abrirme las puertas de tan prestigioso centro que dirigen, brindarme la oportunidad y apoyo incondicional para la realización de todo el desarrollo de este trabajo Monográfico.

A la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua por financiarme parte de esta investigación mediante el programa de los Fondos para Proyectos de Investigación (FPI).

A Dra. Katia Montenegro, Jefa del Área de investigación y desarrollo del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua por su apoyo incondicional en la culminación de esta investigación.

Al proyecto de cooperación técnico-económica entre el CIRA/UNAN-Managua y la Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB), por facilitarme el carbón activado y toda la información requerida para el enriquecimiento de esta investigación.

A PhD. Francisco Picado Pavón jefe del Laboratorio de mercurio ambiental del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) por proporcionarme el tiempo para trabajar en la finalización de dicha investigación.

A MSc. Bertha Fierro, Lic. Xaviera Mendez, Lic. Rommel Lacayo colegas del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) por el aporte significativo en la finalización de esta investigación.

A todos los docentes del departamento de Química y del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) por la contribución tan significativa en mi formación académica y profesional.

¡A todos muchas gracias!





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA  
UNAN - MANAGUA

CENTRO PARA LA INVESTIGACIÓN  
EN RECURSOS ACUÁTICOS  
DE NICARAGUA

CIRA/UNAN-MANAGUA



2017: "Año de la Universidad Emprendedora"

Managua 18 de octubre del 2017

MSc. Rosa María González Tapia  
Directora  
Departamento de Química  
UNAN – Managua

Estimada Directora

La bachillera Kathia Vanessa Rojas Cerda, ha culminado el estudio de tesis titulado **"Valoración de la eficiencia de carbón activado de jícara sabanero (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro para la remoción de arsénico en agua, 2016"** para optar al título de Licenciatura en Química Ambiental, considero que dicha investigación se ha llevado a cabo con mucho rigor científico, dedicación, iniciativa, liderazgo y empoderamiento en la ejecución de este estudio.

Cabe señalar que esta investigación dará pauta a continuar en el campo del uso de estas técnicas secuenciales de óxido de hierro y carbón activado ya que en nuestro país se ha detectado la presencia de arsénico de origen natural en muchas fuentes de agua.

Por lo tanto, avalo a la bachillera Rojas para que lleve a cabo los trámites pertinentes para ser sometido a presentación y evaluación por parte del jurado examinador que usted designe.

Sin más a que referirme, agradeciéndole su atención

Atentamente.

---

MSc. Maximina Altamirano Espinoza  
Tutora de tesis

**¡A la libertad por la Universidad!**

## Resumen

**Palabras claves:** Arsénico, óxidos de hierro, cáscara de jícara, carbón activado, remoción

La presencia de arsénico en las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano es indeseable por sus efectos negativos en la salud, su prolongado consumo a través de la ingesta puede causar cáncer, lesiones cutáneas, problemas en el desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes; por tal razón, este trabajo presenta la posibilidad de aplicar a escala de laboratorio una técnica que involucra dos medios adsorbentes, óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara sabanero (*Crescentia alata*) por La Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). Se utilizó dos tamaños de carbón activado (2-4 mm y 0,6 mm) a dos tiempos de contacto (6 h y 12 h), con tres soluciones de trabajo (10,00, 25,00 y 50,00 µg As /L) por duplicado para determinar y optimizar la remoción de arsénico en agua, mediante la metodología normalizada SMWW para la determinación de las concentraciones finales de arsénico, aplicando la técnica de generación de hidruro (VGA 77). La aplicación del test de ANOVA mostró que no existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos durante 6 h y 12 h de contacto con carbón activado a tamaños de 2-4 mm y 0,6 mm, por lo que se sugiere disminuir el tamaño del carbón para mejor remoción de contaminante. El mayor porcentaje de remoción de arsénico se obtuvo aplicando el tratamiento secuencial primeramente con óxidos de hierro y después carbón activado artesanalmente a base de cascara de jícara (*Crescentia alata*) con porcentajes de remoción de 50 % y 58 %.



# Índice

	Página
Capítulo I	
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación.....	3
1.4 Objetivos de investigación.....	4
1.4.1 General.....	4
1.4.2 Específicos.....	4
Capítulo II	
2.1 Marco referencial.....	6
2.1.1 Arsénico.....	6
2.1.1.1 Origen del arsénico en el agua.....	6
2.1.1.2 Toxicidad del arsénico.....	7
2.1.1.3 Métodos de remoción de arsénico.....	8
2.1.2 Carbón activado.....	11
2.1.1.1 Estructura del carbón activado.....	13
2.1.1.2 Proceso de adsorción.....	14
2.1.1.3 Optimización de condiciones de remoción de los carbones activados.....	15
2.1.2 Jícara Sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ).....	16
2.1.2.1 Producción artesanal de carbón activado a partir de cáscara de jícara sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ).....	18
2.2 Antecedentes.....	19
2.3 Hipótesis.....	23
Capítulo III	
3.1 Diseño metodológico.....	25

3.1.1 Descripción del ámbito de estudio .....	25
3.1.1.1 Localización de la comunidad El Bonete .....	25
3.1.2 Tipo de estudio .....	25
3.1.3 Población y Muestra .....	26
3.1.3.1 Población .....	26
3.1.3.2 Muestra .....	26
3.1.4 Variables y operacionalización.....	27
3.1.4.1 Variables independientes .....	27
3.1.4.2 Variables dependientes.....	27
3.1.4.3 Operacionalización de variables.....	27
3.1.5 Materiales y métodos.....	29
3.1.5.1 Diseño experimental.....	29
3.5.1.2 Materiales, Equipos y Reactivos de Laboratorio .....	30
3.1.5.3 Descripción de Metodología de Análisis.....	31
3.5.1.4 Preparación de las soluciones patrón de arsénico .....	32
3.5.1.5 Preparación de los clavos de hierro oxidados de media pulgada (1/2") .....	32
3.5.1.6 Optimización del carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) (2 – 4 mm y de 0,6 mm) en dos tiempos de contacto de 6 y 12 horas para la remoción de arsénico.....	33
3.5.1.7 Determinación de la remoción de arsénico por medio de la adsorción continua empleando óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) (0,6 mm) y un tiempo de contacto de 6 h.....	34
3.5.1.8 Análisis de varianza (ANOVA).....	35

## Capítulo IV

4.1 Resultados y discusión.....	38
4.1.1 Remoción de arsénico transcurrido el tiempo de contacto de 6 y 12 horas con carbón activado (2-4 mm) producido por ADECAB .....	38
4.1.1.1 Ensayo con tiempo de contacto de 6 horas .....	38

4.1.1.2 Ensayo con tiempo de contacto de 12 h .....	39
4.1.2 Remoción de arsénico transcurrido el tiempo de contacto de 6 y 12 horas con carbón activado (0,6mm) producido por ADECAB.....	41
4.1.2.1 Ensayo con tiempo de contacto 6 h de contacto .....	41
4.1.2.2 Ensayo con tiempo de contacto 12 h .....	42
4.1.3 Remoción de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con óxidos de hierro y carbón activado (0,6 mm) .....	44
Capítulo V	
5.1 Conclusiones.....	47
5.2 Recomendaciones.....	48
5.3 Referencias .....	49
5.4 Anexos .....	53
5.4.1 Figuras generales .....	53
5.4.2 Tablas de los resultados generales .....	59
5.4.3 Cálculos .....	66
5.4.4 Análisis estadísticos de los resultados.....	81

## ***Índice de gráficos***

<i>Gráfico 1.</i> Concentraciones finales de As ( $\mu\text{g/L}$ ) luego de ser expuestas durante 6 h de contacto con carbón activado de tamaño de 2-4 mm.....	38
<i>Gráfico 2.</i> Concentraciones finales de As luego de ser expuestas durante 12 h de contacto con carbón activado de tamaño de 2-4 mm.....	40
<i>Gráfico 3.</i> Concentraciones finales de As luego de ser expuestas durante 6 h de contacto en carbón activado con tamaño de 0,6 mm .....	42
<i>Gráfico 4.</i> Concentraciones finales de As luego de ser expuestas durante 12 h de contacto en carbón activado con tamaño de 0,6 mm.....	43
<i>Gráfico 5.</i> Concentraciones finales de As luego de someterse a filtración lenta por óxidos de hierro y luego expuestas durante 6 h de contacto carbón activado con tamaño de 0,6 mm .....	44
<i>Gráfico 6.</i> Resultados de Blancos y control de 10 $\mu\text{g As/ L}$ .....	80

## **Índice de figura**

<i>Figura 1.</i> Fuentes naturales de exposición a Arsénico.....	6
<i>Figura 2.</i> Pacientes de El Zapote en el Valle de Sébaco, Departamento de Matagalpa, Nicaragua.....	8
<i>Figura 3.</i> Filtro Kanchan .....	10
<i>Figura 4.</i> Las partículas de arsénico (As) se adsorben efectivamente sobre la superficie de los clavos de hierro oxidados .....	11
<i>Figura 5.</i> Arreglo de los átomos de carbono .....	13
<i>Figura 6.</i> Representación esquemática de la estructura porosa de carbones activados .....	14
<i>Figura 7.</i> Terminología del proceso de adsorción y desorción en carbones activados .	15
<i>Figura 8.</i> Árbol de Júcaro sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ) .....	16
<i>Figura 9.</i> Júcaro sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ) .....	17
<i>Figura 10.</i> Flujograma del proceso para la obtención artesanal de carbón activado de júcaro sabanero por miembros de la Cooperativa ADECAB .....	18
<i>Figura 11.</i> Localización de la comunidad El Bonete.....	25
<i>Figura 12.</i> Carbón activado fabricado artesanalmente por ADECAB .....	26
<i>Figura 13.</i> Carbón activado producido artesanalmente por ADECAB (2-4 y 0,6 mm)...	26
<i>Figura 14.</i> Recolecta de muestra de agua del pozo de la comunidad de El Bonete ....	30
<i>Figura 15.</i> Clavos de hierro oxidados.....	32
<i>Figura 16.</i> Flujograma del procedimiento aplicado para la optimización del método ....	33
<i>Figura 17.</i> Flujograma del método aplicado para la determinación de la remoción de arsénico aplicando óxidos de hierro y carbón activado.....	34
<i>Figura 18.</i> Acopio de cáscara de júcaro .....	53
<i>Figura 19.</i> Clasificación de la cáscara de júcaro .....	53
<i>Figura 20.</i> Carbonización de la cáscara de júcaro .....	54
<i>Figura 21.</i> Enfriado de la cáscara carbonizada .....	54
<i>Figura 22.</i> Mezcla con la solución Activante .....	55
<i>Figura 23.</i> Activación a 600 °C .....	55
<i>Figura 24.</i> Enfriado del carbón activado.....	56

<i>Figura 25.</i> Embalaje del carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara .....	56
<i>Figura 26.</i> Remoción de Arsénico por medio de carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara .....	57
<i>Figura 27.</i> Remoción de arsénico por medio de óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente por ADECAB.....	57
<i>Figura 28.</i> Determinación de Arsénico total en agua .....	58

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Concentraciones finales de arsénico después de tratamientos.....	20
Tabla 2. Operacionalización de Variables .....	28
Tabla 3. Volúmenes iniciales que se tomaron para la preparación de soluciones intermedias .....	59
Tabla 4. Volúmenes iniciales que se tomaron para preparar las soluciones de trabajo	59
Tabla 5. Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 2 – 4 mm.....	59
Tabla 6. Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 2 – 4 mm.....	60
Tabla 7. Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 2 – 4 mm .....	60
Tabla 8. Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 2 – 4 mm .....	60
Tabla 9. Resultados de la remoción de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 2 – 4 mm .....	61
Tabla 10. Resultados de la remoción de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con por medio de carbón activado producido a base de cáscara de jícara con un tamaño de 2 - 4mm.....	61
Tabla 11. Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm.....	61
Tabla 12. Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm.....	62

Tabla 13. Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm .....	62
Tabla 14. Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6..	62
Tabla 15. Resultados de la remoción de Arsénico por medio de carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm y 6 horas de contacto.....	63
Tabla 16. Resultados de la remoción de arsénico por medio de carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm y 12 horas de contacto .....	63
Tabla 17. Resultados de las concentraciones finales de arsénico por triplicado transcurridas 6 horas de contacto con óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm.....	63
Tabla 18. Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con un tamaño de 0,6 mm .....	64
Tabla 19. Resultados de remoción de arsénico por medio de óxidos de hierro y carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> ) con tamaño de 0,6 mm y 6 horas de contacto.....	64
Tabla 20. Valores Críticos de t-Test Student.....	65
Tabla 21. Datos de concentraciones de Remoción de arsénico .....	81
Tabla 22. Sumatorias de Cuadrados.....	81
Tabla 23. Resumen de ANOVA .....	85
Tabla 24. Datos de % de Remoción de Arsénico.....	87
Tabla 25. Sumatorias de Cuadrados.....	87
Tabla 26. Resumen de ANOVA .....	91



## Abreviaturas

**ADECAB:** Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete

**AMEC:** Aerobombas de Mecates

**CA:** Carbón activado.

**CAG:** Carbón activado granular.

**CAP:** Carbón activado en polvo.

**ENPHO:** Organización de Medio Ambiente y Salud Pública.

**EPA:** Agencia de protección ambiental.

**IARC:** Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer.

**MIT:** Instituto de Tecnología de Massachusetts.

**OMS:** Organización Mundial de la Salud.



## Capítulo I



## 1.1 Introducción

El arsénico es una de las sustancias peligrosas de mayor prioridad en el mundo, se encuentra en las rocas de origen volcánicas como arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) y por el sistema de fallas geológicas el arsénico se lixivia al agua subterránea, siendo un peligro por su toxicidad y carcinogenicidad en humanos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un valor máximo permisible para agua de bebida de  $10 \mu\text{g As/L}$ . En América Latina el arsénico también causa estragos. El reporte de la ONU menciona a Argentina, Chile y México como países en los cuales se han encontrado aguas subterráneas contaminadas con arsénico.

En Nicaragua la presencia de niveles de arsénico superiores a los límites máximos permisibles en el agua de consumo humano fue detectada en 1996 en un pozo perforado del Zapote, Matagalpa, con concentración de  $1\ 320 \mu\text{g As/L}$ . Desde la fecha el arsénico es un problema de salud pública debido a que se trata de un evento de alta frecuencia que ha sido detectado en otras áreas del país entre ellas se encuentra el Cerro Mina de Agua comunidad de Villanueva, Chinandega – Nicaragua.

Existen diferentes métodos para la remoción de arsénico, las sales de hierro (III) son principalmente aplicadas siendo un método de tratamiento en el que este metal reacciona con la alcalinidad del agua para formar hidróxidos férricos, compuestos que forman pequeños conglomerados insolubles llamados “flóculos”. El arsénico se liga a los flóculos formados de hidróxido férrico, que posteriormente son removidos por sedimentación y/o filtración en lechos granulares.

El carbón activado es un adsorbente muy empleado en procesos de adsorción de contaminantes. Esta propiedad del carbón activado puede ser aplicada en la remoción de los flóculos de arsénico formados en el proceso de complicación mediante clavos de hierro oxidados puesto que el fenómeno de la adsorción, consiste en la transferencia de las moléculas disueltas en una fase líquida a una fase sólida, la cual se lleva en varias etapas sobre la superficie del carbón activado.

Mediante esta investigación se pretendió valorar a escala de laboratorio la eficiencia del carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara y su combinación con óxidos de hierro, para remoción de arsénico en agua.

## 1.2 Planteamiento del problema

El carbón activado es considerado uno de los adsorbentes universales porque posee una gran porosidad y una gran área superficial de contacto. Existen distintas materias primas para la producción de este adsorbente, lo cual resulta en diferentes capacidades de adsorción y consecuentemente es necesario hacer ensayos de laboratorios para evaluar la eficiencia del carbón producido.

En Julio de 2014 la Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB) firmó un convenio de cooperación técnico - económica entre el Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA-UNAN) para producir carbón activado de manera artesanal analizado y validándolo para comercializarlo en el mercado; como una alternativa para obtener algún ingreso económico y respuesta a la problemática del país de contaminación de agua por factores abióticos, entre los que se pueden encontrar arsénico en forma natural.

En el Cerro Mina de Agua en Villanueva, las personas ingieren agua con concentraciones de arsénico de hasta 12,5  $\mu\text{g As/L}$  según (UNICEF, 2004). Esta población corre el riesgo de desarrollar patologías asociadas con arsénico, puesto que la Organización Mundial de la Salud sugiere un valor máximo permisible para agua de consumo humano de 10  $\mu\text{g As/L}$  (OMS, 2006).

Existen distintas técnicas para la remoción de arsénico de manera artesanal entre ellas la filtración por medios adsorbentes. En cambio se desconoce el porcentaje de remoción de este analito usando el carbón activado artesanal y óxidos de hierro. Por lo antes mencionado cabe preguntarse ¿Cuál es la importancia de valorar a escala de laboratorio la eficiencia del carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro, para remoción de arsénico en agua, CIRA/UNAN – Managua, 2016?.

### 1.3 Justificación

Uno de los problemas más graves que enfrenta la población Nicaragüense es el consumo de agua subterránea con altos niveles de metales tóxicos como el arsénico según estudio realizado por (UNICEF, 2004). Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen una gran repercusión en la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo proporcionan beneficios significativos para la salud.

Por ello promover el consumo de agua de calidad ha sido el motivo por el cual la Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB) ha fabricado artesanalmente el carbón activado a base de cáscara de jícara, el cual contribuye a la filtración del agua no potable, para convertirla en agua apta para consumo humano

La obtención de carbono activado a partir de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) es usado debido al bajo costo y la abundancia de éste en la comunidad El Bonete. Además según (Moreno, Giraldo y Vargas, 2008) este tipo de material es muy importante porque permite la obtención de carbón activado con porosidad variada dependiendo de las condiciones de preparación, como temperatura y tiempo de activación.

Con el objetivo de reducir las concentraciones de arsénico con el uso de óxidos de hierro y carbón activado fabricado artesanalmente a base de cáscara de jícara, esta investigación implicó la determinación del porcentaje de remoción de arsénico presente en el agua, generando la información relativa sobre la remoción de arsénico aplicando carbón activado producido por ADECAB.

## **1.4 Objetivos de investigación**

### **1.4.1 General**

Valorar a escala de laboratorio la eficiencia de carbón activado de cáscara de jícara sabanero (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro para la remoción de arsénico en agua.

### **1.4.2 Específicos**

1. Determinar la remoción de arsénico en agua utilizando dos tiempos de contacto y dos tamaños de carbón activado de jícara sabanero (*Crescentia alata*) producido artesanalmente por ADECAB.
2. Comprobar la remoción de arsénico en agua mediante tratamiento secuencial con óxidos de hierro y carbón activado de jícara sabanero (*Crescentia alata*).



## Capítulo II

## 2.1 Marco referencial

### 2.1.1 Arsénico

#### 2.1.1.1 Origen del arsénico en el agua

La presencia natural de arsénico en aguas superficiales y subterráneas de América Latina está asociada al volcanismo terciario y cuaternario de la cordillera de los Andes, proceso que continúa y que se muestra en flujos de lava, manantiales, fumarolas, aguas termales y fenómenos geotérmicos relacionados con el volcanismo del llamado “cinturón de fuego del Pacífico” (Esparza, 2006).

El arsénico, tanto en las aguas superficiales como en las aguas subterráneas, proviene de la disolución de minerales, la erosión y desintegración de rocas y por disposición atmosférica (Figura 1). En el agua se puede encontrar tanto en su forma trivalente como en su forma pentavalente, según las condiciones del medio. Con mayor frecuencia en el agua superficial predominan las formas oxidadas y en el agua subterránea sobre todo, en la más profunda, las formas reducidas (Esparza, 2006).

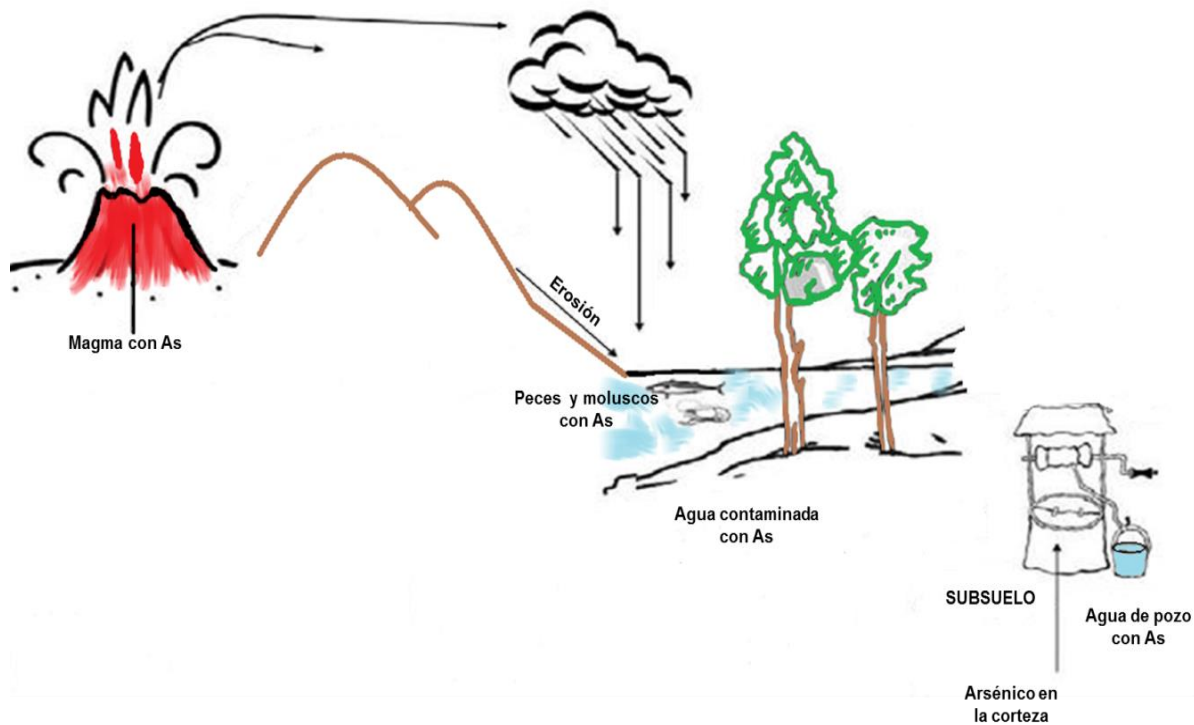


Figura 1. Fuentes naturales de exposición a Arsénico (Modificado de Paredes, 2012)

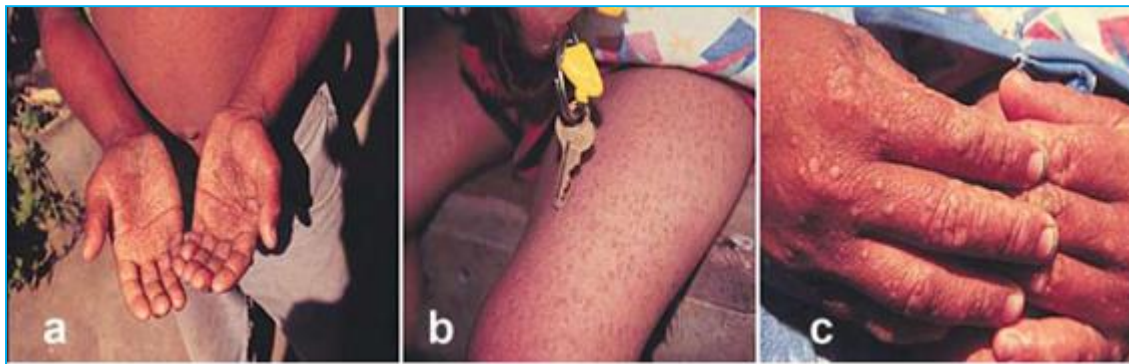
### **2.1.1.2 Toxicidad del arsénico**

El arsénico es altamente tóxico y su presencia en aguas subterráneas es un problema que afecta a millones de personas en el mundo. La toxicidad de este elemento está relacionada a su forma química y estados de oxidación.

Biológicamente el As (III) es considerado 60 veces más tóxico que el As (V) y a su vez, los compuestos inorgánicos son 100 veces más tóxicos que los compuestos orgánicos (Jain y Ali, 2000). Esto se debe a que el Arseniato ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) actúa como un análogo del fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y puede desacoplar, a nivel de sustrato, la fosforilación en la vía de la glucólisis; mientras que el arsenito ( $\text{AsO}_3^{3-}$ ) posee una alta afinidad por los grupos sulfhídrido de aminoácidos como la cisteína, inactivando enzimas en el metabolismo intermedio (Hughes, 2002).

La ingestión de arsénico inorgánico en dosis que exceden 6 000  $\mu\text{g/L}$  es letal, mientras que los síntomas de intoxicación aguda, a dosis más bajas, incluyen malestar gastrointestinal, vómito, shock, convulsiones y estado de coma (Han, Runnells y Wickramasinghe, 2002). Sin embargo, la exposición crónica a este contaminante, en concentraciones superiores a 50  $\mu\text{g/L}$ , está asociada a diversos padecimientos (Hughes, 2002).

La arsenicosis es una enfermedad crónica resultante de ingerir agua con altos niveles de arsénico por un largo período de tiempo; se caracteriza por hiperpigmentación e hiperqueratosis como se observa en la Figura 2 (Kapaj, Peterson, Liber y Bhattacharya, 2006). Asimismo, este elemento es considerado un agente cancerígeno humano por la agencia internacional de investigación en cáncer (IARC, 2004).



*Figura 2.* Pacientes de El Zapote en el Valle de Sébaco, departamento de Matagalpa, Nicaragua.

En la figura 2 se muestran pacientes que ingirieron  $1\ 320\ \mu\text{g As/L}$  en el agua de consumo humano de un pozo, durante dos años. a- hiperqueratosis punctata a nivel palmar en un joven de 14 años. b- hipomelanosis en gota de lluvia en un niño de año y medio. c- pápulas verrugosas en el dorso de las manos de una dama de aproximadamente 25 años, tomado de (Montero, Quesada, Ledezma y Sandoval, 2010).

Diversos estudios correlacionan la ingesta de arsénico inorgánico con cáncer de pulmón, piel, órganos internos, vejiga, pulmón (Ferrecio y et al., 2000). También, existen varios efectos no cancerígenos relacionados a la ingesta de arsénico a bajas concentraciones, los cuales incluyen: enfermedades cardiovasculares, diabetes, anemia, desordenes reproductivos, inmunológicos, neurológicos y complicaciones en el embarazo, tales como el aborto y parto prematuro (Kapaj, Peterson, Liber y Bhattacharya, 2006).

### **2.1.1.3 Métodos de remoción de arsénico**

Varias tecnologías han sido reportadas para remover arsénico presente en agua, siendo las técnicas fisicoquímicas las más utilizadas (USEPA, 2007).

Algunas técnicas incluyen:

- Procesos de precipitación incluyendo coagulación-filtración, filtración directa coagulación, floculación y ablandamiento (Han, Runnells y Wickramasinghe, 2002).

- Procesos de intercambio iónico específicamente intercambio aniónico (DeMarco, SenGruta, John y Greenleaf, 2003).
- Filtración por membranas que incluye nanofiltración, osmosis inversa y electrodiálisis inversa (USEPA, 2007).

Sin embargo, algunos factores como el alto costo de operación, de los químicos y de las membranas han limitado el uso de ciertas técnicas. Además la producción de lodos es otra desventaja en la remoción de arsénico por sistemas de coagulación - floculación. La adsorción, por su parte, es un proceso de bajo costo y alta eficiencia muy utilizado para la remoción del arsénico.

- Procesos de adsorción que incluyen adsorción en alúmina activada, carbón activado, óxidos de hierro y óxidos de manganeso (Mohan y Pittman, 2007).

Entre los materiales más usados para la remoción de arsénico los óxidos de Fe(III) son los más comunes, debido a que son relativamente baratos y ambientalmente benignos. Las propiedades de ácido de Lewis de los grupos funcionales de los óxidos de Fe(III) son dependientes del pH y pueden ser descritas mediante las reacciones (1) y (2):



Donde  $\text{FeOH}_2^+$ ,  $\equiv \text{FeOH}$  y  $\equiv \text{FeO}^-$  representan los grupos funcionales positivos, neutros y negativos de los óxidos metálicos hidratados, y adquieren predominancia de acuerdo a valores de  $\text{pK}_1 = 6,5$  y  $\text{pK}_2 = 9,0$ . El arsénico es removido del agua a través del principal mecanismo (Edwards, 1994):

Las especies de arsénico son removidas, principalmente, por mecanismos de adsorción, siendo la sorción del arsénico disuelto en la superficie del hidróxido metálico insoluble como Arseniato férrico (Amirtharajah y O'Melia, 1990):



- Filtro de arsénico Kanchan (KAF)

El Filtro de arsénico Kanchan (KAF) es un innovador dispositivo de tratamiento de agua potable doméstico para eliminar arsénico, patógenos, hierro, turbidez, olor y otros contaminantes en el agua potable (Figura 3).

Este filtro fue desarrollado por investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la Organización de Medio Ambiente y Salud Pública (ENPHO) de Nepal y el Programa de Apoyo al Suministro de Agua y Saneamiento Rural (RWSSSP) de Nepal, basado en filtros de filtración lenta e hidróxido de hierro. Esta tecnología es el resultado de cinco años de investigación multidisciplinaria y se optimiza teniendo en cuenta las condiciones socioeconómicas de una comunidad rural ( Ngai, Dangol, Murcott y Shrestha, 2005).

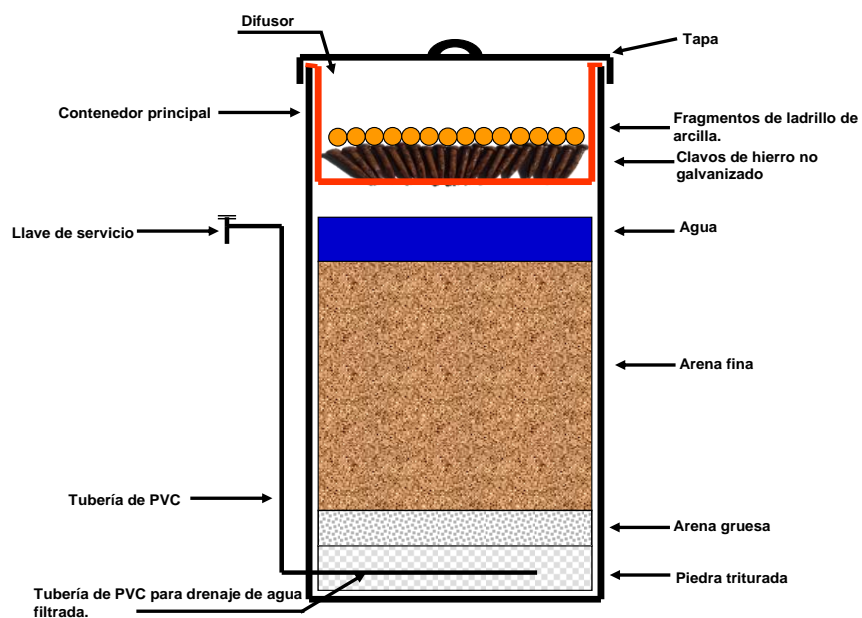


Figura 3. Filtro Kanchan ( Ngai, Dangol, Murcott, & Shrestha, 2005)

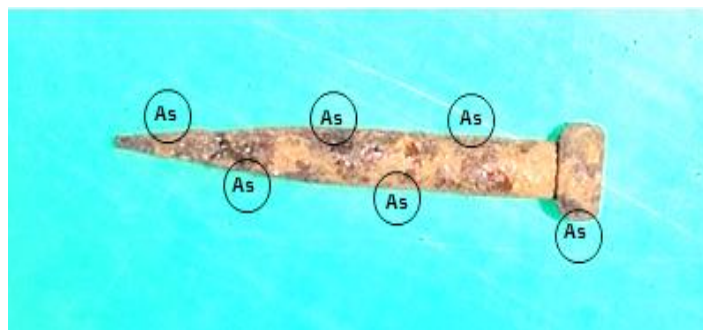
- Eliminación del arsénico mediante el filtro KAF

En el KAF, los clavos de hierro están expuestas al aire y al agua, y se oxidan muy rápidamente, produciendo partículas de hidróxido férrico. Numerosos estudios

internacionales han demostrado que el hidróxido férrico (óxido de hierro) es un excelente adsorbente para el arsénico.

Cuando se vierte agua que contiene arsénico en el filtro, se produce una reacción de complejación superficial, y el arsénico se adsorbe rápidamente sobre la superficie de las partículas de hidróxido férrico. Las partículas de hierro cargadas con arsénico se retienen en la capa de arena que se encuentra a continuación. Debido al pequeño espacio de poros en la capa de arena fina, las partículas de hierro cargadas con arsénico quedarán atrapadas en los primeros centímetros superiores de la capa de arena fina (Figura 4). Como resultado, el arsénico se elimina eficazmente del agua.

La investigación de campo por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y la Organización de Medio Ambiente y Salud Pública (ENPHO) demostró la eliminación del arsénico en el rango de 85-95% ( Ngai, Dangol, Murcott y Shrestha, 2005).



*Figura 4.* Las partículas de arsénico (As) se adsorben efectivamente sobre la superficie de los clavos de hierro oxidados (Elaborado por Kathia Rojas, 2016)

### **2.1.2 Carbón activado**

El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y un área superficial excepcionalmente alta (Universidad Politécnica de Sevilla, 2002).

La obtención de carbones activados a partir de material lignocelulósico es ampliamente usada debido al bajo costo y a la abundancia de este tipo de materiales en la naturaleza. Este tipo de precursores son también muy importantes, pues permiten la obtención de carbones activados con variedad de tamaños y distribuciones de poro,

variando las condiciones de preparación tales como temperaturas y tiempos de activación (Marco, Suárez, Cazorla y Linares, 2005).

La activación de cualquier carbón consiste en " multiplicar" el área superficial creando una estructura porosa. Es importante mencionar que el área superficial del carbón activado es interna. Para darnos una idea más clara de la magnitud de la misma, imaginemos un gramo de carbón en trozo el cual moleremos muy fino para incrementar su superficie, como resultado obtendremos un área aproximada de 3 a 4 metros cuadrados, en cambio, al activar el carbón logramos multiplicar de 200 a 300 veces este valor, logrando alcanzarse áreas de 1 200 -1 500 m<sup>2</sup> /g de carbón (Universidad Politecnica de Sevilla, 2002).

Las propiedades finales de un carbón activado están determinadas en gran medida por el material precursor, debido a que es éste quien establece en forma esencial las características estructurales del carbón resultante; cabe recordar que lo que se hace durante un proceso de activación es básicamente abrir poros que se han podido tapar por depósito de alquitranes pero respetando la estructura original del carbonizado del material de partida (Suzuki , Andrade , Sousa y Rollemberg, 2000).

La diferencia fundamental entre uno y otro tipo de carbón radica en la estructura, o arreglo de sus átomos. En el caso del carbón activo, éstos se encuentran combinados en forma de placas graníticas (Figura 5). Las placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se les denominan poros, que brindan al carbón activo su principal característica: una gran área superficial, y por lo tanto, una alta capacidad adsorbente (Universidad Politecnica de Sevilla, 2002).



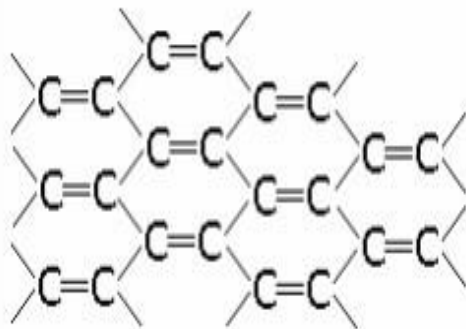


Figura 5. Arreglo de los átomos de carbono (Universidad Politecnica de Sevilla, 2002)

### 2.1.1.1 Estructura del carbón activado

Los carbones activados (CA) son productos carbonosos con una estructura porosa desarrollada y elevada área superficial que pueden adherir en su superficie una alta gama de moléculas por medio del proceso de adsorción. Su volumen de poros es en general mayor a 0,2 mL/g y su superficie interna mayor a 400 m<sup>2</sup>/g (CEFIC, 1986). De acuerdo a la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada el carbón activado es un material carbonoso poroso producido por medio de la reacción de un carbonizado con gases, o algunas veces mediante la adición de químicos; con el objetivo de incrementar sus propiedades de adsorción (IUPAC, 2009).

Los poros que forman la estructura porosa se clasifican según su tamaño en base en los principios fisicoquímicos que rigen el proceso de adsorción en cada uno de ellos. Asumiendo una forma cilíndrica (Figura 6), de acuerdo a la IUPAC, los poros se clasifican en: (IUPAC, 2009)

- Microporos: tamaño inferior a 2 nm.
- Mesoporos: tamaño comprendido entre 2 – 50 nm.
- Macroporos: tamaño mayor a 50 nm.

Poros con ancho menor a 0,7 nm se denominan submicroporos. La adsorción ocurre en los micros y mesoporos, y los macroporos sirven como medio de transporte de las sustancias que se adsorben en el interior de las partículas. El proceso de adsorción ocurre en los microporos por medio de llenado; en los mesoporos, que también sirven

como medio de transporte desde los macroporos hasta los microporos, la adsorción ocurre por condensación capilar (Gregg y Sing , 1982).

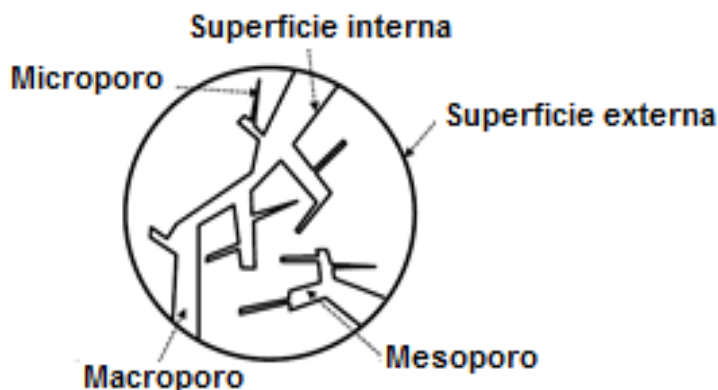


Figura 6. Representación esquemática de la estructura porosa de carbones activados (IUPAC, 2009)

#### 2.1.1.2 Proceso de adsorción

Este proceso consiste en la fijación de moléculas en la superficie de un sólido debido a la presencia de fuerzas de atracción intermoleculares en sitios específicos del sólido denominados centros activos. El proceso contrario se denomina desorción. En la Figura 7 se representa la terminología utilizada en la descripción del proceso. El sólido, en el cual se adsorben las moléculas, se denomina adsorbente. La sustancia a adsorber, se denomina adsortivo y la sustancia que se encuentra adsorbida se denomina adsorbato. La adsorción es un proceso exotérmico debido a la disminución en la energía cinética de las moléculas del adsortivo (Jüntgen, 1999).

La superficie del adsorbente puede ser de naturaleza homogénea o heterogénea. Superficies homogéneas presentan sitios activos con la misma interacción de fuerzas en toda el área disponible para la adsorción. En la práctica, sin embargo, se encuentran superficies heterogéneas con sitios activos con diferentes niveles de energía. En la Figura 7 se indica este aspecto a través de los espacios con diferentes profundidades en el adsorbente (Jüntgen, 1999).

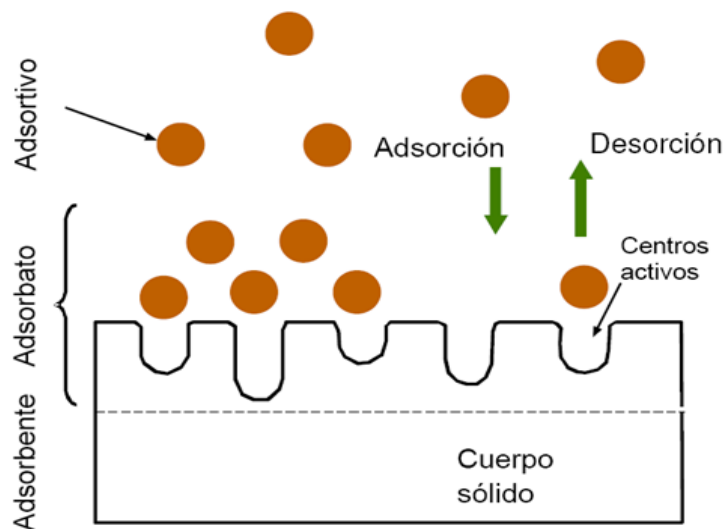


Figura 7. Terminología del proceso de adsorción y desorción en carbones activados (Jüntgen, 1999)

Existen dos teorías principales que describen el proceso de adsorción: la teoría del cubrimiento de superficie y la teoría del llenado de poros. La primera tiene un rango de aplicación general, mientras que la segunda es aplicable para sólidos microporosos. En la adsorción por cubrimiento de superficie se supone que inicialmente se adsorbe una capa de moléculas en la superficie (adsorción mono capa); cuando esta primera capa está completamente formada se inicia la adsorción de más moléculas sobre ella (adsorción multicapas). A medida que se van formando más capas, las fuerzas de unión entre las moléculas y el sólido disminuyen hasta que en capas posteriores ocurre solamente condensación

La teoría del llenado de los poros aplica para los sólidos micro porosos y propone que el llenado de los poros se realiza de manera similar al llenado de un líquido en un recipiente. En los micro poros el proceso de adsorción es mucho más fuerte que en superficies aplanadas como las que se presentan en los meso y macro poros, ya que las moléculas están sometidas a fuerzas de adsorción superpuestas por la cercanía de las paredes de los poros (Rincón , 2005).

### 2.1.1.3 Optimización de condiciones de remoción de los carbones activados

La optimización de las condiciones de remoción de un carbón activo no siempre es una tarea sencilla, se debe tener en cuenta la textura porosa y la química superficial, ya

que están interrelacionadas. Un aumento en el contenido de grupos superficiales oxigenados puede modificar la textura porosa de un carbón, ya que se pueden bloquear parte de los microporos lo que disminuye la accesibilidad al sistema poroso.

Un tratamiento térmico a temperaturas elevadas para eliminar grupos superficiales puede también producir un colapso de la textura porosa disminuyendo también el volumen de poros. Así, a veces puede ser necesario llegar a soluciones de compromiso cuando se pretende optimizar la textura porosa y química superficial de un carbón (Universidad Politecnica de Sevilla, 2002).

Es un verdadero reto para el carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) ya que existe la probabilidad de la ineficiencia del control de las condiciones de activación principalmente la temperatura.

### **2.1.2 Jícara Sabanero (*Crescentia alata*)**

El jícara (*Crescentia alata*) es conocido en Guatemala como Cirian, en Costa Rica como Catuco, en el Salvador como morro y en Nicaragua como jícara sabanero; es un árbol común leñoso de corteza cenicienta, con hojas coriáceas, espatuladas, sentadas, que abunda en planicies y laderas esencialmente secas, pero también pueden crecer en terrenos húmedos y arenosos de zonas cálidas; raramente alcanza los 12 m de alto, de copa redondeada y diámetro corto, ramas gruesas y algunas veces intercaladas, corteza café claro, escamosa o profundamente fisurada y fibrosa como se muestra en la Figura 8 (Ardon, 2008).



*Figura 8.* Árbol de Jícara sabanero (*Crescentia alata*)

Los frutos son ovales o subglobosos, la cáscara es fuerte y lustrosa, la pulpa es blanca aromática y contiene muchas semillas aplanadas, éstas le dan más valor a esta fruta (Figura 9). Existe otra variedad muy común de árbol de jícaro sabanero llamada (*Crescentia cujete*) se diferencia del *Crescentia alata* en que sus frutos son más grandes, pero posee muy pocas semillas, por lo que para la producción de semillas se prefiere al anterior. El jícaro sabanero (*Crescentia alata*) frecuentemente es encontrado en pasturas para dar sombra o para que sus frutos sean consumidos por el ganado (Ardon, 2008).



Figura 9. Jícaro sabanero (*Crescentia alata*)

Su resistencia a la sequía, a la potencia de los huracanes, a las inundaciones e incluso a los incendios, se debe a su sistema radicular: posee una raíz pivotante que es cinco veces más larga que la parte visible del árbol, penetrando el subsuelo hasta llegar donde está el agua, así como raíces laterales superficiales y profundas; todo ello le proporciona un excelente anclaje y absorción de agua y nutrientes (Bendaña, 2012).

- Rendimiento del fruto.

Un árbol adulto de 5 años, produce entre 60 y 200 frutos por año y cada fruto pesa en promedio 370 gramos. De una tonelada de frutos frescos (aproximadamente 2 470 frutos) se obtienen los siguientes productos: 40 kg de pulpa seca a consumirse por el ganado y 200 kg de cáscara seca que se usa como combustible (Bendaña, 2012).

### 2.1.2.1 Producción artesanal de carbón activado a partir de cáscara de jícara sabanero (*Crescentia alata*)

El carbón activado a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) fue producido artesanalmente por miembros de la Cooperativa ADECAB siguiendo los pasos generales descritos en el siguiente flujograma:

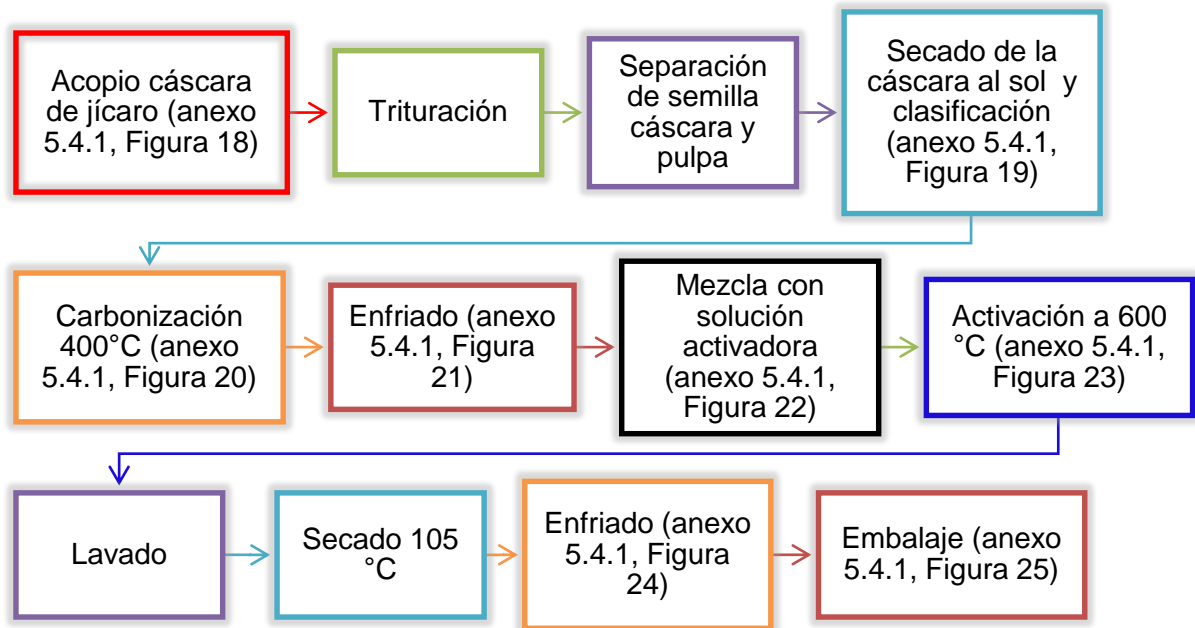


Figura 10. Flujograma del proceso para la obtención artesanal de carbón activado de jícara sabanero (*Crescentia alata*) por miembros de la Cooperativa ADECAB (Mendoza y Picado, 2016)

## 2.2 Antecedentes

En el 2002 Gómez monitoreo y atendió a intoxicados con arsénico en el zapote, municipio de San Isidro en el departamento de Matagalpa, Nicaragua, encontrando que entre los pobladores que ingirieron mayores niveles de As (arsénico) observó con cifras significativas altas la parestesia, edema en miembros inferiores, ardor ocular, lesiones cutáneas y manifestaciones respiratorias. Sobresalieron la queratosis y la hiperpigmentación propias del arsenicismo crónico; la presencia de dos pacientes con esplenomegalia e hipertensión porta y la baja prevalencia de hepatomegalia y anemia.

En el 2005 Glibota de la Universidad Nacional del Nordeste en Argentina, realizó una investigación titulada Adsorción de arsénico en filtros de carbón activado comerciales (análisis y comparación de resultados), en el cual estudio diferentes filtros de carbón activado comercial para comparar el poder de adsorción de arsénico utilizando tres diferentes filtros de carbones activados.

Los dos primeros carbones los analizó en filtros de cartucho en (carbón extruido en block), para el último armó el filtro dentro de un recipiente del mismo volumen exterior que los cartuchos comerciales y el agua a circular contenía una concentración inicial de arsénico (sin especificar especies) de 30  $\mu\text{g/L}$ , recirculó una cantidad de 2 litros de agua para cada ensayo durante 24 horas y tomó dos alícuotas de 5 mL del agua recirculada para cada ensayo.

Repitió el mismo proceso antes de haber agregado a todas la muestra de agua a tratar oxido férrico en una concentración de 1 mg/L, usando los mismos tipos de filtro (los resultados se muestran en Tabla 1).

Tabla 1. Concentraciones finales de arsénico después de tratamientos

<b>Origen del carbón</b>	<b>Concentración As (<math>\mu\text{g} / \text{L}</math>) sin óxido de hierro</b>	<b>Concentración As (<math>\mu\text{g} / \text{L}</math>) con óxido de hierro</b>
Cáscara coco (EE.UU.)	20	10
S/d (importado)	30	20
Vegetal (Argentina)	30	20

En el 2005 Altamirano realizó en el Centro para la Investigación de Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA / UNAN) un estudio de distribución de la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la subcuenca suroeste del Valle de Sébaco, Matagalpa - Nicaragua. En la cual se recolectaron muestras de agua de 57 pozos analizados de los el 36 % superan el valor máximo permisible para agua de consumo humano  $10 \mu\text{g}/\text{L}$  según la OMS. Además determino que las fuentes principales de arsénico en la subcuenca suroeste del acuífero del Valle de Sébaco, están asociadas a procesos hidrotermales vinculados al volcanismo terciario.

En el 2006 Marengo realizó en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) un estudio titulado Caracterización del carbón activado obtenido a partir de semilla de nancite a escala de laboratorio (2006). Se produjo por primera vez en Nicaragua carbón activado a partir de semilla de nancite por activación química, se caracterizó el carbón obtenido utilizando las técnicas de adsorción de nitrógeno líquido, fluorescencia de rayos X y análisis elemental por combustión.

Obteniendo los siguientes resultados: un área superficial de  $678,2066 \text{ m}^2/\text{g}$  con un diámetro medio de poros de  $28 \text{ \AA}$ . En cuanto a la composición química del carbón de



semilla de nancite, se obtuvo en promedio: 74,3470% de C; 1,1721% de N; 4,2440% de H y 20,2370% de O.

En el 2008 Mendieta realizó en la Universidad de Ingeniería de Nicaragua (UNI) un estudio para la determinar la capacidad de adsorción de arsénico por medio de carbón activado obtenido a partir de la semilla de nancite en aguas de pozos con altos índice de arsénico. La cual consistió en adecuar el pH de 1 – 12, la concentración de arsénico de 50, 100 y 200 ppb. Los resultados de este estudio se obtuvieron en un rango de pH de 4 – 9 en el cual se presentó una mayor capacidad de remoción por adsorción de 9% hasta 78%.

En el 2009 Narváez realizó en el Instituto Politécnico Nacional (IPN, México, D. F) un estudio para evaluar la zeolita sintetizada a partir de residuos de carbón, en la remoción de arsénico en agua para consumo humano, en el cual llevó acabo la evaluación de tres materiales en la remoción de arsénico: alúmina, alúmina modificada con silicio y zeolita obtenida a partir de cenizas de carbón, obteniendo resultados en el orden de: alúmina > alúmina modificada con silicio > zeolita, siendo capaces de remover arsénico hasta una concentración por debajo de 25 ppb

En el 2010 Mora estudio en la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL, México) la remoción de colorantes de disoluciones acuosas por adsorción mediante el uso de carbón activado producidos a partir de leña de mezquite, en la cual incrementó hasta 6 veces activando el carbón con cloruro de zinc, debido al aumento del área superficial y el volumen de poro. El tamaño de poro disminuyó durante la activación afectando a la velocidad inicial de adsorción, lo cual se observa en la cinética de adsorción alcanzando el equilibrio después de 50 horas.

En el 2012 Bendaña realizó investigación de Agua agricultura y seguridad alimentaria en las zonas secas de Nicaragua, en el cual menciona que el Júcaro es una planta originaria de Centroamérica y México; su hábitat natural es la sabana o llano (sabanas de júcaro), donde es la planta dominante; crece silvestre de forma esparcida. En Nicaragua se le encuentra principalmente en las zonas más secas de las regiones del Pacífico y Central.

En el 2014 Navarrete, Quijano y Vélez realizaron en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL, Guayaquil - Ecuador) un estudio para la elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante. En el cual utilizó concentración inicial de arsénico 0.0600 mg/L obteniendo concentraciones finales de arsénico al filtrarla con los distintos carbones activado de: cáscara de plátano (< 0.0031 mg/L), cascarilla de arroz (0.0035 mg/L), pepa de zapote (< 0.0031 mg/L), encontrándose a los carbones activados proveniente del plátano y del zapote como los que adsorbieron mayor arsénico.

...Rivera y Piña en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realizaron un tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada, en el cual los mejores resultados de remoción de arsénico fueron obtenidos con las zeolitas acondicionadas mediante evaporación de soluciones de hierro en presencia del medio granular, en especial cuando usan sales de hierro, en el cual utilizaron agua con un contenido de arsénico de 50  $\mu\text{g As/L}$ , logrando obtener una concentración final de 21  $\mu\text{g As/L}$

## 2.3 Hipótesis

El carbón activado fabricado artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) y su combinación con óxidos de hierro a escala de laboratorio serán eficientes para la remoción de arsénico en agua.

## Capítulo III

### 3.1 Diseño metodológico

#### 3.1.1 Descripción del ámbito de estudio

Este estudio se realizó en la comunidad El Bonete, municipio de Villanueva, la cual se encuentra a una distancia de 186 km de Managua, donde se sitúa la Asociación para el Desarrollo Campesino El Bonete (ADECAB) quienes producen el carbón activado fabricado artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (Figura 11).

##### 3.1.1.1 Localización de la comunidad El Bonete

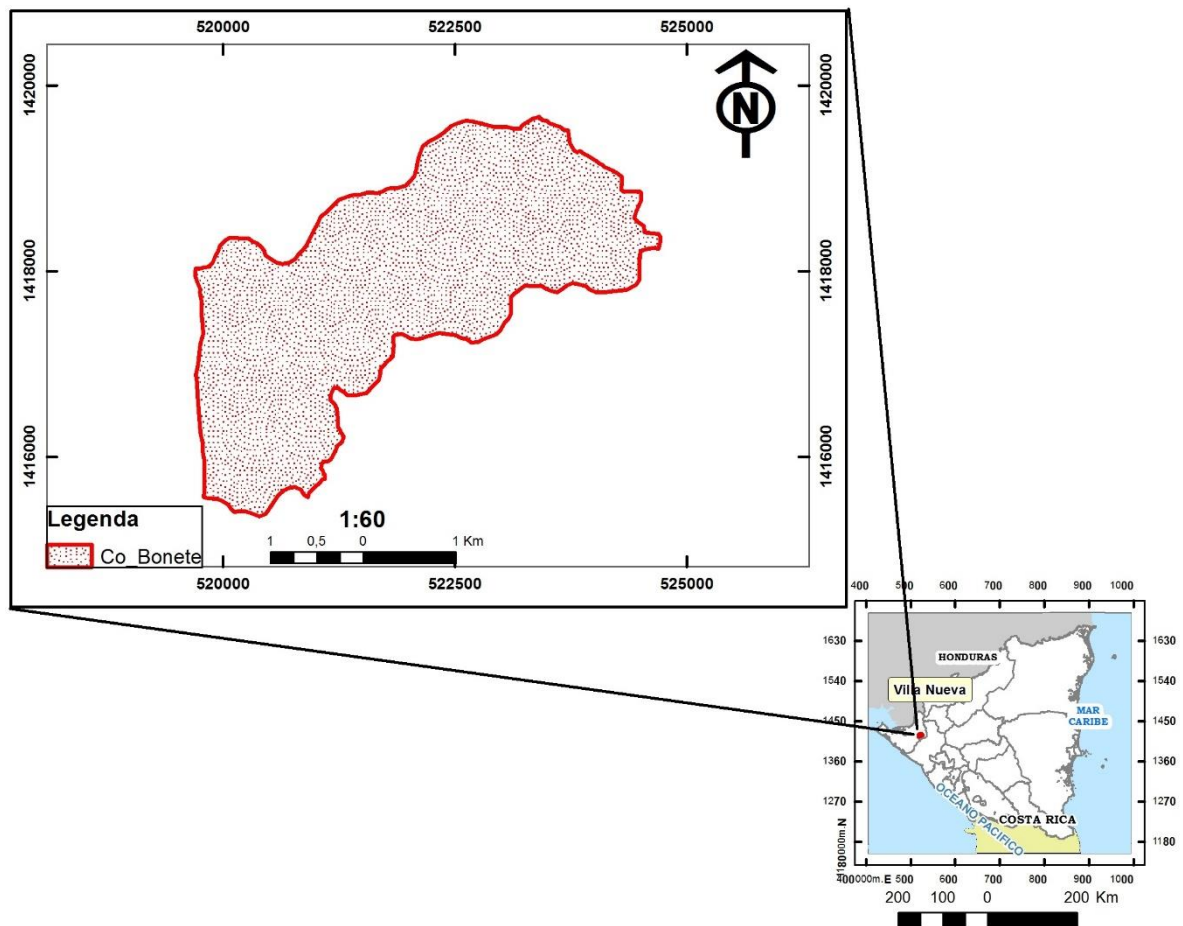


Figura 11. Localización de la comunidad El Bonete (Elaborado por Kathia Rojas, 2016)

#### 3.1.2 Tipo de estudio

El estudio es de tipo descriptivo – experimental y se realizó en el Laboratorio de Contaminantes Metálicos del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN, Managua).

### 3.1.3 Población y Muestra

#### 3.1.3.1 Población

La población del estudio es el Carbón activado fabricado artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) producido por La Asociación para el Desarrollo Campesino El Bonete (Figura 12).



Figura 12. Carbón activado fabricado artesanalmente por ADECAB

#### 3.1.3.2 Muestra

Las muestras que se utilizaron para la experimentación analítica en el laboratorio se obtuvieron tamizando el carbón activado producido por ADECAB hasta obtener dos tamaños (2-4 mm y de 0,6 mm, Figura 13), tres soluciones de trabajo de arsénico (10  $\mu\text{g As/L}$ , 25  $\mu\text{g As/L}$  y 50  $\mu\text{g As/L}$ ) y a dos tiempos de contacto (6 h y 12 h).

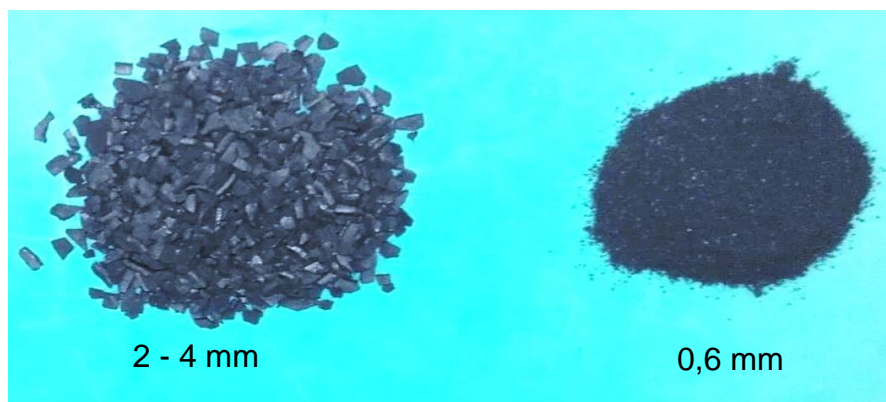


Figura 13. Carbón activado producido artesanalmente por ADECAB (2-4 y 0,6 mm)

La unidad muestral se obtuvo colocando en contacto las soluciones de arsénico con los diferentes tamaños de carbón activado a tiempos de contacto de 6 h y 12 h, obteniéndose así la información necesaria para optimizar el método de remoción, se realizaron 24 ensayos con carbón activado y 9 en combinación con óxidos de hierro y carbón activado.

### **3.1.4 Variables y operacionalización**

#### **3.1.4.1 Variables independientes**

- Concentración inicial de arsénico en agua contaminada (10 µg As/L, 25 µg As/L y 50 µg As/L).
- Tamaño del adsorbente (2-4 mm y 0.6 mm).
- Tiempo de contacto (6 h y 12 h).

#### **3.1.4.2 Variables dependientes**

- Remoción de arsénico del agua contaminada después de tratamientos.

#### **3.1.4.3 Operacionalización de variables**

A continuación se enlistan las variables de estudio que permanecieron constantes y no constantes en la parte experimental y el tipo de variable, el cual indica si es independiente o dependiente.

Tabla 2. Operacionalización de Variables

Objetivo general	Objetivos Específicos	Variable dependiente	Indicador	Valor/Categoría
Valorar a escala de laboratorio la eficiencia de carbón activado de cáscara de jícara sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ) y su combinación con óxidos de hierro para la remoción de arsénico en agua.	Determinar y optimizar la remoción de arsénico en agua usando dos tiempos de contacto y dos tamaños de carbón activado de jícara sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ) producido artesanalmente por ADECAB.	Remoción de arsénico del agua contaminada después de tratamientos	Cantidad de arsénico adsorbida de la fase acuosa luego de ser sometida a tratamientos (tamaños de adsorbente y tiempos de contacto).	%
		<b>Variable independiente</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor/Categoría</b>
		Concentración inicial de arsénico en agua contaminada	Cantidad de arsénico agregado a un volumen determinado de agua.	microgramos de As por litro ( $\mu\text{g As/L}$ )
		Tamaño del adsorbente	Dimensiones o diámetro del carbón activado producido a base de cáscara de jícara ( <i>Crescentia alata</i> )	milímetros (mm)
		Tiempo de contacto	Período de tiempo en que se ponen en contacto directo el adsorbente y el agua contaminada por arsénico ocurra el proceso de adsorción de As mediante el carbón activado.	horas (h)
	Comprobar la remoción de arsénico en agua mediante tratamiento secuencial con óxidos de hierro y carbón activado de jícara sabanero ( <i>Crescentia alata</i> ).	Concentración inicial de arsénico en agua contaminada	Cantidad de arsénico agregado a un volumen determinado de agua.	microgramos de As por litro ( $\mu\text{g As/L}$ )
		Tamaño del adsorbente	Dimensiones o diámetro del carbón activado producido a base de cáscara de jícara	milímetros (mm)
		Tiempo de contacto	Período de tiempo en que se ponen en contacto directo el adsorbente y el agua contaminada por arsénico ocurra el proceso de adsorción de As mediante el carbón activado.	horas (h)



### 3.1.5 Materiales y métodos

#### 3.1.5.1 Diseño experimental

Los ensayos para la optimización del método de remoción usando como adsorbente solamente al carbón activado producido artesanalmente por ADECAB se realizaron sometiendo tres concentraciones conocidas de As (10, 25 y 50  $\mu\text{g As/L}$  en agua desionizada, preparadas a partir de una solución de 1 000  $\mu\text{g As/L}$  la cual se preparó de una ampolleta de titrisol), dos tamaños de carbón activado (2-4 mm y 0,6 mm) y durante dos tiempos de contacto (6 h y 12 h). Estos ensayos se realizaron por duplicado en botellas plásticas de 355 mL. La menor concentración ensayada (10  $\mu\text{g/L}$ ) se seleccionó ya que la OMS ha normado este valor como la cantidad máxima permisible de arsénico en agua para consumo humano y la máxima concentración ensayada (50  $\mu\text{g As/L}$ ) se seleccionó ya que se ha reportado que la exposición crónica a concentraciones similares está asociada a diversos padecimientos (Hughes, 2002).

Los ensayos para la determinación de los porcentajes de remoción de arsénico por medio de óxidos de hierro y carbón activado se hicieron con agua del pozo perforado de la comunidad de El Bonete (descrito más adelante) a la cual se le agregaron diferentes volúmenes de solución estándar de arsénico para obtener 13,58, 28,58 y 53,58  $\mu\text{g As/L}$ ; respectivamente. Luego se procedió a colocar en contacto con los óxidos de hierro y el carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) de 0,6 mm durante 6 horas. Estos ensayos se realizaron por triplicado.

El agua natural empleada se recolectó del pozo perforado con una profundidad de 100 pies, ubicado en la comunidad de El Bonete, municipio de Villanueva en el departamento de Chinandega (Figura 14), que presentó una concentración de 3,58  $\mu\text{g As/L}$  y tiene las siguientes características físico-químicas básicas: pH= 7,37, Conductividad eléctrica= 475  $\mu\text{S/cm}$  y Dureza total= 219,85 mg/L (como  $\text{CaCO}_3$ ). La muestra fue colectada y preservada con 2 ml de  $\text{HNO}_3$  por litro de muestra para su traslado en termo con hielo hasta el Laboratorio de Contaminantes Metálicos del CIRA/UNAN para su análisis, siguiendo el Protocolo de Cadena de Custodia del CIRA/UNAN (PROC-CM-02).



*Figura 14.* Recolecta de muestra de agua del pozo de la comunidad de El Bonete

Los ensayos con carbón activado se realizaron por duplicado para la optimización de la metodología aplicada en la determinación de los porcentajes de remoción de arsénico aplicando óxidos de hierro y carbón activado.

### 3.5.1.2 Materiales, Equipos y Reactivos de Laboratorio

- Balones volumétricos de 100 mL, 250 mL, 500 mL y 1 000 mL.
- Pipetas volumétricas de 2,5 mL; 5 mL; 10 mL; y 25 mL.
- Erlenmeyer de 250 mL.
- Beaker de 50 mL y 100 mL.
- Probetas graduadas de 10 mL y 100 mL.
- Espátulas.
- Papel filtro.
- Embudos artesanales de plástico
- Goteros.
- Botellas plásticas.
- Espectrómetro de Absorción Atómica, VARIAN, Spectr AA – 240 FS/Z.
- Generador de Hidruros para la determinación de arsénico total, VARIAN, (VGA - 77).

- Balanza Analítica Sartorius con escala de medición 0,02 g.
- Cronómetro.
- Ampolla de Titrisol de arsénico (As) de 1 000 000 µg As (para Espectroscopía de Absorción Atómica).
- Agua desionizada.

### **3.1.5.3 Descripción de Metodología de Análisis**

En el laboratorio de Contaminantes Metálicos del CIRA/UNAN Managua se determinaron las concentraciones de arsénico total a las muestras obtenidas en cada ensayo. La determinación se llevó a cabo por espectrometría de absorción atómica (espectrómetro Varian Spectr AA-240 FS) con la técnica de generación de hidruros (VGA 77). El límite de detección del método es 0,99 µg As/L para la matriz agua (SMWW, 2005).

El método de Generación de Hidruros es la técnica más utilizada en la determinación del arsénico. Esta consiste en la generación del hidruro con un reductor a partir de uno de sus estados de valencia. Las muestras de agua son sometidas a una digestión bajo condiciones fuertemente oxidantes con Ácido Clorhídrico (HCl) concentrado, llevando al Arsénico hasta el máximo estado de oxidación, en este caso As (V). Una vez que está en este estado, es primeramente reducido con Yoduro de Potasio (KI) en medio ácido hasta As (III) y luego es sometido a una segunda reducción con Borohidruro de Sodio (NaBH<sub>4</sub>) en medio ácido, hasta la formación de la Arsina (AsH<sub>3</sub>). Estos hidruros volátiles son acarreados por una corriente continua de nitrógeno y llevados dentro de una celda de cuarzo que es calentada con una llama aire-acetileno. Estos hidruros volátiles se disocian en átomos libres, estos átomos absorben cuantitativamente la radiación emitida por la lámpara de cátodo hueco y la cantidad de radiación absorbida está en función de su concentración (CIRA/UNAN, 1999)

La señal de la lámpara una vez que pasa por la llama llega a un monocromador, que tiene como finalidad el discriminar todas las señales que acompañan la línea de interés. Esta señal de radiación electromagnética llega a un detector o transductor y pasa a un amplificador y por último a un sistema de lectura (Rocha, 2000).

#### 3.5.1.4 Preparación de las soluciones patrón de arsénico

Las soluciones se prepararon a partir de una solución patrón de 1 000 mg As; As<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en agua, MERCK 1.09939.0001. De la cual, se preparó una solución intermedia de 10 000 µg As/L y a partir de ésta otra de 1 000 µg As/L, la cual se utilizó para preparar las soluciones de trabajo, se calculó los volumen iniciales para preparar dichas soluciones aplicando la ecuación 1, los cálculos se pueden verificar en los ítems 5.4.3.2 y 5.4.3.3 (anexo 5.4.2, Tabla 3).

$$C_i \times V_i = C_f \times V_f \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

C<sub>i</sub>: Concentración inicial

V<sub>i</sub>: Volumen inicial.

C<sub>f</sub>: Concentración final.

V<sub>f</sub>: Volumen final.

#### 3.5.1.5 Preparación de los clavos de hierro oxidados de media pulgada (1/2")

Se colocaron los clavos de fierros no galvanizados de 1/2" pulgada en una pana con agua, dejándolos en contacto durante 2 semanas. Finalizadas las dos semanas se procedió a separar los clavos del agua y se dejaron en el sol durante dos días, con el objetivo de eliminar cualquier partícula de agua (AMEC, 2015). Se realizó este procedimiento para producir óxidos de hierro, siendo utilizados para retener arsénico (Figura 15).



Figura 15. Clavos de hierro oxidados

### 3.5.1.6 Optimización del carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (2 – 4 mm y de 0,6 mm) en dos tiempos de contacto de 6 y 12 horas para la remoción de arsénico

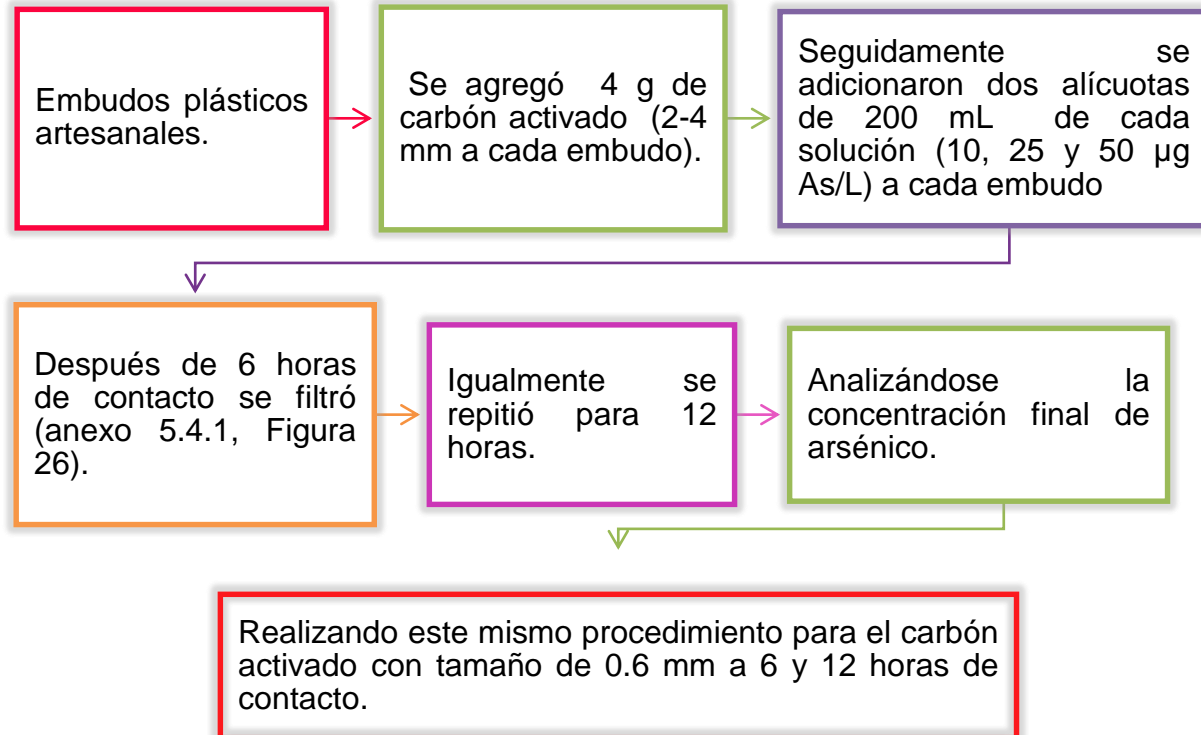


Figura 16. Flujograma del procedimiento aplicado para la optimización del método

### 3.5.1.7 Determinación de la remoción de arsénico por medio de la adsorción continua empleando óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (0,6 mm) y un tiempo de contacto de 6 h

Metodología tomada del filtro Kanchan desarrollado por investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), la Organización de Medio Ambiente y Salud Pública (ENPHO) de Nepal y el Programa de Apoyo al Suministro de Agua y Saneamiento Rural (RWSSSP) de Nepal, basado en filtros de filtración lenta e hidróxido de hierro ( Ngai, Dangol, Murcott, y Shrestha, 2005).

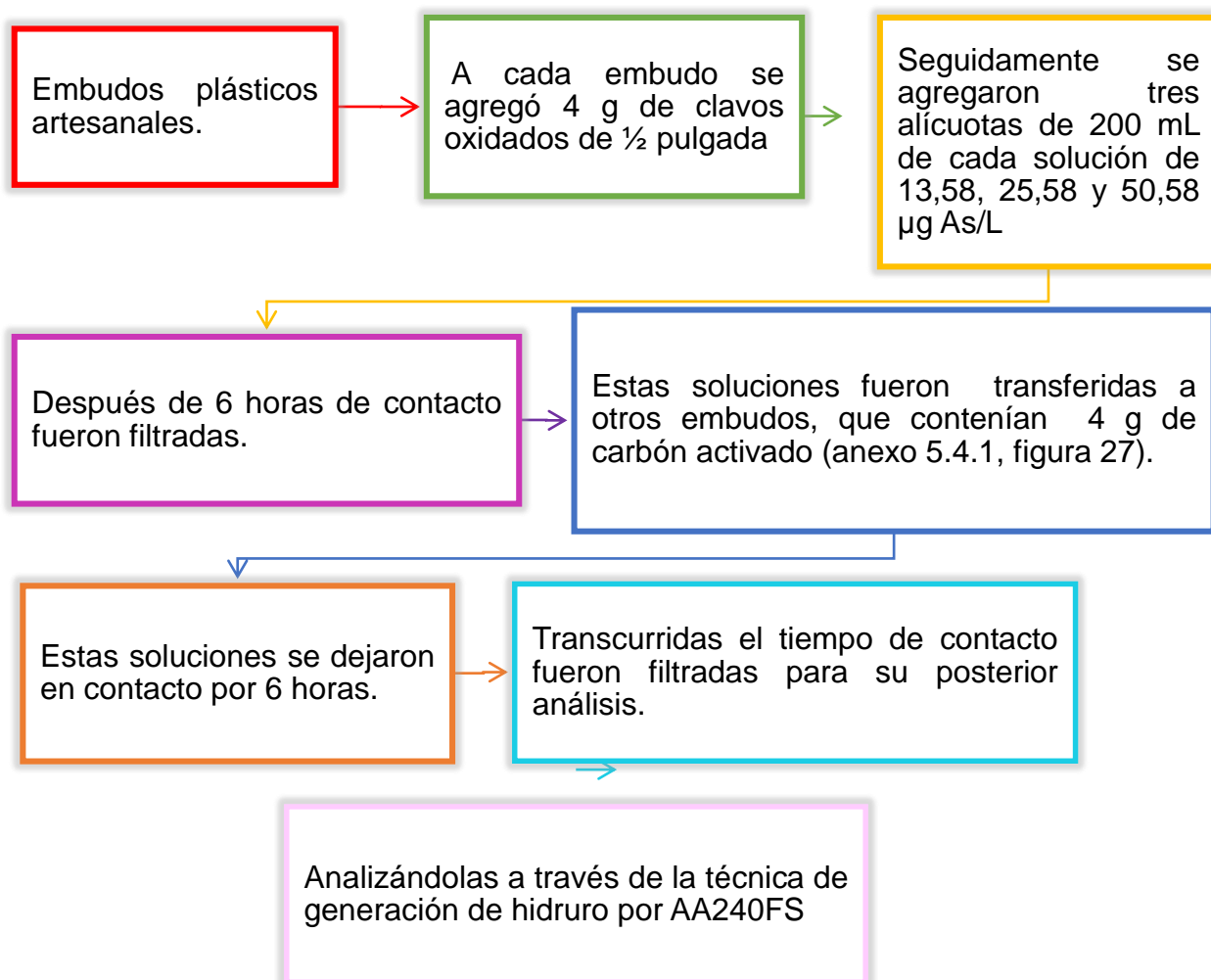


Figura 17. Flujograma del método aplicado para la determinación de la remoción de arsénico aplicando óxidos de hierro y carbón activado

Obteniendo los valores de las concentraciones finales de arsénico luego de ser sometidas durante un periodo de contacto con los medios adsorbentes se procedió a calcular los porcentajes de remoción de arsénico por medio de carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con tamaños de 2 – 4 mm; 0,6 mm y a diferentes tiempos de contacto (6 y 12 horas):

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \% \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

Donde:

$C_i$ : Concentración inicial de As ( $\mu\text{g As/L}$ )

$C_f$ : Concentración final de As ( $\mu\text{g As/L}$ )

Para los cálculos de los porcentajes de remoción se promediaron los valores de las concentraciones finales, por lo que se les calculó la desviación estándar aplicando la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación N}^\circ 3$$

Donde:

$\sum(X - \bar{X})^2$ : Sumatoria de la resta de cada replica menos la media elevado al cuadrado

n: Número de replicas

### 3.5.1.8 Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística la cual se aplicó a los resultados obtenidos de remoción de arsénico con el propósito de contactar que el tiempo de contacto (6 h y 12 h) influye significativamente entre los valores medios obtenidos de arsénico en los ensayos de optimización del método; lo cual se realizó comparando la suma de cuadrados residuales y de interacción. Si no hay ninguna interacción, entonces se puede constatar que la influencia del tiempo de contacto no es significativa en la

Valoración de la eficiencia del carbón activado y óxidos de hierro para la remoción de arsénico en agua  
CIRA/UNAN – Managua, 2016

remoción de arsénico mediante carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) por ADECAB.



## Capítulo IV

## 4.1 Resultados y discusión

### 4.1.1 Remoción de arsénico transcurrido el tiempo de contacto de 6 y 12 horas con carbón activado (2-4 mm) producido por ADECAB

#### 4.1.1.1 Ensayo con tiempo de contacto de 6 horas

Se sometieron tres soluciones de 10,00  $\mu\text{g As/L}$ , 25,00  $\mu\text{g As/L}$  y 50,00  $\mu\text{g As/L}$  en contacto con carbón activado con un diámetro de 2 - 4 mm durante 6 h, en el Gráfico 1 se muestran los promedios obtenidos de las concentraciones finales de arsénico de 9,74  $\mu\text{g As/L}$ , 23,69  $\mu\text{g As/L}$  y 49,77  $\mu\text{g As/L}$ , para un porcentajes de remoción de arsénico de 2,60 %, 5,24% y 0,46% respectivamente, resultando para la concentración de 25,00  $\mu\text{g As/L}$  la mejor remoción obtenida de 5,24%, estos valores se aprecian en el anexo 5.4.2, Tabla 9.

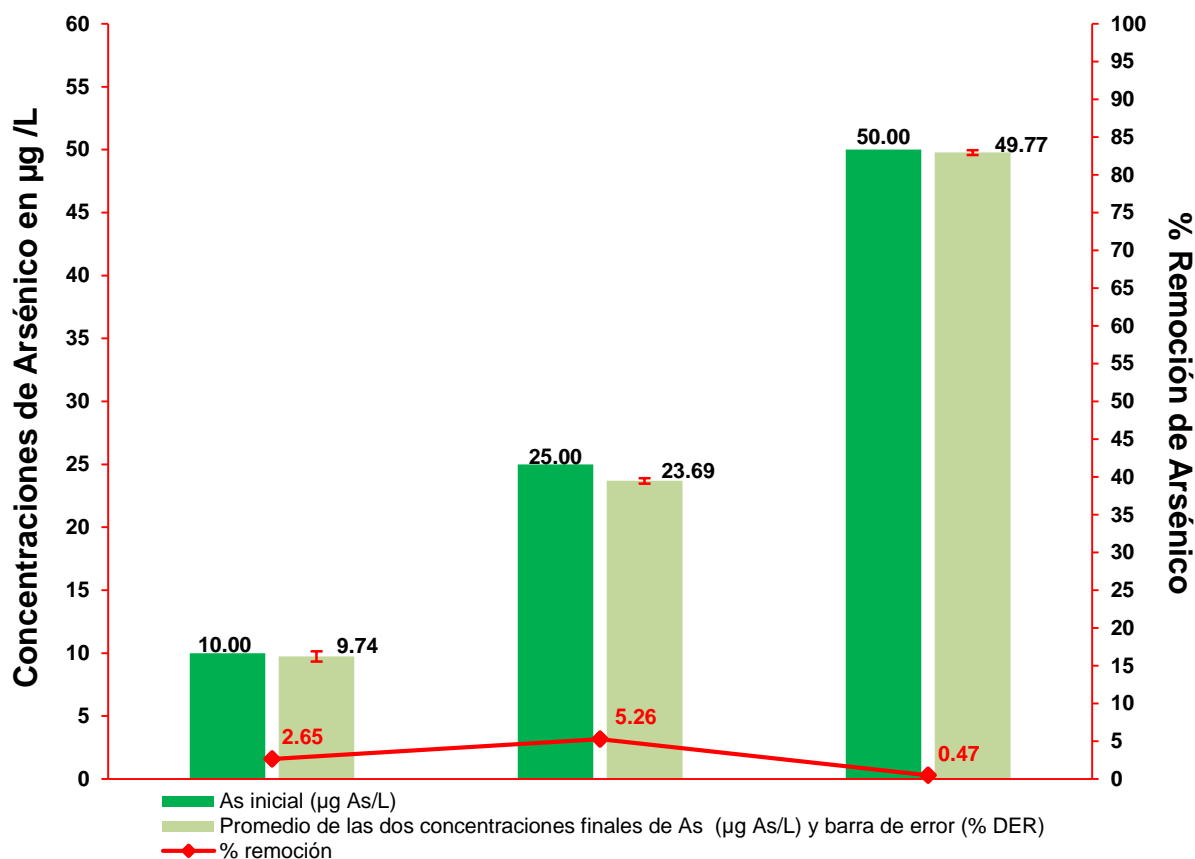


Gráfico 1. Concentraciones finales de As ( $\mu\text{g/L}$ ) luego de ser expuestas durante 6 h de contacto con carbón activado de tamaño de 2-4 mm

El menor porcentaje de remoción se dio a 50  $\mu\text{g As/L}$ , probablemente a que los poros del carbón activado se saturaron disminuyendo el área de contacto entre el analito y el agente adsorbente. La capacidad de un carbón activado para retener una sustancia determinada no sólo está dada por su área superficial, sino por la proporción de poros cuyo tamaño sea el adecuado (Ures Rodríguez, Suárez López, y Jácome Burgos, 2015).

Los resultados de las concentraciones finales de arsénico, se representan mediante gráficos de barras de error, ya que es un valor promediado, cabe mencionar que la barras de error representan la desviación estándar relativa (siendo la diferencia significativa que existe entre las concentraciones promediadas), una barra de error larga significa que la diferencia entre las concentración de los valores sobre los que se calculó el promedio es alta y una barra de error corta significa que es baja y por lo tanto, el valor promedio se conoce con más seguridad. Permitiendo observar el rango de la desviación estándar del promedio de cada una de las concentraciones finales (promediada).

#### **4.1.1.2 Ensayo con tiempo de contacto de 12 h**

Los valores de concentración finales de remoción de Arsénico trascurrido el tiempo de contacto de 12 horas, analizadas bajo las mismas concentraciones previamente establecidas para los ensayos a 6 horas, reflejan datos similares de remoción 9,45  $\mu\text{g As/L}$ , 23,43  $\mu\text{g As/L}$ , 49,65  $\mu\text{g As/L}$  como se muestran en el Gráfico 2. Los valores resultantes en porcentajes corresponden a 5,50 %, 6,28% y 0,70% respectivamente, siendo la mayor remoción obtenida para la concentración de 25,00  $\mu\text{g As/L}$  estos resultados se aprecian en el anexo 5.4.2, Tabla 10.

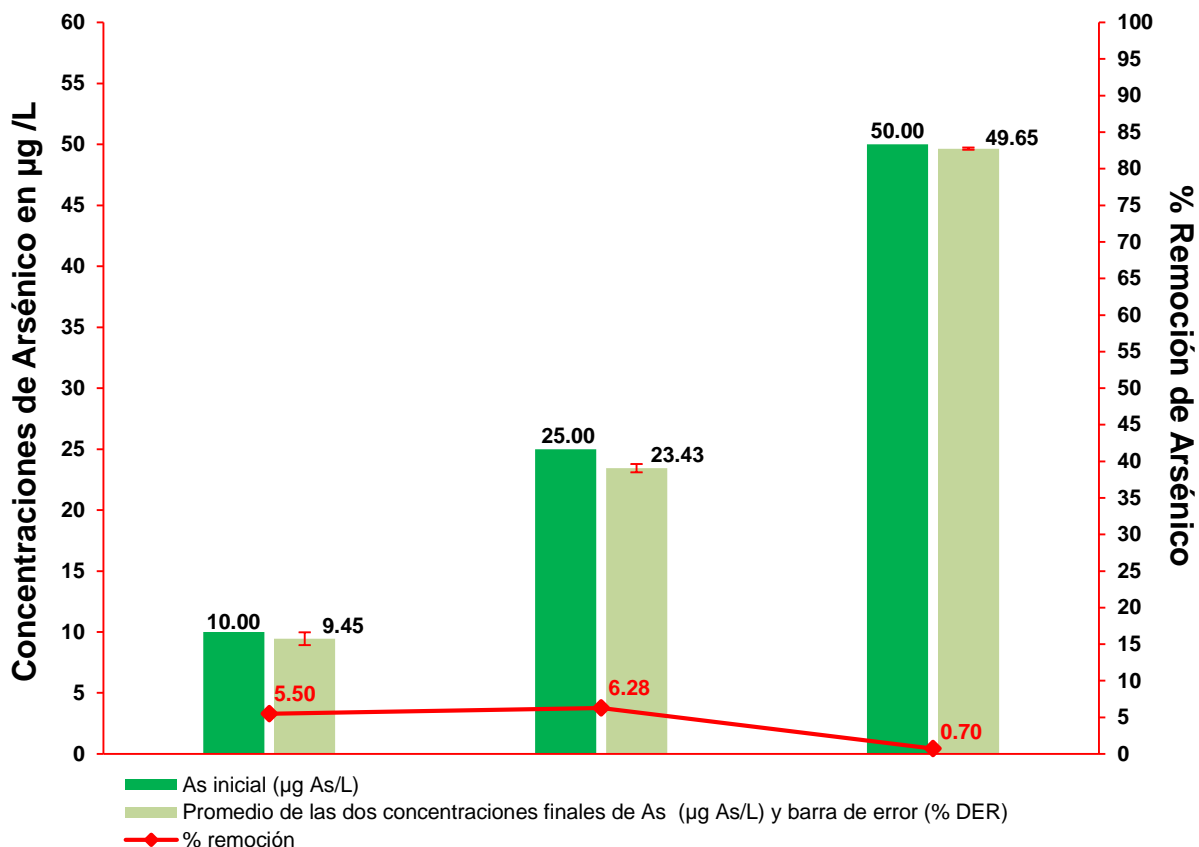


Gráfico 2. Concentraciones finales de As luego de ser expuestas durante 12 h de contacto con carbón activado de tamaño de 2-4 mm

Basándose en los resultados obtenidos de los dos tiempos de contactos de 6 y 12 horas, se aplicó el test estadístico de análisis de varianza (ANOVA) el cual permitió constatar si existía diferencia significativa entre las concentraciones adsorbidas en los dos tiempos de contactos, usando el mismo diámetro de carbón activado (2-4 mm).

El análisis de ANOVA, muestra que el  $F_{Cal} < F_{Tab}$ , con un 95% de confianza por lo que se acepta la hipótesis nula y asume que todas las medias son iguales, de manera que no existe variación entre las concentraciones adsorbidas en los dos tiempos de contacto (anexo 5.4.4.1).

#### **4.1.2 Remoción de arsénico transcurrido el tiempo de contacto de 6 y 12 horas con carbón activado (0,6mm) producido por ADECAB**

##### **4.1.2.1 Ensayo con tiempo de contacto 6 h de contacto**

En general los resultados obtenidos para la remoción de arsénico empleando tres concentraciones diferentes 10 µg As/L, 25 µg As/L y 50 µg As/L, en 6 horas de contacto con carbón activado 0,6 mm, fueron mayores en comparación a los obtenidos con tamaño de 2 - 4 mm, obteniendo concentraciones finales de 9,44 µg As/L, 23,15 µg As/L, 42,84 µg As/L (Gráfico 3). El mayor porcentaje de remoción se obtuvo a 50 µg As/L con 14,32 % (Anexo, Tabla15).

.....La baja adsorción del carbón activado quizás se deba a sus poros, puede que en gran medida predominen los macroporos y mesoporos, puesto que una propiedad muy importante y decisiva de los materiales adsorbentes es el tamaño de su poro, la mayor parte del área superficial total se encuentra en los microporos, por tanto, son los microporos los centros más disponibles a la adsorción para moléculas con relativamente bajo peso molecular (Ures Rodríguez, Suárez López, y Jácome Burgos, 2015).

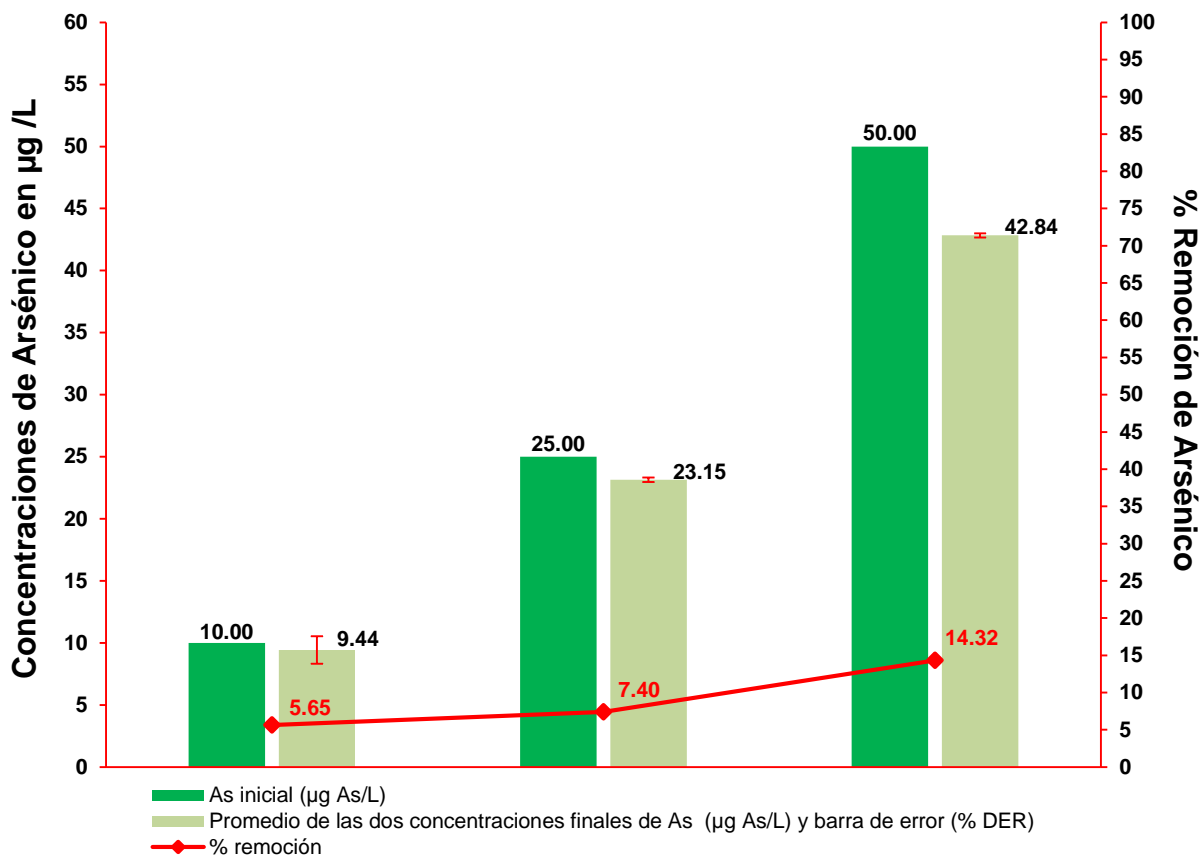


Gráfico 3. Concentraciones finales de As luego de ser expuestas durante 6 h de contacto en carbón activado con tamaño de 0,6 mm

#### 4.1.2.2 Ensayo con tiempo de contacto 12 h

Las concentraciones finales de las tres soluciones de arsénico de 10 µg As/L, 25 µg As/L y 50 µg As/L, al ser sometidas en contacto con carbón activado de 0,6 mm durante 12 h, siendo de 9,32 µg As/L, 22,59 µg As/L, 42,52 µg As/L (Gráfico 4). Los valores resultantes en porcentajes corresponden a 6,80 %, 9,64 % y 14,96 % respectivamente, alcanzando el mayor porcentaje de remoción a 50 µg As/L (anexo 5.4.2, Tabla 16).

En comparación con los tamaños del carbón activado de 2 - 4 mm y 0,6 mm la capacidad de adsorción es mayor en 0,6 mm, esto quizás se debe a que la adsorción se considera generalmente proporcional al área superficial específica de contacto, por tanto cuanto más finamente dividido y más porosos sea el carbón activado, mayor será el rendimiento esperado de adsorción por unidad de peso de adsorbente como indica (Ures Rodríguez, Suárez López, y Jácome Burgos, 2015).

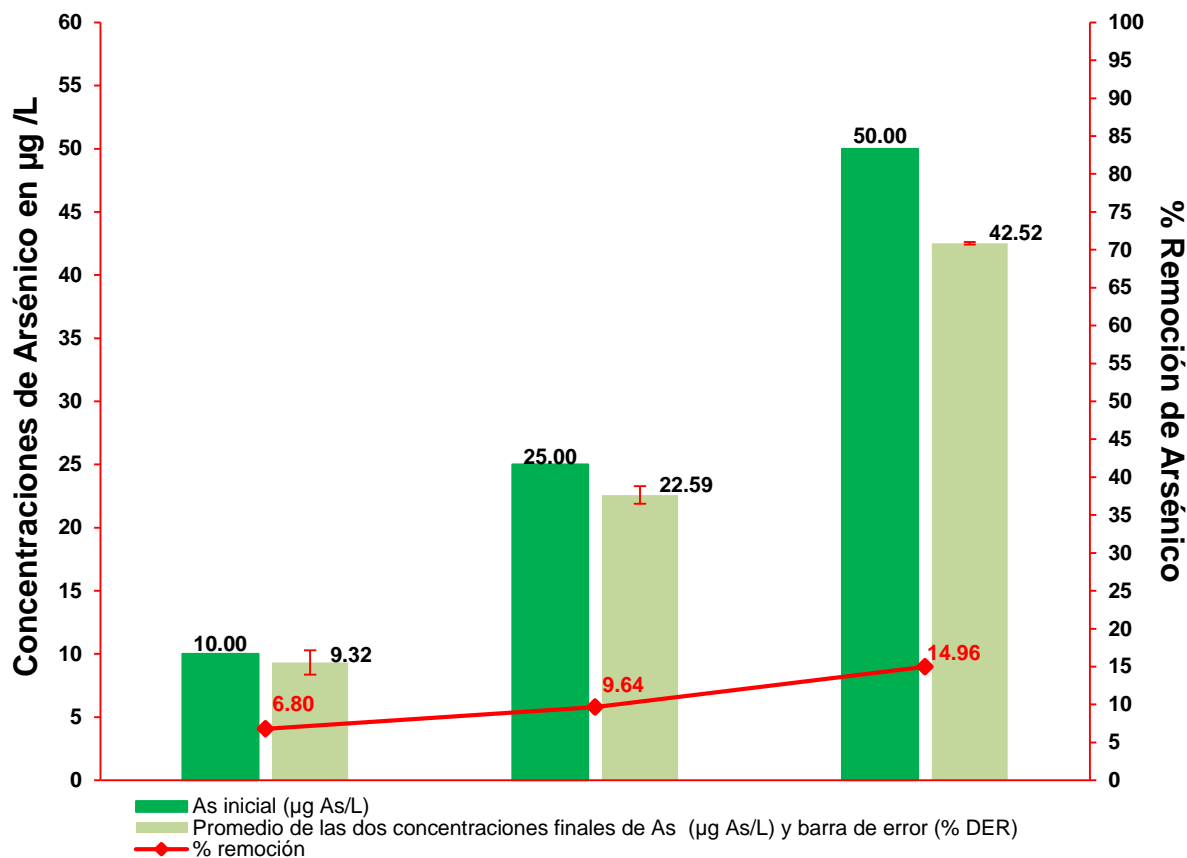


Gráfico 4. Concentraciones finales de As luego de ser expuestas durante 12 h de contacto en carbón activado con tamaño de 0,6 mm

Ahora bien al aplicarle ANOVA; su comparación muestra que: el  $F_{Cal} < F_{Tab}$ , siendo el valor  $F_{Cal}$  de la interacción entre las filas y columnas (los tiempos de contacto y los % de remoción) y con un 95% de confianza se acepta la hipótesis nula y se dice que todas las medias son iguales, de manera que no existe variación entre el tiempo de contacto y los porcentajes de remoción de arsénico; por tanto se puede concluir que los tiempos de contacto no influyen significativamente en los porcentajes de remoción, cabe señalar que los porcentajes de adsorción son relativamente iguales en ambos tiempos de contacto y es proporcional con las concentraciones iniciales (anexo 5.4.4.2).

#### 4.1.3 Remoción de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con óxidos de hierro y carbón activado (0,6 mm)

Las concentraciones finales de arsénico de tres soluciones ensayadas con clavos de hierros oxidados (clavos de ½ pulgada) y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) de 0,6 mm de tres muestras con concentraciones de As de: 13,58 µg As/L, 28,58 µg As/L y 53,58 µg As/L (Gráfico 5), se obtuvieron concentraciones finales de 6,16 µg As/L, 14,18 µg As/L y 22,35 µg As/L.

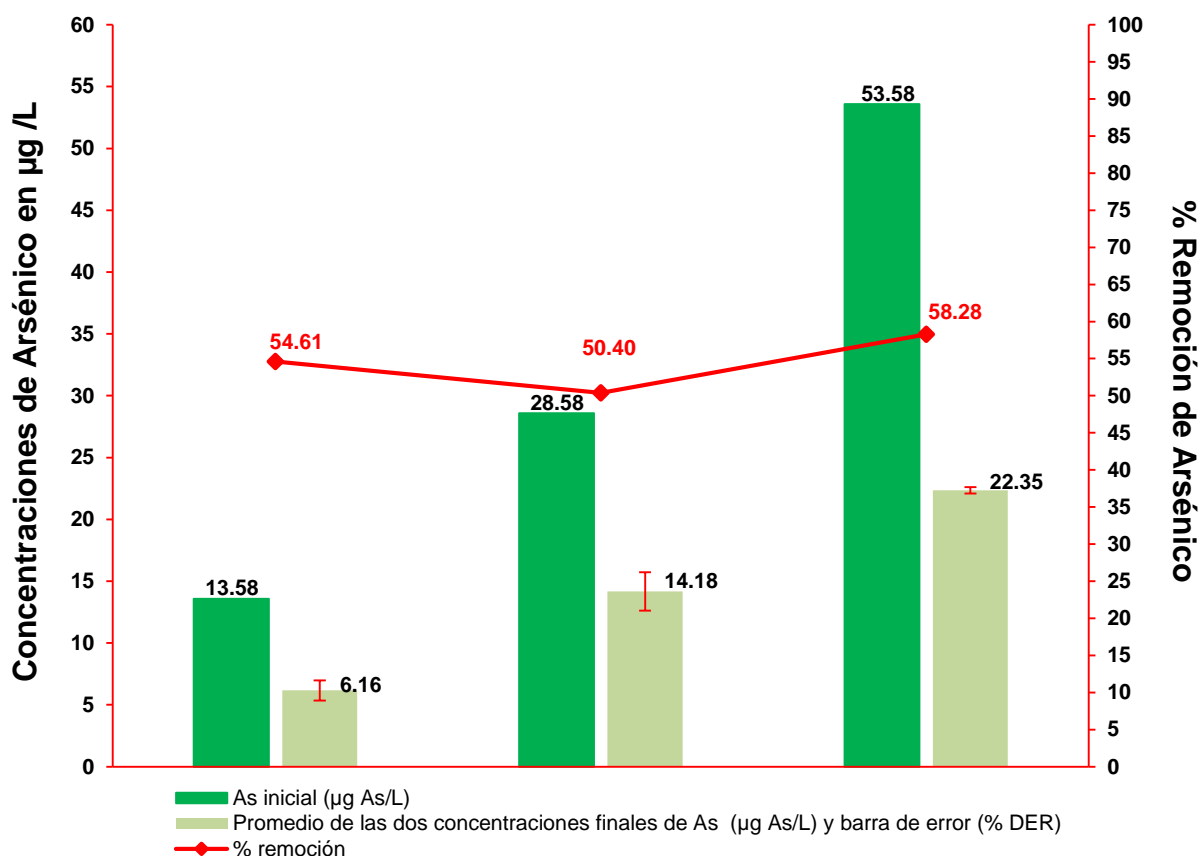


Gráfico 5. Concentraciones finales de As luego de someterse a filtración lenta por óxidos de hierro y luego expuestas durante 6 h de contacto carbón activado con tamaño de 0,6 mm

En este tratamiento secuencial con óxidos de hierro y carbón activado, se dio la mayor remoción de arsénico para la concentración de 53,58 µg As/L con un 58,29% (Tabla 19). Lo que ocurre es una reacción de acomplejamiento superficial entre los óxidos de hierro y el arsénico formando un flóculo, seguido por la adsorción de estos flóculos



(Amirtharajah y O'Melia, 1990), donde estas partículas de hierro cargadas con arsénico se quedan retenidas en el carbón activado producido artesanalmente ( Ngai, Dangol, Murcott, y Shrestha, 2005).

La mayor remoción de arsénico obtenida aplicando óxidos de hierro se debe a que como se mencionó anteriormente se forma un flóculo, por tanto como indica (Ures Rodríguez, Suárez López, y Jácome Burgos, 2015) las moléculas con mayor tamaño son adsorbidas sobre carbón activado mejor que las moléculas de menor tamaño.

## Capítulo V

## 5.1 Conclusiones

El mayor porcentaje de remoción de arsénico se obtuvo con el tratamiento secuencial con óxidos de hierro y carbón activado artesanalmente a base de cascara de jícara (*Crescentia alata*) (0,6 mm) y a 6 horas de contacto, superando el 50 %.

No existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos durante los tiempos de contactos y tamaños de carbón activado, siendo el tamaño de 0,6 mm y el tiempo de 6 h los que mostraron mejor porcentaje de remoción de arsénico.

La hipótesis planteada en esta investigación se rechaza parcialmente, porque los porcentajes de remoción con carbón activado fueron relativamente bajos, mientras que con óxidos de hierro y carbón activado la remoción fue mayor del 50 %.

## 5.2 Recomendaciones

- ✓ Para futuras investigaciones aumentar la cantidad de clavos oxidados durante el proceso de adsorción que permita obtener un mayor porcentaje de remoción de arsénico.
- ✓ Usar carbón activado con un diámetro menor de 0,6 mm, que permita obtener mayor área de contacto.
- ✓ A los integrantes de ADECAB realizar un estudio de mercado para identificar otros usos de este carbón, incrementando su valor agregado y sus ingresos económicos.

### 5.3 Referencias

- AMEC. (04 de Mayo de 2015). *Componentes del filtro para la remoción de Arsénico*. AMEC, Managua, Nicaragua.
- Amirtharajah, A y O'Melia, C. (1990). *Coagulation processes: Destabilization, mixing and flocculation* (4th ed.). (F. W. Pontius, Ed.) Nueva York, N.Y., EE.UU: McGraw-Hill.
- Ardon, A. E. (2008). Propuesta De Una Técnica De Fortificación Con Hierro Para La Horchata De Morro. *Universidad de el Salvador Facultad de Química y Farmacia*.
- Altamirano, M. (Julio de 2005). Distribución de la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la subcuenta suroeste del Valle de Sébaco, Matagalpa-Nicaragua. Obtenido de <http://repositorio.unan.edu.ni/2378/1/744.pdf>
- Bendaña, G. (2012). Agua agricultura y seguridad alimentaria en las zonas secas de Nicaragua. Managua, Nicaragua. Obtenido de <http://www.fao.org/agua/agricultura/y/san/en/las/zonas/secas>
- CEFIC. (1986). Testmethoden für Aktivkohlen / European Council of Chemical Manufacturers Federation. 46.
- DeMarco, M. J., SenGruta, A. K., John, E y Greenleaf, J. E. (2003). Arsenic removal using a polymeric/inorganic hibrid sorbent. *Water Research* 37,. 164-176.
- Edwards, M. (1994). Chemistry of arsenic removal during coagulation and Fe-Mn oxidation. *J. Am. Water Works Assoc*(86).
- Esparza, M. C. (2006). Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *International Congress: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. Mexico.
- Ferreccio, C., González, C., Milosavjlevic, V., Marshall, G., Sacha, A. M y Smith, A. H. (2000). Lung cancer and arsenic concentrations in drinking water in Chile. *Epidemiology*. 11(6). 676-679.
- Glibota A, G. S. (2005). Absorción de arsénico en filtros de carbón activado comerciales (análisis y comparación de resultados). *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE comunicaciones científicas y tecnológicas*.

- Gómez, A;. (2002). Monitoreo y atención de intoxicados con Arsénico en El Zapote-San Isidro Matagalpa. Nicaragua. (*Estudio realizado con apoyo financiero de UNICEF por MINSA*) .
- Gregg, S. J y Sing , S. W. (1982). Adsorption, Surface Area and Porosity. *London Academic Press*.
- Han, B., Runnells, T y Wickramasinghe, R. (2002). Arsenic removal from drinking water by flocculation and microfiltration, *Desalination* 145. 293-298.
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Baptista Lucio, Pilar;. (2006). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill.
- Hughes, M. F. (2002). *Arsenic toxicity and potencial mechanisms of action*. *Toxicology letters*. 133,, 1 - 16.
- IUPAC. (2009). IUPAC Compendium of Chemical Terminology - The Gold book. *International Union of Pure And Applied Chemistry*.
- Jain, C. K y Ali, L. (2000). *Arsenic: occurrence toxicity and speciation techniques*.
- Jüntgen, H. (1999). *Physikalisch - chemische und Verfahrenstechnische Grundlagen von Adsorptionsverfahren / Bergbau-Forschung*.
- Kapaj, S., Peterson, H., Liber, K y Bhattacharya, P. (2006). Human Health Effects from arsenic poisoning-a review. *Journal of Environmental Science and Health. Part A* 41,. 2399-2428.
- Marco Lozar , J. P., Suárez García, F., Cazorla Amorós, D y Linares Solano, A. (2005). Aumento del rendimiento del proceso de activación de precursores lignocelulósicos por modificación de la etapa de carbonización. *VII reunión del grupo español del carbón* (págs. 157-158). Granada: Universidad de Granada.
- Marengo Meneses, L. E. (Diciembre de 2006). *Caracterización del carbón activado obtenido a partir de semilla de nancite a escala de laboratorio*. Managua, Nicaragua.

- Mendieta, E. (2008). *Determinación de la capacidad de adsorción de arsénico por medio de carbón activado obtenido a partir de semillas de nancite en aguas de pozos con altos índices de arsénico*. Managua, Nicaragua: UNI.
- Mendoza, F y Picado, F. (2016). *Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado*. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN. Managua: CIRA/UNAN.
- Mohan, D y Pittman, C. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents-a critical review. *Journal of Hazardous Materials* 142. 1-53.
- Montero, V., Quesada J., Ledezma, A y Sandoval, J. A. (2010). Determinación de arsénico en abastecimientos de agua para consumo humano de la provincia de Cartago, Costa Rica.
- Moreno, J., Giraldo, L y Vargas, J. (2008). Obtención y caracterización de carbones activados a partir de semillas de mucuna sp. *Revista Colombiana de Química*, 37, 67-77.
- Mora, M. (Diciembre de 2010). Remoción de colorantes de disoluciones acuosas por adsorción mediante el uso de carbón activado producidos a partir de leña de mezquite. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/2200/1/1080224645.pdf>
- Narváez, D. (Septiembre de 2009). Estudio para evaluar la zeolita sintetizada a partir de residuos de carbón, en la remoción de arsénico en agua para consumo humano. Obtenido de:  
  
[http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/6154/1478\\_tesis\\_Febrero\\_2010\\_1811001017.pdf?sequence=1](http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/6154/1478_tesis_Febrero_2010_1811001017.pdf?sequence=1)
- Navarrete, D., Quijano, N y Vélez, C. (2014). Elaboración de carbón activado a partir de materiales no convencionales, para ser usado como medio filtrante. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/29845/D-70080.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ngai, T. K., Dangol, B., Murcott, S. E y Shrestha, R. R. (2005). Kanchan™ Arsenic Filter. Massachusetts Institute of Technology (MIT) and Environment and Public Health Organization (ENPHO). Kathmandu, Nepal.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable .
- Paredes, J. (2012). Google.com. Obtenido de Remoción de arsénico del agua para: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5084/Tesis.pdf?sequence=1>
- Rincón , S. (2005). Adsorption and Reduction uon Stickstoffmonoxid an Aktiukohle. *Kassel, Universität Kassel.*
- Rivera, M y Piña, M. (s.f.). Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada. Obtenido de <http://www.zeocat.es/docs/aguaarsenico2.pdf>
- Rocha, C. E. (2000). *PRINCIPIOS BÁSICOS DE ESPECTROSCOPÍA*. México: UACH.
- SMWW. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Public Healh Association (APHA), 21 .*
- Suzuki , R., Andrade , J., Sousa, J y Rollemberg, M. (2000). Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresource Technology.*
- UNICEF. (2004). “CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE CINCO ZONAS CONTAMINADAS NATURALMENTE POR ARSÉNICO EN NICARAGUA”. *Fondos de las Naciones Unidas para la Infancia.*
- Universidad Politecnica de Sevilla. (2002). *MANUAL DEL CARBON ACTIVO*. Recuperado el 2016, de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Ures Rodríguez, P., Suárez López, J y Jácome Burgos, A. (mayo de 2015). ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVO (FT-TER-002). *INDITEX.*
- USEPA. (2007). Treatment Technologies for Arsenic Removal.



## 5.4 Anexos

### 5.4.1 Figuras generales



*Figura 18.* Acopio de cáscara de jícaro

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 19.* Clasificación de la cáscara de jícaro

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 20.* Carbonización de la cáscara de jícara

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 21.* Enfriado de la cáscara carbonizada

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 22.* Mezcla con la solución Activante

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 23.* Activación a 600 °C

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 24.* Enfriado del carbón activado

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.



*Figura 25.* Embalaje del carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara

Fuente: Guía para la Obtención Artesanal de Carbón Activado. Asociación para el Desarrollo del Campesino y Artesano El Bonete (ADECAB). CIRA - UNAN.

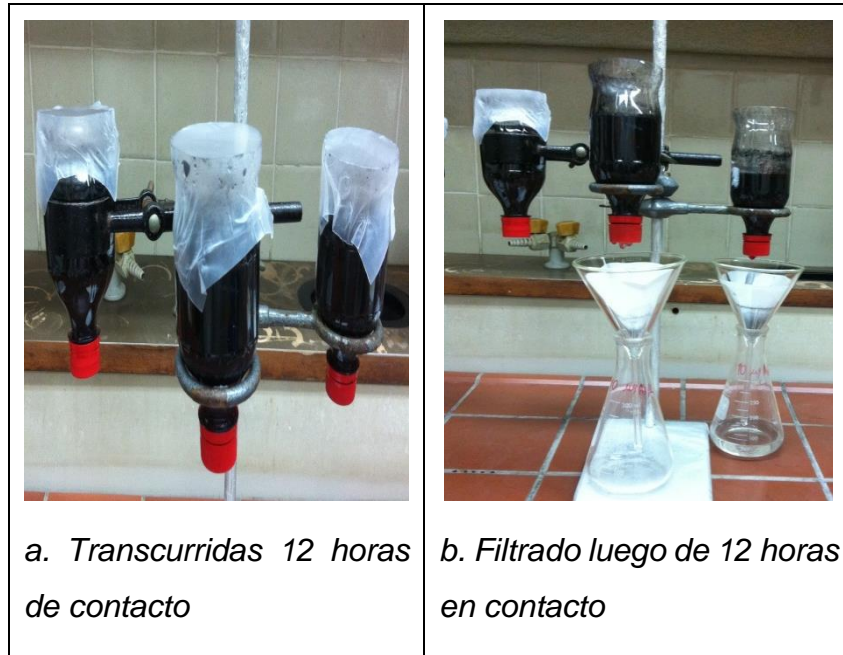


Figura 26. Remoción de Arsénico por medio de carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara

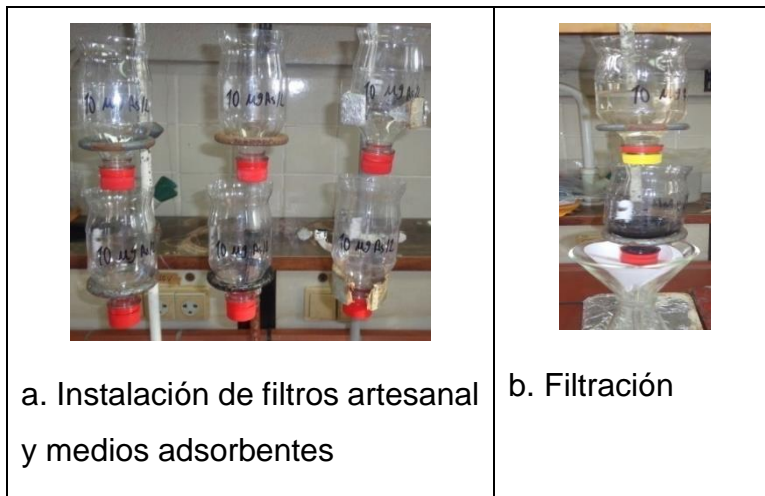


Figura 27. Remoción de arsénico por medio de óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente por ADECAB

Valoración de la eficiencia del carbón activado y óxidos de hierro para la remoción de arsénico en agua  
CIRA/UNAN – Managua, 2016

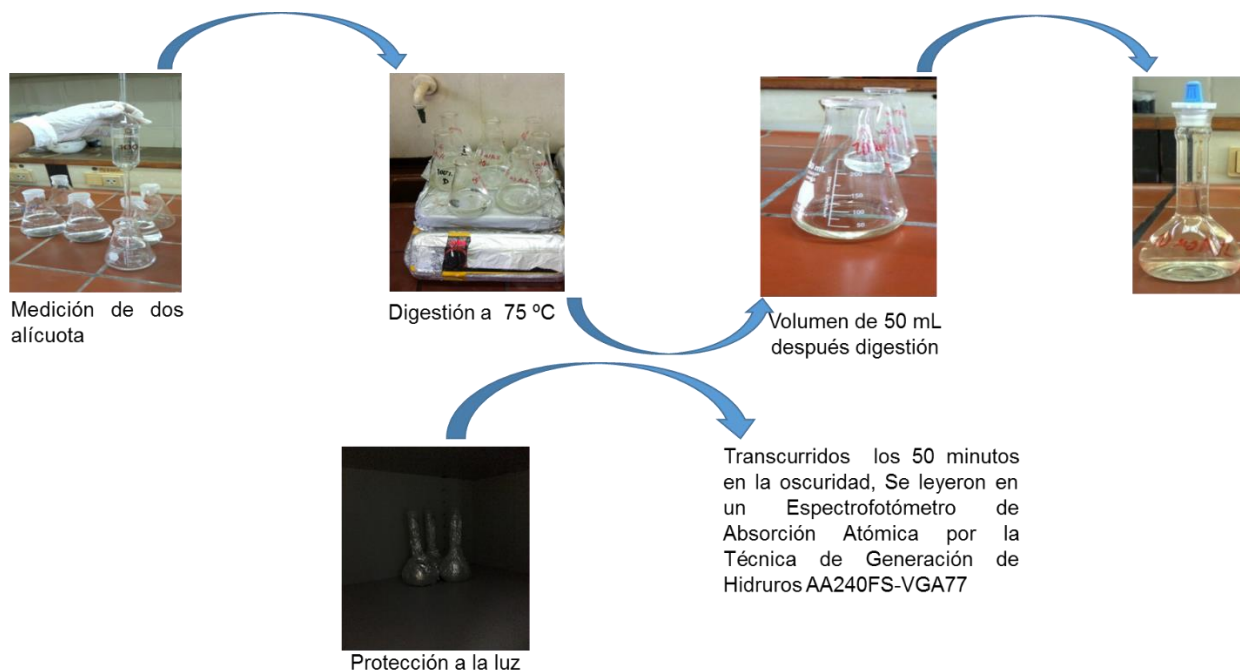


Figura 28. Determinación de Arsénico total en agua

#### 5.4.2 Tablas de los resultados generales

Tabla 3. Volúmenes iniciales que se tomaron para la preparación de soluciones intermedias

$C_i$ ( $\mu\text{g As/L}$ )	$C_f$ ( $\mu\text{g As/L}$ )	$V_f$ (mL)	$V_i$ (mL)
1 000 000	10 000	250	2,5
10 000	1 000	200	20

Tabla 4. Volúmenes iniciales que se tomaron para preparar las soluciones de trabajo

$C_i$ ( $\mu\text{g As/L}$ )	$C_f$ ( $\mu\text{g As/L}$ )	$V_f$ (mL)	$V_i$ (mL)
1 000	10	1 000	10
1 000	25	1 000	25
1 000	50	1 000	50

Tabla 5. Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 2 – 4 mm

[ ] inicial $\mu\text{g As/L}$	[ ] final $\mu\text{g As/L}$
10,00	9,78
10,00	9,69
25,00	23,63
25,00	23,74
50,00	49,67
50,00	49,86

*Tabla 6.* Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 2 – 4 mm

[ ] inicial $\mu\text{g As/L}$	[ ] final $\mu\text{g As/L}$
10,00	9,50
10,00	9,40
25,00	23,51
25,00	23,35
50,00	49,70
50,00	49,60

*Tabla 7.* Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 2 – 4 mm

[ ] final $\mu\text{g As/L}$	Desviación estándar (S)	Desviación estándar relativa (%DER)
9,74	0,04	0,41
23,69	0,05	0,21
49,77	0,09	0,18

*Tabla 8.* Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 2 – 4 mm

[ ] final $\mu\text{g As/L}$	Desviación estándar (S)	Desviación estándar relativa (%DER)
9,45	0,05	0,53
23,43	0,08	0,34
49,65	0,05	0,10



*Tabla 9.* Resultados de la remoción de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 2 – 4 mm

[ ] final µg As/L	Remoción de µg As/L	Remoción de As (%)
9,74	0,26	2,60
23,69	1,31	5,24
49,77	0,23	0,46

*Tabla 10.* Resultados de la remoción de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con por medio de carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 2 - 4mm

[ ] final µg As/L	Remoción de µg As/L	Remoción de As (%)
9,45	0,55	5,50
23,43	1,57	6,28
49,65	0,35	0,70

*Tabla 11.* Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm

[ ] inicial µg As/L	[ ] final µg As/L
10,00	9,54
10,00	9,33
25,00	23,19
25,00	23,11
50,00	42,77
50,00	42,91

*Tabla 12.* Resultados de las concentraciones finales de arsénico por duplicado transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm

[ ] inicial µg As/L	[ ] final µg As/L
10,00	9,23
10,00	9,41
25,00	22,43
25,00	22,75
50,00	42,56
50,00	42,48

*Tabla 13.* Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm

[ ] final µg As/L	Desviación estándar	Desviación estándar relativa (%DER)
9,44	0,105	1,11
23,15	0,04	0,17
42,84	0,07	0,16

*Tabla 14.* Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6

[ ] final µg As/L	Desviación estándar	Desviación estándar relativa (%DER)
9,32	0,09	0,97
22,59	0,16	0,71
42,52	0,04	0,09

**Tabla 15.** Resultados de la remoción de Arsénico por medio de carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm y 6 horas de contacto

[ ] inicial µg As/L	[ ] final µg As/L	Remoción de µg As/L	Remoción de As (%)
10,00	9,44	0,56	5,60
25,00	23,15	1,85	7,40
50,00	42,84	7,16	14,32

**Tabla 16.** Resultados de la remoción de arsénico por medio de carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm y 12 horas de contacto

[ ] inicial µg As/L	[ ] Final µg As/L	Remoción de µg As/L	Remoción de As (%)
10,00	9,32	0,68	6,80
25,00	22,59	2,41	9,64
50,00	42,52	7,48	14,96

**Tabla 17.** Resultados de las concentraciones finales de arsénico por triplicado transcurridas 6 horas de contacto con óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm

Tiempo de contacto: 6 h	
[ ] inicial µg As/L	[ ] final µg As/L
13,58	6,13
13,58	6,22
13,58	6,14
28,58	13,98
28,58	14,13
28,58	14,42
53,58	22,30
53,58	22,34
53,58	22,42

*Tabla 18.* Promedios y desviaciones estándar de los resultados de concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con óxidos de hierro y carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con un tamaño de 0,6 mm

<b>Tiempo de contacto de 6 h</b>		
<b>[ ] final <math>\mu\text{g As/L}</math></b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Desviación estándar relativa (%DER )</b>
6,16	0,05	0,81
14,18	0,22	1,55
22,35	0,06	0,27

*Tabla 19.* Resultados de remoción de arsénico por medio de óxidos de hierro y carbón activado producido a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) con tamaño de 0,6 mm y 6 horas de contacto

<b>[ ] inicial <math>\mu\text{g As/L}</math></b>	<b>[ ] final <math>\mu\text{g As/L}</math></b>	<b>Remoción de <math>\mu\text{g As/L}</math></b>	<b>Remoción de As (%)</b>
13,58	6,16	7,42	54,64
28,58	14,18	14,4	50,38
53,58	22,35	31,23	58,29

Tabla 20. Valores Críticos de *t*-Test Student

Valores críticos de *F* para un contraste de dos colas ( $P = 0.05$ ).

$\nu_2$	$\nu_1$												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
1	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	956.7	963.3	968.6	976.7	984.9	993.1
2	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.39	39.40	39.41	39.43	39.45
3	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17
4	12.22	10.65	9.979	9.605	9.364	9.197	9.074	8.980	8.905	8.844	8.751	8.657	8.560
5	10.01	8.434	7.764	7.388	7.146	6.978	6.853	6.757	6.681	6.619	6.525	6.428	6.329
6	8.813	7.260	6.599	6.227	5.988	5.820	5.695	5.600	5.523	5.461	5.366	5.269	5.168
7	8.073	6.542	5.890	5.523	5.285	5.119	4.995	4.899	4.823	4.761	4.666	4.568	4.467
8	7.571	6.059	5.416	5.053	4.817	4.652	4.529	4.433	4.357	4.295	4.200	4.101	3.999
9	7.209	5.715	5.078	4.718	4.484	4.320	4.197	4.102	4.026	3.964	3.868	3.769	3.667
10	6.937	5.456	4.826	4.468	4.236	4.072	3.950	3.855	3.779	3.717	3.621	3.522	3.419
11	6.724	5.256	4.630	4.275	4.044	3.881	3.759	3.664	3.588	3.526	3.430	3.330	3.226
12	6.554	5.096	4.474	4.121	3.891	3.728	3.607	3.512	3.436	3.374	3.277	3.177	3.073
13	6.414	4.965	4.347	3.996	3.767	3.604	3.483	3.388	3.312	3.250	3.153	3.053	2.948
14	6.298	4.857	4.242	3.892	3.663	3.501	3.380	3.285	3.209	3.147	3.050	2.949	2.844
15	6.200	4.765	4.153	3.804	3.576	3.415	3.293	3.199	3.123	3.060	2.963	2.862	2.756
16	6.115	4.687	4.077	3.729	3.502	3.341	3.219	3.125	3.049	2.986	2.889	2.788	2.681
17	6.042	4.619	4.011	3.665	3.438	3.277	3.156	3.061	2.985	2.922	2.825	2.723	2.616
18	5.978	4.560	3.954	3.608	3.382	3.221	3.100	3.005	2.929	2.866	2.769	2.667	2.559
19	5.922	4.508	3.903	3.559	3.333	3.172	3.051	2.956	2.880	2.817	2.720	2.617	2.509
20	5.871	4.461	3.859	3.515	3.289	3.128	3.007	2.913	2.837	2.774	2.676	2.573	2.464

$\nu_1$  = número de grados de libertad del numerador y  $\nu_2$  = número de grados de libertad del denominador.

Tomado de Miller J. N. Y Miller J. C. (2002). "Estadística y Quimiometría para química analítica". Pearson Educación, S.A. Cuarta edición.

### 5.4.3 Cálculos

Preparación de solución patrón, intermedias y soluciones de trabajo.

#### 5.4.3.1 Cálculo de la preparación de solución patrón de arsénico

La solución patrón de arsénico se preparó a una concentración de 1 000 000  $\mu\text{g As/L}$ , se midió aproximadamente 100 mL de agua desionizada y transfirió cuidadosamente el contenido de una ampolleta de Titrisol de arsénico, (para Espectroscopia de Absorción atómica) y se diluyó 1 000 mL con agua desionizada. Esta solución se prepara una vez al año y se mantiene bajo refrigeración.

#### 5.4.3.2 Cálculo para preparar solución intermedia de 10 000 $\mu\text{g As/L}$ de arsénico

Se preparó a partir de la solución patrón de 1 000 000  $\mu\text{g/L}$  de arsénico, se midió 2,5 mL de la solución patrón y se enrasó con agua desionizada a un volumen de 250 mL. El volumen tomado de la solución patrón de 1 000 000  $\mu\text{g/L}$  de arsénico se calcula a continuación:

$$C_i = 1\,000\,000 \mu\text{g As /L} \qquad C_i \times V_i = C_f \times V_f \qquad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

$$C_f = 10\,000 \mu\text{g As /L} \qquad V_i = \frac{10\,000 \mu\text{g As/L} \times 250 \text{ mL}}{1\,000\,000 \mu\text{g As/L}} = 2,5 \text{ mL}$$

$$V_i = ?$$

$$V_f = 250 \text{ mL}$$

#### 5.4.3.3 Cálculo para preparar solución intermedia de 1 000 $\mu\text{g As/L}$

Se preparó a partir de la solución intermedia de 10 000  $\mu\text{g As/L}$ , se midió 20 mL de la solución intermedia y se enrasó con agua desionizada a un volumen de 200 mL. El volumen tomado de la solución intermedia de 10 000  $\mu\text{g As/L}$  se calcula a continuación:

$$C_i = 10\,000 \mu\text{g As /L} \qquad C_i \times V_i = C_f \times V_f \qquad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

$$C_f = 1\,000 \mu\text{g As /L} \qquad V_i = \frac{1\,000 \mu\text{g As/L} \times 200 \text{ mL}}{10\,000 \mu\text{g As/L}} = 20 \text{ mL}$$

$$V_i = ?$$

$$V_f = 200 \text{ mL}$$

#### 5.4.3.4 Cálculo para preparar solución de trabajo de 10 µg As/L

Se preparó a partir de la solución de 1 000 µg As/L, se midió 10 mL de la solución intermedia de 1000 µg As/L y se enrasó con agua desionizada a un volumen de 1 000 mL. El volumen tomado de la solución de 1 000 µg As/L se calcula a continuación:

$$C_1 = 1\,000\ \mu\text{g As/L} \quad C_i \times V_i = C_f \times V_f \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

$$C_f = 10\ \mu\text{g As /L} \quad V_i = \frac{10\ \mu\text{g As/L} \times 1\,000\ \text{mL}}{1\,000\ \mu\text{g As/L}} = 10\ \text{mL}$$

$$V_i = ?$$

$$V_f = 1\,000\ \text{mL}$$

#### 5.4.3.5 Cálculo para preparar solución de trabajo de 25 µg As/L

Se preparó a partir de la solución de 1 000 µg As/L, se midió 25,0 mL de la solución intermedia de 1000 µg As/L y se enrasó con agua desionizada a un volumen de 1 000 mL. El volumen tomado de la solución de 1 000 µg As/L se calcula a continuación:

$$C_1 = 1\,000\ \mu\text{g As /L} \quad C_i \times V_i = C_f \times V_f \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

$$C_f = 25\ \mu\text{g As /L} \quad V_i = \frac{25\ \mu\text{g As/L} \times 1\,000\ \text{mL}}{1\,000\ \mu\text{g As/L}} = 25\ \text{mL}$$

$$V_i = ?$$

$$V_f = 1\,000\ \text{mL}$$

#### 5.4.3.6 Cálculo para preparar solución de trabajo de 50 µg As/L

Se preparó a partir de la solución de 1 000 µg As/L, se midió 50 mL de la solución intermedia de 1000 µg As/L y se enrasó con agua desionizada a un volumen de 1 000 mL. El volumen tomado de la solución de 1 000 µg As/L se calcula a continuación:

$$C_1 = 1\,000\ \mu\text{g As /L} \quad C_i \times V_i = C_f \times V_f \quad \text{Ecuación N}^\circ 1$$

$$C_f = 50\ \mu\text{g As /L} \quad V_i = \frac{50\ \mu\text{g As/L} \times 1\,000\ \text{mL}}{1\,000\ \mu\text{g As/L}} = 50\ \text{mL}$$

$$V_i = ?$$

$$V_f = 1\,000\ \text{mL}$$

#### 5.4.3.7 Cálculo del porcentaje de Remoción de arsénico

El porcentaje de remoción se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \% \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

##### 5.4.3.7.1 Cálculo del porcentaje de remoción de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (2 – 4 mm)

- 10,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{10,00 \mu\text{g As/L} - 9,74 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{0,26 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,026 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 2,60 \%$$

- 25,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{25,00 \mu\text{g As/L} - 23,69 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{1,31 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,0524 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 5,24 \%$$



- 50,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{50,00 \mu\text{g As/L} - 49,77 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{0,23 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,0046 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,46 \%$$

**5.4.3.7.2 Cálculo del porcentaje de remoción de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de júcaro (*Crescentia alata*) (2 – 4 mm)**

- 10,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{10,00 \mu\text{g As/L} - 9,45 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{0,55 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,055 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 5,50 \%$$

- 25,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{25,00 \mu\text{g As/L} - 23,43 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{1,57 \mu\text{g As/L}}{25 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,0628 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 6,28 \%$$

- 50,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{50,00 \mu\text{g As/L} - 49,65 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{0,35 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,007 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,70 \%$$

**5.4.3.7.3 Cálculo del porcentaje de remoción de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (0,6 mm) transcurridas 6 horas de contacto**

- 10,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{10,00 \mu\text{g As/L} - 9,44 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{0,56 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,056 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 5,60 \%$$

- 25,00  $\mu\text{g As/L}$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{25,00 \mu\text{g As/L} - 23,15 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{1,85 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,074 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 7,40 \%$$

- 50,00  $\mu\text{g As/L}$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{50,00 \mu\text{g As/L} - 42,84 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{7,16 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,1432 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 14,32 \%$$

**5.4.3.7.4 Cálculo del porcentaje de remoción de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de júcaro (*Crescentia alata*) (0,6 mm) transcurridas 12 horas de contacto**

- 10,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{10,00 \mu\text{g As/L} - 9,32 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{0,68 \mu\text{g As/L}}{10,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,068 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 6,80 \%$$

- 25,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{25,00 \mu\text{g As/L} - 22,59 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{2,41 \mu\text{g As/L}}{25,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,0964 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 9,64 \%$$

- 50,00 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{50,00 \mu\text{g As/L} - 42,52 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{7,48 \mu\text{g As/L}}{50,00 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,1496 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 14,96 \%$$

**5.4.3.7.5 Cálculo del porcentaje de remoción de Arsénico transcurridas 6 horas de contacto primeramente por óxidos de hierro y seguidamente por carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (0,6 mm)**

- 13,58  $\mu\text{g As/L}$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{13,58 \mu\text{g As/L} - 6,16 \mu\text{g As/L}}{13,58 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{7,42 \mu\text{g As/L}}{13,58 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,5464 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 54,64 \%$$

- 28,58  $\mu\text{g As/L}$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{28,58 \mu\text{g As/L} - 14,18 \mu\text{g As/L}}{28,58 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{14,40 \mu\text{g As/L}}{28,58 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,5038 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 50,38 \%$$

- 53,58 µg As/L

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{53,58 \mu\text{g As/L} - 22,35 \mu\text{g As/L}}{53,58 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{31,23 \mu\text{g As/L}}{53,58 \mu\text{g As/L}} \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 0,5829 \times 100 \%$$

$$\% \text{ de Remoción} = 58,29 \%$$

#### 5.4.3.8 Calculo de las desviaciones estándares

##### 5.4.3.8.1 Cálculo de las desviaciones estándar de las concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (2 – 4 mm)

Se aplicó la ecuación numero 3:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación N° 3}$$

- 10 µg As/L

$$S = \sqrt{\frac{(9,78-9,74)^2 + (9,69-9,74)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-3} + 2,5 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{4,1 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = 0,06$$

- **25 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(23,63-23,69)^2 + (23,74-23,69)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{3,6 \times 10^{-3} + 2,5 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{6,1 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = 0,08$$

- **50 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(49,67-49,77)^2 + (49,86-49,77)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,01 + 8,1 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,0181}{1}}$$

$$S = 0,13$$

**5.4.3.8.2 Cálculo de las desviaciones estándar de las concentraciones finales de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (2 – 4 mm)**

- **10 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(9,50-9,45)^2 + (9,40-9,45)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{2,5 \times 10^{-3} + 2,5 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{5 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = 0,07$$

- **25 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(23,51-23,43)^2 + (23,35-23,43)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{6,4 \times 10^{-3} + 6,4 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,0128}{1}}$$

$$S = 0,11$$

- **50 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(49,70-49,65)^2 + (49,60-49,65)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{2,5 \times 10^{-3} + 2,5 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{5 \times 10^{-3}}{1}} \quad S = 0,07$$

**5.4.3.8.3 Cálculo de las desviaciones estándar de las concentraciones finales de arsénico transcurridas 6 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (*Crescentia alata*) (0,6 mm)**

- **10 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(9,54-9,44)^2 + (9,33-9,44)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,01 + 0,0121}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,0221}{1}}$$

$$S = 0,15$$



- **25 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(23,19-23,15)^2 + (23,11-23,15)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-3} + 1,6 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{3,2 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = 0,06$$

- **50 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(42,77-42,84)^2 + (42,91-42,84)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{4,9 \times 10^{-3} + 4,9 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{9,8 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = 0,10$$

**5.4.3.8.4 Cálculo de las desviaciones estándar de las concentraciones finales de arsénico transcurridas 12 horas de contacto con carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (0,6 mm)**

- **10 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(9,23-9,32)^2 + (9,41-9,32)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{8,1 \times 10^{-3} + 8,1 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,0162}{1}} \quad S = 0,13$$

- **25 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(22,43-22,59)^2 + (22,75-22,59)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,0256 + 0,0256}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,0512}{1}}$$

$$S = 0,23$$

- **50 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(42,56-42,52)^2 + (42,48-42,52)^2}{2-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-3} + 1,6 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{3,2 \times 10^{-3}}{1}}$$

$$S = 0,06$$

**5.4.3.8.5 Cálculo de las desviaciones estándares de las concentraciones finales de Arsénico transcurridas 6 horas de contacto primeramente por óxidos de hierro y seguidamente por carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara (0,6 mm)**

- **13,58 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(6,13-6,16)^2 + (6,22-6,16)^2 + (6,14-6,16)^2}{3-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{4,9 \times 10^{-3}}{2}}$$

$$S = \sqrt{2,45 \times 10^{-3}} \quad S = 0,05$$

- **28,58 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(13,98-14,18)^2 + (14,13-14,18)^2 + (14,42-14,18)^2}{3-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0,1001}{2}}$$

$$S = \sqrt{50,05 \times 10^{-3}}$$

$$S = 0,22$$

- **53,58 µg As/L**

$$S = \sqrt{\frac{(22,3-22,35)^2 + (22,34-22,35)^2 + (22,42-22,35)^2}{3-1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{7,5 \times 10^{-3}}{2}}$$

$$S = \sqrt{3,75 \times 10^{-3}}$$

$$S = 0,06$$

### 5.4.3.9 Control de Calidad

#### 5.4.3.9.1 Análisis por Duplicados

Todas las muestras se realizaron por duplicado, se calculó el promedio sumando la concentración una más la concentración dos y se dividió entre dos.

$$C_{As} = \left[ \frac{[As]_{M_1} + [As]_{M_2}}{2} \right] \text{Ecuación N}^\circ 3$$

#### 5.4.3.9.2 Porcentaje de Recobro (% R)

Teniendo el resultado de la concentración de la muestra CM – 442 + 5,00 µg As/L y el resultado de la concentración de la muestra CM – 442 se procedió a aplicar la ecuación N° 4.

$$\% R = [(C_F - C_U) / C_A] \times 100 \quad \text{Ecuación N}^\circ 4$$

$$\begin{aligned} \text{CM} - 442 \quad [ ] \text{ As} &= (7,7581 \mu\text{g As/L} + 7,9432 \mu\text{g As/L}) / 2 = \\ &= 7,85 \mu\text{g As/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rec} - \text{CM} - 442 (5,00) \quad [ ] \text{ As} &= (12,4618 \mu\text{g As/L} + 12,6008 \mu\text{g As/L}) / 2 = \\ &= 12,53 \mu\text{g As/L} \end{aligned}$$

$$\% \text{ Rec} = \left[ \frac{(12,53 \mu\text{g As/L} - 7,85 \mu\text{g As/L})}{5,00 \mu\text{g As/L}} \right] \times 100$$

$$\% \text{ Rec} = 93,60 \%$$

El rango establecido del recobro es de 80 – 120 %, el resultado del recobro que se analizó en el lote de las muestras dio de 93,60 %, el cual se utilizó para verificar que no ocurre ningún efecto de la matriz (Agua) y que durante el proceso del análisis no ocurre pérdida del analito.

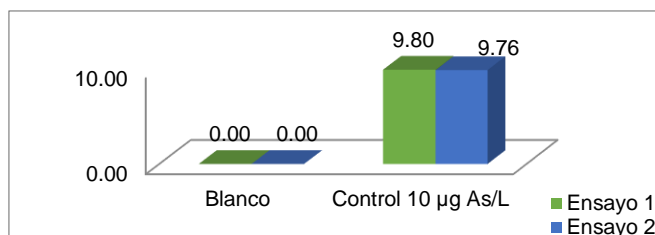


Gráfico 6. Resultados de Blancos y control de 10 µg As/ L

#### 5.4.4 Análisis estadísticos de los resultados

##### 5.4.4.1 Análisis de ANOVA de dos factores utilizando los datos por duplicado de las concentraciones de remoción de arsénico por medio de carbón activado con tamaño de 2 – 4 mm

Con un nivel de significancia de 0,05 se probó la hipótesis de que: Los tiempos de contactos de 6 y 12 horas no tienen efecto en la remoción de arsénico mediante carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara con tamaño de 2-4 mm.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_i = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Tabla 21. Datos de concentraciones de Remoción de arsénico

Tiempo de contactos	Remoción de arsénico ( $\mu\text{g As/L}$ )		
	10,00	25,00	50,00
6 h	0,22	1,37	0,33
	0,31	1,26	0,14
12 h	0,50	1,49	0,30
	0,60	1,65	0,40

Tabla 22. Sumatorias de Cuadrados

Tiempo de contacto	Remoción de arsénico ( $\mu\text{g As/L}$ )			Ti	Ti <sup>2</sup>
	10,00	25,00	50,00		
6 h	0,22	1,37	0,33	3,63	13,1769
	0,31	1,26	0,14		
12 h	0,50	1,49	0,30	4,94	24,4036
	0,60	1,65	0,40		
T.j	1,63	5,77	1,17	8,57	
T.j <sup>2</sup>	2,6569	33,2929	1,3689		

Donde:

T = Total global

Ti = Total por fila

T.j = Total por columnas

$$T = 8,57$$

$$\Sigma Ti.^2 = 37,5805$$

$$\Sigma T.j^2 = 37,3187$$

- **Término de corrección**

$$C = \frac{T^2}{nrc}$$

Donde:

T = Total global

n: Número de medidas repetidas en cada celda

r: Número de filas

c: Número de columnas

$$C = \frac{8,57^2}{2(2 \times 3)}$$

$$C = \frac{73,4449}{12}$$

$$C = 6,1204$$

- **SS entre Filas**

$$SS \text{ entre filas} = \frac{\Sigma Ti.^2}{n c} - C$$

Donde:

SS entre Filas: Suma de cuadrados entre filas

$\Sigma Ti.^2$ : Total por fila al cuadrado

n: Número de medidas repetidas en cada celda

c: Número de columnas

C: Término de corrección

$$SS \text{ entre filas} = \frac{37,5805}{2 (3)} - 6,1204 = 0,1430$$

$$g.l = r-1$$

$$g.l = 2-1 = 1$$

- **SS entre columnas**

$$SS_{\text{entre columnas}} = \frac{\sum T.j^2}{nr} - C$$

Donde:

SS entre columnas: Suma de cuadrados entre columnas

$\sum T_i.2$ : Total por fila al cuadrado

$n$ : Número de medidas repetidas en cada celda

$r$ : Número de filas

$C$ : Termino de corrección

$$SS_{\text{entre columnas}} = \frac{37,3187}{2 (2)} - 6,1204 = 3,2092$$

$$SSC = 55,916$$

$$g.l = c-1$$

$$g.l = 3-1$$

$$g.l = 2$$

- **SS TOTAL**

$$SS_{\text{total}} = \sum X^2_{ijk} - C$$

Donde:

SS TOTAL: Suma de cuadrados total

$\sum X^2_{ijk}$ : Suma de los cuadrados de las medidas individuales de la tabla N° 5

$C$ : Termino de corrección

$$\sum X^2_{ijk} = (0,22)^2 + (0,31)^2 + (1,37)^2 + (1,26)^2 \dots + (0,40)^2 = 9,5401$$

$$SS_{total} = 9,5401 - 6,1204 = 3,4197$$

$$g.l = (n * c * r) - 1$$

$$g.l = (2 * 3 * 2) - 1$$

$$g.l = 12 - 1 = 11$$

- **SS residual**

$$SS_{residual} = \sum X^2_{ijk} - \frac{\sum T_{ij}^2}{n}$$

Donde

SS residual: Variación debido al error aleatorio

$\sum X^2_{ijk}$ : Suma de los cuadrados de las medidas individuales de la tabla N° 5

$\sum T_{ij}^2$ : Sumatoria de las medidas replicadas y al cuadrado

$n$ : Número de medidas repetidas en cada celda

$$\sum T_{ij}^2 = [(0,53)^2 + (2,63)^2 + (0,47)^2 + \dots + (0,7)^2]$$

$$\sum T_{ij}^2 = 18,9783$$

$$SS_{residual} = 9,5401 - \frac{18,9783}{2}$$

$$SS_{residual} = 9,5401 - 9,48915 = 0,0509$$

$$g.l = (n-1) * r * c$$

$$g.l = (2-1) * (2) * (3)$$

$$g.l = 6$$



Tabla 23. Resumen de ANOVA

F.V	SS	Gl	C.M.	F
E.F.	0,1430	1	0,1430	$F_{\text{cal,EF}} = \frac{0,1430}{0,0085} = 16,8410$
E. C.	3,2093	2	1,6046	$F_{\text{cal,EC}} = \frac{1,6046}{0,0085} = 188,9657$
Interacción	0,0165	2	0,0082	$F_{\text{cal,FC}} = \frac{0,0082}{0,0085} = 0,9696$
Residual	0,0509	6	0,0085	
TOTAL	3,4197	11		

$$F_{\text{cal,EF}} = \frac{0,1430}{0,0085} = 16,8410 \text{ Diferencia significativa.}$$

$$F_{\text{tab } 1,6; \infty=0,05} = 5,987$$

$$F_{\text{cal,EC}} = \frac{1,6046}{0,0085} = 188,9657 \text{ Diferencia significativa.}$$

$$F_{\text{tab } 2,6; \infty=0,05} = 5,143$$

$$F_{\text{cal,FC}} = \frac{0,0082}{0,0085} = 0,9696 \text{ No existe diferencia significativa.}$$

$$F_{\text{tab } 2,6; \infty=0,05} = 5,143$$

A continuación se puede verificar los resultados del análisis de varianza de dos factores (ANOVA) por medio de la hoja de cálculo Excel y anexo 5.4.2 tabla 19 (F tabulado).

**RESUMEN**

<b>6</b>	10	25	50	Total
Cuenta	2	2	2	6
Suma	0,5300	2,6300	0,4700	3,6300
Promedio	0,2650	1,3150	0,2350	0,6050
Varianza	0,0041	0,0060	0,0180	0,3083

**12**

Cuenta	2	2	2	6
Suma	1,1000	3,1400	0,7000	4,9400
Promedio	0,5500	1,5700	0,3500	0,8233
Varianza	0,0050	0,0128	0,0050	0,3471

**Total**

Cuenta	4	4	4
Suma	1,6300	5,7700	1,1700
Promedio	0,4075	1,4425	0,2925
Varianza	0,0301	0,0280	0,0121

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	0,1430	1	0,1430	16,8410	0,0063	5,9874
Columnas	3,2093	2	1,6046	188,9657	0,0000	5,1433
Interacción	0,0165	2	0,0082	0,9696	0,4316	5,1433
Dentro del grupo	0,0509	6	0,0085			
<b>Total</b>	<b>3,4197</b>	<b>11</b>				

Fuente: Microsoft Excel 2013

#### 5.4.4.2 Análisis de ANOVA de dos factores utilizando los datos por duplicado de los porcentajes de remoción de Arsénico por medio de carbón activado con tamaño de 0,6 mm

Con un nivel de significancia de 0,05 se probó la hipótesis de que: Los tiempos de contactos de 6 y 12 horas no tienen efecto en la remoción de Arsénico mediante carbón activado producido artesanalmente a base de cáscara de jícara con tamaño de 0,6 mm.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_i = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Tabla 24. Datos de % de Remoción de Arsénico

Tiempo de contactos	Remoción de arsénico ( $\mu\text{g As/L}$ )		
	10,00	25,00	50,00
6 h	0,46	1,81	7,23
	0,67	1,89	7,09
12 h	0,77	2,57	7,44
	0,59	2,25	7,52

Tabla 25. Sumatorias de Cuadrados

Tiempo de contacto	Remoción de arsénico ( $\mu\text{g As/L}$ )			Ti	Ti <sup>2</sup>
	10,00	25,00	50,00		
6 h	0,46	1,81	7,23	19,15	366,7225
	0,67	1,89	7,09		
12 h	0,77	2,57	7,44	21,14	446,8996
	0,59	2,25	7,52		
T.j	2,49	8,52	29,28	40,29	
T.j <sup>2</sup>	6,2001	72,5904	857,3184		

Donde:

T = Total global

Ti = Total por fila

T.j = Total por columnas

$$T = 40,29$$

$$\Sigma Ti.^2 = 813,6221$$

$$\Sigma T.j^2 = 936,1089$$

- **Término de corrección**

$$C = \frac{T^2}{nrc}$$

Donde:

T = Total global

n: Número de medidas repetidas en cada celda

r: Número de filas

c: Número de columnas

$$C = \frac{40,29^2}{2(2 \times 3)}$$

$$C = \frac{1623,2841}{12}$$

$$C = 135,2737$$

- **SS entre Filas**

$$SS_{entrefilas} = \frac{\Sigma Ti.^2}{n c} - C$$

Donde:

SS entre Filas: Suma de cuadrados entre filas

$\Sigma Ti.^2$ : Total por fila al cuadrado

n: Número de medidas repetidas en cada celda

c: Número de columnas

C: Término de corrección

$$SS_{\text{entre filas}} = \frac{813,6221}{2 (3)} - 135,2737 = 0,3300$$

$$g.l = r - 1$$

$$g.l = 2 - 1 = 1$$

- **SS entre columnas**

$$SS_{\text{entre columnas}} = \frac{\sum T_{.j}^2}{nr} - C$$

Donde:

SS entre columnas: Suma de cuadrados entre columnas

$\sum T_{i.}^2$ : Total por fila al cuadrado

$n$ : Número de medidas repetidas en cada celda

$r$ : Número de filas

$C$ : Terminó de corrección

$$SS_{\text{entre columnas}} = \frac{936,1089}{2 (2)} - 135,2737 = 98,7536$$

$$SSC = 98,7536$$

$$g.l = c - 1$$

$$g.l = 3 - 1$$

$$g.l = 2$$

- **SS TOTAL**

$$SS_{\text{total}} = \sum X^2_{ijk} - C$$

Donde:

SS TOTAL: Suma de cuadrados total

$\sum X^2_{ijk}$ : Suma de los cuadrados de las medidas individuales de la tabla N° 23

$C$ : Terminó de corrección

$$\Sigma X^2_{ijk} = (0,46)^2 + (0,67)^2 + (1,81)^2 + \dots + (7,52)^2 = 234,5621$$

$$SS_{total} = 234,5621 - 135,2737 = 99,2884$$

$$g.l = (n \cdot c \cdot r) - 1$$

$$g.l = (2 \cdot 3 \cdot 2) - 1$$

$$g.l = 12 - 1 = 11$$

- **SS residual**

$$SS_{residual} = \Sigma X^2_{ijk} - \frac{\Sigma T_{ij}^2}{n}$$

Donde

SS residual: Variación debido al error aleatorio

$\Sigma X^2_{ijk}$ : Suma de los cuadrados de las medidas de la tabla N° 23

$\Sigma T_{ij}^2$ : Sumatoria de las medidas replicadas y al cuadrado

n: Número de medidas repetidas en cada celda

$$\Sigma T_{ij}^2 = [(1,13)^2 + (3,70)^2 + (14,32)^2 + \dots + (14,96)^2]$$

$$\Sigma T_{ij}^2 = 468,9129$$

$$SS_{residual} = 234,5621 - \frac{468,9129}{2}$$

$$SS_{residual} = 234,5621 - 234,4564 = 0,1057$$

$$g.l = (n-1) \cdot r \cdot c$$

$$g.l = (2-1) \cdot (2) \cdot (3)$$

$$g.l = 6$$

Tabla 26. Resumen de ANOVA

F.V	SS	GI	C.M.	F
E.F.	0,3300	1	0,3300	$F_{cal,EF} = \frac{0,3300}{0,0176} = 18,7500$
E. C.	98,7536	2	49,3768	$F_{cal,EC} = \frac{49,3768}{0,0176} = 2\ 804,1708$
Interacción	0,0992	2	0,0496	$F_{cal,FC} = \frac{0,0496}{0,0176} = 2,8173$
Residual	0,1057	6	0,0176	
TOTAL	99,2884	11		

$F_{cal,EF} = \frac{0,3300}{0,0176} = 18,7500$  **Existe diferencia significativa.**

$F_{tab\ 1,6;\infty=0,05} = 5,987$

$F_{cal,EC} = \frac{49,3768}{0,0176} = 2\ 804,1708$  **Existe diferencia significativa.**

$F_{tab\ 2,6;\infty=0,05} = 5,143$

$F_{cal,FC} = \frac{0,0496}{0,0176} = 2,8173$  **No Existe diferencia significativa.**

$F_{tab\ 2,6;\infty=0,05} = 5,143$

A continuación se puede verificar los resultados del análisis de varianza de dos factores (ANOVA) por medio de la hoja de cálculo Excel y anexo 5.4.2 tabla 19 (F tabulado).

**RESUMEN**

6	10	25	50	Total
Cuenta	2	2	2	6
Suma	1,1300	3,7000	14,3200	19,1500
Promedio	0,5650	1,8500	7,1600	3,1917
Varianza	0,0220	0,0032	0,0098	9,7859

**12**

Cuenta	2	2	2	6
Suma	1,3600	4,8200	14,9600	21,1400
Promedio	0,6800	2,4100	7,4800	3,5233
Varianza	0,0162	0,0512	0,0032	10,0058

**TOTAL**

Cuenta	4	4	4
Suma	2,4900	8,5200	29,2800
Promedio	0,6225	2,1300	7,3200
Varianza	0,0172	0,1227	0,0385

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	0,3300	1	0,3300	18,7416	0,0049	5,9874
Columnas	98,7536	2	49,3768	2804,1708	0,0000	5,1433
Interacción	0,0992	2	0,0496	2,8173	0,1371	5,1433
Dentro del grupo	0,1057	6	0,0176			
<b>Total</b>	<b>99,2884</b>	<b>11</b>				

Fuente: Microsoft Excel 2013