



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
QUÍMICA AMBIENTAL

**SEMINARIO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
LICENCIATURA EN QUÍMICA AMBIENTAL**

Título:

**Diseño de un sistema de columnas de adsorción con carbón activado para
el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico,
Departamento de Química, UNAN-Managua, abril – octubre 2021**

Autores:

Br. Félix Raúl Paiz

Br. Mayron Heyler Meléndez Hernández

Tutor y asesor metodológico:

MSc. José Luis Prado Arroliga

Managua, 15 de diciembre del 2021

Aspectos Generales

TÍTULO

Diseño de un sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico, Departamento de Química, UNAN-Managua, abril – octubre 2021.

DEDICATORIA

A Dios

Gracias a Dios por manifestar sobre mí su misericordia y darme la gran bendición de llenarme de fuerza en cada caída durante este trayecto de mi vida y permitirme llegar hasta esta parte con Éxito.

A mis familiares

A mi madre, Lorena Isabel Paiz Rojas por enseñarme a dar todo lo mejor de mí a pesar de las adversidades de la vida y apoyarme incondicionalmente. A mi abuela, Aura Lila Rojas Olivas quien siempre confió en mí, tías y hermano.

Amistades y docentes

A mis amigos y compañeros de clase que me brindaron apoyo en cada proceso de la carrera, los llevo en el corazón. Agradezco a la UNAN Managua, por el apoyo que me brindaron durante estos 5 años para alcanzar esta meta. Agradezco a todos los maestros que fueron participe en la inducción con sus enseñanzas durante este proceso, especialmente al maestro Msc. José Luis Prado Arroliga por su disposición e interés como Tutor de este trabajo.

Félix Raúl Paiz

A Dios

Dedico a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, por su bondad, amor y misericordia, por darme sabiduría y entendimiento, por guiarme por el camino de la rectitud para ser una persona de bien, agradezco a él por todo lo que me ha brindado.

A mis familiares

Les dedico este seminario de graduación a ellos por haber confiado en mí desde el inicio, por apoyarme de manera incondicional en todos los aspectos de mi vida, por el amor y la paciencia que siempre han tenido conmigo, les agradezco todo lo que han hecho por mí, a mi madre: *Sigrid Hernández Zelaya*.

Demás familiares por apoyarme, por darme ánimos para seguir adelante, por qué siempre de algún u otro modo están dispuestos en tenderme la mano.

Amistades y docentes

Por estar en todo momento ayudando, por sus consejos y su compañía a lo largo mi carrera universitaria, fue un placer coincidir con cada uno de ellos, agradezco también por su amistad, sus consejos y el apoyo brindado durante estos años, de igual manera le agradezco a José Luis Prado Arroliga que además de ser el tutor, es un excelente maestro y amigo, a mi compañero de seminario. Agradezco también a todos los profesores que me impartieron clases en los años de esta carrera, los que todavía siguen laborando, y los que ya se retiraron, gracias a cada uno de ellos por el apoyo y la motivación.

Mayron Heyler Meléndez Hernández

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios, por su gran amor y misericordia que nos regala la vida y sabiduría, para alcanzar cada una de las metas emprendidas, a Él, la honra, el honor y el poder, Infinitamente Gracias.

Al MSc. José Luis Prado Arroliga por su apoyo incondicional en dicha tutoría de investigación, compartiendo su experiencia, conocimientos y su colaboración en todo el proceso de desarrollo, que hicieron posible la culminación de este trabajo investigativo.

A todos los docentes que nos guiaron en todo el periodo de nuestra formación académica y a todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

Mayron Heyler Meléndez Hernández y Félix Raúl Paiz



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

CARTA AVAL DEL TUTOR



El presente trabajo de investigación titulada *“Diseño de un sistema de columnas de adsorción con carbón activado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico, Departamento de Química, UNAN-Managua, abril – octubre 2021”*, ha sido realizado por los bachilleres Félix Raúl Paiz y Mayron Heyler Meléndez Hernández bajo mi dirección **MSc. José Luis Prado Arroliga** doy fe de que la investigación es propiedad intelectual fidedigna y original de ellos, además que han cumplido con todas las disposiciones y requisitos académicos según el Capítulo III del Título IV del Reglamento del Régimen Académico Estudiantil para optar al título de Licenciatura en Química Ambiental.

Managua, 15 de diciembre de 2021



José Luis Prado Arroliga, MSc

Tutor y asesor metodológico

Docente Departamento de Química

UNAN-Managua

RESUMEN

En la presente investigación para diseñar un sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico; se empleó la herramienta matriz de comparación con el fin de estudiar tres diferentes carbones activados, donde el propuesto es el elaborado por Condori en el 2019, este cuenta con microporosidad, pH de 7,12 y tiempo de residencia de 30 minutos para una remoción de arsénico del 97,60%; también se determinaron las dimensiones del diseño en base a un consumo de agua familiar de 619,8 L/día, concentración inicial y final de arsénico de 0,103 mg/L y 0,01 mg/L respectivamente y valores típicos para diseño y operación en filtros GAC, por lo que, una columna tiene un diámetro interno de 0,081 m, una altura de lecho de carbón activado de 2,3 m y altura de columna de 2,7 m.

Se definió el modelo con 6 columnas en paralelo que permitirán teóricamente el tratamiento de agua contaminada con arsénico, conectadas inicialmente a un tanque de recepción de agua sin tratar [0,103 mgAs/L] y posterior a un tanque de agua tratada con mínima concentración teórica de arsénico [0,002472 mgAs/L]; el diseño está modelado para realizar un trabajo diario de 8 horas con un tiempo de residencia de 30 minutos. Posterior se estimó el costo de fabricación del sistema de columnas diseñado el cual es de C\$44 610,33 despreciando el valor del carbón activado; este valor es cercano a los precios más bajos de sistemas de adsorción comerciales, y teniendo en cuenta el funcionamiento y eficiencia teórica se considera aceptable.

Palabras claves: columnas, adsorción, arsénico, diseño.

ÍNDICE

ASPECTOS GENERALES

TÍTULO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iv
CARTA AVAL DEL TUTOR.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE.....	vii

CAPÍTULO I

1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5

CAPÍTULO II

2.1. Marco teórico.....	5
2.1.1. Arsénico.....	5
2.1.1.1. Conceptos básicos sobre la química del arsénico.....	5
2.1.1.2. Estabilidad de las especies disueltas.....	8
2.1.1.3. Efectos del arsénico sobre la salud.....	11
2.1.1.4. Toxicidad de las especies arsenicales.....	12
2.1.2. El arsénico en el agua.....	13
2.1.2.1. Distribución de arsénico en aguas superficiales.....	14
2.1.2.2. Arsénico en las aguas continentales subterráneas.....	15
2.1.2.3. Origen del arsénico por contaminación natural.....	16
2.1.2.4. Origen antropogénico - Actividades contaminadoras de los sistemas acuáticos.....	17
2.1.3. Tecnologías convencionales, no convencionales y en estudio para remover arsénico.....	19
2.1.4. Referencia de contenido de arsénico en agua.....	20
2.1.5. Referencia del consumo de agua en una comunidad nicaragüense.....	21
2.1.6. Adsorción.....	22

2.1.6.1.	Cinética de adsorción.....	23
2.1.7.	Carbón activado.....	24
2.1.7.1.	Propiedades del carbón activado.....	25
2.1.7.2.	Características del carbón activado.....	26
2.1.8.	Columnas de adsorción.	27
2.1.8.1.	Características de las columnas de adsorción.	28
2.2.	Antecedentes.....	29
2.3.	Preguntas directrices.....	31
CAPÍTULO III		
3.1.	Diseño metodológico.....	32
3.1.1.	Descripción del ámbito de estudio y tecnológico.....	32
3.1.2.	Tipo de estudio.....	32
3.2.	Población y muestra.....	33
3.2.1.	Población.....	33
3.2.2.	Muestra.....	33
3.2.2.1.	Criterios de inclusión.....	33
3.2.2.2.	Criterios de exclusión.....	33
3.3.	Variables.....	34
3.3.1.	Variables independientes.....	34
3.3.2.	Variable dependiente.....	34
3.4.	Materiales.....	34
3.4.1.	Materiales para recolectar información.....	34
3.4.2.	Materiales para procesar la información.....	35
3.5.	Métodos.....	35
3.5.1.	Método de investigación.....	35
3.5.2.	Matriz comparativa.....	35
3.5.3.	Capacidad del diseño.....	35
3.5.4.	Concentración de arsénico inicial y final de arsénico.....	36
3.5.5.	Condiciones de operación.....	36
3.5.6.	Dimensionamiento de lecho de carbón activado.....	37
3.5.7.	Diseño del sistema de columnas de adsorción.....	40
3.5.8.	Estimación del costo requerido para construir el diseño.....	40

CAPÍTULO IV

4.1.	Análisis de resultados	42
4.1.1.	Selección del carbón activado.....	42
4.1.1.1.	Análisis del carbón activado de Hidalgo & Rivera (2017)	43
4.1.1.2.	Análisis del carbón activado de Mendieta (2008).....	44
4.1.1.3.	Análisis del carbón activado de Condori (2019).....	44
4.1.1.4.	Carbón activado propuesto.	44
4.1.2.	Cálculos de dimensionamiento y sistema de columnas.	45
4.1.2.1.	Valores de condiciones de operación.....	45
4.1.2.2.	Cálculos del dimensionamiento y parámetros del lecho de carbón activado.	46
4.1.2.3.	Calculo de las caídas de presión.	50
4.1.2.4.	Perdidas por carga de las tuberías y el lecho.	55
4.1.2.5.	Pérdidas de carga y caídas de presión totales.	56
4.1.2.6.	Perdidas de carga y caídas de presión del sistema.....	57
4.1.3.	Diseño del sistema de columnas.....	58
4.1.3.1.	Selección del medio de bombeo y control de flujo volumétrico.	58
4.1.3.2.	Columna de adsorción individual.	59
4.1.3.3.	Ensamble de columnas de adsorción.	60
4.1.3.4.	Tanque de almacenamiento de agua tratada.	61
4.1.3.5.	Diseño en SKETCHUP del sistema de columnas.....	62
4.1.4.	Estimación del costo del diseño.	63

CAPÍTULO V

5.1.	Conclusiones.....	66
5.2.	Recomendaciones	67
5.3.	Bibliografía.....	68

ANEXOS

Capítulo I

1.1. Introducción

El interés de realizar la presente investigación se debe a que el Arsénico es un elemento cuya presencia mayor 10 microgramos por litro de agua, en los seres humanos provoca cáncer en la vejiga, disfunción renal y hepática, lesiones en la piel, deficiencia mental en el desarrollo de los niños, entre otros, cuyo desenlace es la muerte. En los últimos años se estima que, en más de cinco regiones de Nicaragua hay contaminación por arsénico; por ejemplo, se conoce que Kinuma en el municipio de la Libertad, departamento de Chontales, posee el más alto grado de contaminación con Arsénico del país, región de las Pilas, Santa Rosa del Peñón, Jinotega (Barragne-Bigot, 2004), por lo tanto, indagar y proponer métodos de remoción de arsénico es de vital importancia.

La adsorción es la operación unitaria más empleada en la remoción de colorantes, sabores, olores y purificación de agua residuales en virtud de la simplicidad del diseño, facilidad de operación e insensibilidad a las sustancias tóxicas. Los carbones activados, por su gran porosidad, son empleados ampliamente como adsorbentes en las operaciones industriales de purificación y recuperación química, lo cual se debe a su extensa área superficial entre 500 y 2000 m²/g, su gran volumen de poro y la presencia de grupos funcionales superficiales, especialmente grupos oxigenados. (Castellar, Cardozo, Suarez, & Vega, 2013)

Desde esta perspectiva, el criterio más importante en el diseño de un sistema de adsorción en columnas de adsorción tiene que ver con el tipo de carbón activado a emplear, el dimensionamiento de las columnas, los tiempos de operación y regeneración del lecho y su capacidad de adsorción bajo una serie de condiciones específicas. De hecho, el diseño de un proceso de adsorción depende en gran medida de la reproducción exacta de las curvas de ruptura o perfiles de concentración del efluente en función del tiempo o el volumen de líquido tratado. Por lo tanto, se realiza un análisis documental de estos parámetros y se define la propuesta del diseño de columnas de adsorción para remover arsénico, además de la estimación del costo del sistema de columnas.

1.2. Planteamiento del problema

El arsénico químicamente es el metaloide con más alto potencial de toxicidad para la salud humana existente en la naturaleza, en Nicaragua, se han presentado casos de arsenicosis (envenenamiento por arsénico), ejemplo de ello se dio en la comunidad de El Zapote, Valle de Sébaco, donde más de 70 personas consumieron durante un año y medio agua con contaminada con arsénico a una concentración de 1 320 $\mu\text{g/L}$ (Altamirano & Delgado, 2020); presentando efectos de intoxicación aguda y crónica, como efectos cardiovasculares, incluyendo arritmias, hipertensión, isquemia cardíaca y cerebral, diabetes mellitus y alteraciones arteriales periféricas. (Hossain, 2006)

Además, se ha encontrado arsénico en aguas subterráneas en las regiones noroeste y suroeste del país, próximas a áreas mineralizadas a lo largo de la estructura tectónica activa más importante, la Depresión o Graben de Nicaragua y en la Plataforma Central, así como también en zonas aledañas a la Cordillera volcánica de Los Maribios y que son la única fuente de agua disponible para la población rural en muchas comunidades del país, como las ubicadas al norte del municipio de La Paz Centro, por lo que, en Nicaragua existe una preocupación ambiental y de salud pública al detectarse altos niveles de arsénico en el agua subterránea (Altamirano & Delgado, 2020).

Por lo tanto, en Nicaragua existe la necesidad de contemplar y adquirir sistema de filtración para remover metales pesados como el arsénico en las comunidades que se ven afectada constantemente por este elemento químico presente en aguas naturales y por ende surge la incógnita de cómo desarrollar un método viable para la eliminación de arsénico. Por lo antes mencionado cabe preguntarse ¿Cuál sería el diseño para un sistema que remueva arsénico en aguas naturales, a escala de laboratorio?

Ante lo mencionado como delimitación del problema se procede a formularse las siguientes preguntas que permiten enfocarse a dar respuesta a esta problemática:

Sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico, Departamento de Química, UNAN-Managua, abril – octubre 2021.

1. ¿Cuál sería el mejor carbón activado a utilizar como agente adsorbente en el diseño de un sistema de remoción?
2. ¿Cuáles serían las dimensiones y capacidad de un sistema de tratamiento para remover arsénico?
3. ¿Cuál es el **diseño** para un sistema de filtración que permita una remoción de arsénico a escala de laboratorio con proyección a uso en las comunidades?
4. ¿Cuál sería el costo de fabricación del sistema de columnas diseñado?

1.3. Justificación

En el sector rural se evidencia la elaboración de pozos artesanales en las regiones noroeste y suroeste del país cuya agua no cumple con los parámetros de calidad para el consumo humano (Altamirano & Delgado, 2020), ya que no se determina la calidad en función de las características físicas y químicas de una muestra de agua. En Nicaragua se utiliza como referencia de calidad de agua para consumo humano la Norma sugerida por El Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE, 1994), para asegurar un suministro de agua saludable para el consumo humano y, de este modo, proteger la salud de las personas, con valores ya establecidos como admisibles para diferentes compuestos químicos, entre ellos el arsénico.

En Nicaragua no se encontró un equipo que integre más de una columna de adsorción, solo columnas que integran arena, grava y otros componentes, solamente se encontró una propuesta de patentar y motivar tecnologías baratas para remover arsénico (Balladares, 2019), por ende, se pretende diseñar un sistema de tratamiento que integre carbón activado, teniendo presente que por sus características el carbón activado es uno de los adsorbentes potenciales, con una gran porosidad y una gran área superficial de contacto, con el propósito de remover contaminantes presentes en aguas naturales que son dirigidas a consumo humano.

Por lo tanto, el presente estudio se está realizando con el propósito de diseñar un sistema de filtración con carbón activado para remover arsénico, con grandes beneficios esperados, con el fin de proporcionar tecnologías a bajo costo y de fácil operación, que se puedan construir con materiales locales, y aseguren aguas de buena calidad para el consumo humano, reduciendo de esta manera los riesgos en la salud (envenenamiento) por ingesta de consumo de agua con arsénico, por otra parte, no se utilizan reactivos químicos, por lo que, se podría implementar en cualquier comunidad que tenga problemas de arsénico en el agua de consumo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar un sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico, Departamento de Química, UNAN-Managua, abril – agosto 2021

1.4.2. Objetivos específicos.

1. Estudiar los datos referenciales en el uso de carbón activado, para una posible propuesta como agente adsorbente.
2. Determinar las dimensiones del sistema de columnas de adsorción basados en criterios de diseño y una capacidad de consumo diario de agua por familia.
3. Definir el modelo del **diseño** del sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico.
4. Estimar el costo de fabricación del diseño despreciando el valor del carbón activado.

Capítulo II

2.1. Marco teórico

2.1.1. Arsénico.

El arsénico (As) es un elemento muy común en la atmósfera, en rocas y suelos, en la hidrosfera y la biosfera. Es movilizado al ambiente a través de una combinación de reacciones que incluyen tanto procesos naturales (meteorización, actividad biológica, emisiones volcánicas), así como procesos antropogénicos (actividad minera, uso de combustibles fósiles, pesticidas, herbicidas, desecantes, conservadores de la madera, aditivos de alimento de ganado, semiconductores, pigmentos, entre muchos otros). (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 9)

Las personas pueden verse principalmente expuestas al arsénico a través de la inhalación, la ingesta de alimentos y el agua. Principalmente en ciertas zonas en las que el agua entra en contacto con minerales que contienen arsénico. Por razones geológicas naturales, en ciertas zonas del mundo el agua que beben algunas poblaciones puede contener más arsénico del habitual.

El arsénico es un elemento extremadamente tóxico y un carcinógeno para el organismo humano, no solamente en altas concentraciones, donde la exposición causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales, sino también tiene efectos negativos crónicos para la salud a través de la ingesta de agua por largos periodos a bajas concentraciones. La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden: Arsina > As^{+3} inorgánico > As^{+3} orgánico > As^{+5} inorgánico > As^{+5} orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental.

2.1.1.1. Conceptos básicos sobre la química del arsénico

El As puede ser de origen orgánico, o bien, inorgánico (no se debe confundir con el origen antropogénico o natural, pues no interfiere uno con otro). El de origen inorgánico, es el que procede directamente de los minerales, siendo más tóxico para los humanos que el orgánico. En cuanto al orgánico, lo encontramos una vez éste ha sido asimilado por algún organismo vivo capaz de asimilarlo. Tiene que haber sido metabolizado como mínimo por un productor primario, es decir, haber empezado la cadena trófica; lo encontraríamos en raíces, hojas o semillas de una planta regada con aguas contaminadas con arsénico y que pudiera bioacumularlo, o bien, en partes

viscerales, pelo y uñas de animales herbívoros o consumidores de aguas contaminadas. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 20)

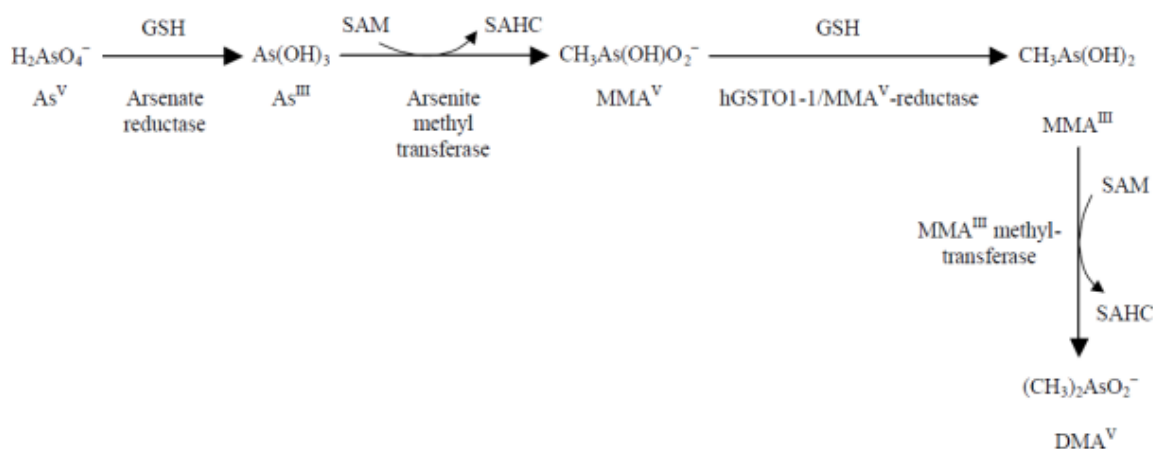
El As inorgánico, una vez que ha entrado en el organismo, normalmente por vía oral en caso de animales o por las raíces en el caso de las plantas y por difusión en los microorganismos, puede ser metilado a nivel celular a compuestos arsenicales orgánicos con el fin de eliminarlo del organismo. Se crean distintos compuestos según los grupos metil añadidos: ácido monometilarsénico (MMA), dimetilarsénico (DMA) y trimetilarsénico (TMA).

La metilación tiene lugar alternando reacciones oxidativas y reductivas de metilación, es decir, la reducción de As pentavalente a As trivalente seguido de la adición de un grupo metil. En determinados organismos la metilación del arsénico inorgánico puede dar lugar a metabolitos trimetilados. En humanos la cantidad relativa para los compuestos arsenicales en orina es 10-30% de arsénico inorgánico, 10-20% MMA_{total} y un 60-80% DMA_{total}. Dentro de éstas proporciones existen variaciones, una muestra de orina con mayor proporción de DMA muestra una gran capacidad y velocidad del metabolismo para excretar arsénico, y una proporción elevada de MMA significa un metabolismo de excreción más lento, y, por tanto, más propenso a tener problemas relacionados con la intoxicación por arsénico en el caso que tomara agua contaminada.

Los principales metabolitos excretados por la orina en humanos expuestos al As inorgánico son MMA y DMA juntamente con un poco de As no metilado todos en estado pentavalente. Estos porcentajes son únicamente válidos para humanos, cada especie tiene un porcentaje distinto, ya que hay algunos animales, como los primates (no-humanos) y los cerdos de Guinea, que son incapaces de metilar el As inorgánico.

Comparando el arsénico inorgánico con los metabolitos pentavalentes de As metilados (MMAV and DMAV), éstos son menos citotóxicos, menos reactivos en el tejido y más fácilmente excretados por la orina. Esto evidencia que el proceso de metilación es un proceso eficiente de desintoxicación. Dentro de los compuestos metilados, los trivalentes son considerablemente más tóxicos que los pentavalentes. La Figura 2.1 muestra la ruta metabólica que sigue el compuesto en un organismo vivo.

Figura 2.1. Biotransformación del arsénico inorgánico.



Fuente: (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 21)

Domínguez (2009) citado por Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, (2014, p. 21) afirma que, según el estado de oxidación del arsénico inorgánico, existe arsenito (As (III) o también conocido como As trivalente) y el arseniato (As (V) o As pentavalente). El arsenito es el más tóxico y está presente mayormente en condiciones anaeróbicas. El arseniato es menos tóxico que el anterior y lo encontramos normalmente en condiciones aeróbicas, ya que en estas condiciones existen microorganismos que oxidan el arsenito a arseniato. Estas dos formas son las más habituales en los ambientes acuáticos. La reducción de arseniato a arsenito da lugar a la solubilización del contaminante en el agua. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 21)

Conocer las especies de arsénico es importante, debido a que su toxicidad depende de la especie de arsénico con la que tratamos. Eso se debe a que el arsenito se une a los grupos sulfhidril de las enzimas e inhibe su funcionalidad. Algunos estudios han demostrado que el arsenito inhibe más de 200 enzimas en las células humanas. Dado que éste es un análogo estructural del ion fosfato, componente principal de las cadenas de ADN, causa mucha problemática a nivel celular. De este modo, el arsenito puede sustituir el fosfato de la doble hélice del ADN, lo que explicaría sus efectos mutágenos, cancerígenos y teratogénicos. También, por otra parte, interfiere particularmente en los procesos de fosforilación oxidativa, inhibiendo el metabolismo energético celular. Otros estudios

sugieren que la reducción intracelular de As (V) a As (III) puede desembocar en la formación de radicales libres responsables del daño cromosómico y celular. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 21)

2.1.1.2. Estabilidad de las especies disueltas.

Si bien el agua comúnmente no se considera intuitivamente una sustancia redox sensitiva, esta puede tomar parte en la siguiente reacción redox (Altamirano 2005, p.p. 27 - 29):



Donde H^+ es reducido. Oxidantes muy fuertes, que desplazan la reacción 1 hacia la derecha no pueden persistir en ambientes naturales debido a que reaccionan con H_2O . Igualmente, reductores muy fuertes reducirán H_2O . De acuerdo con esto, la estabilidad del agua pone límites a las posibles condiciones redox que se encuentran en ambientes naturales.

La oxidación del As^{+3} a As^{+5} se produce según las siguientes reacciones:



La concentración de arsénico en las aguas naturales está posiblemente controlada en gran medida por procesos de interacción sólido-solución. Existen dos categorías fundamentales de procesos geoquímicos de interacción agua-fase sólida, que controlarán la movilización de arsénico en el agua: 1) reacciones de adsorción-desorción y 2) reacciones de precipitación-disolución de la fase sólida.

La unión de arsénico a una superficie de un óxido de hierro sería un ejemplo de reacción de adsorción. El fenómeno inverso a esta reacción, arsénico liberándose de esa superficie, sería un ejemplo de reacción de desorción. El arsénico puede ganar o perder electrones en reacciones de oxidación-reducción.

Como resultado de ese fenómeno, el arsénico puede estar presente en la naturaleza en diversos estados de oxidación (-3, 0, +3 y +5), sin embargo, este suele encontrarse comúnmente en las aguas en dos estados de valencia: arsenito As (III) y arsenato As (V).

El arsenato predomina en condiciones oxidantes, mientras que el arsenito predomina cuando las condiciones son suficientemente reductoras. Bajo las condiciones de pH más comunes en las aguas subterráneas, el arsenato está presente como oxianiones cargados negativamente (H_2AsO_4^- , $\text{HAsO}_4^{=2}$), mientras que el arsenito está presente como especie neutra (H_3AsO_3^0).

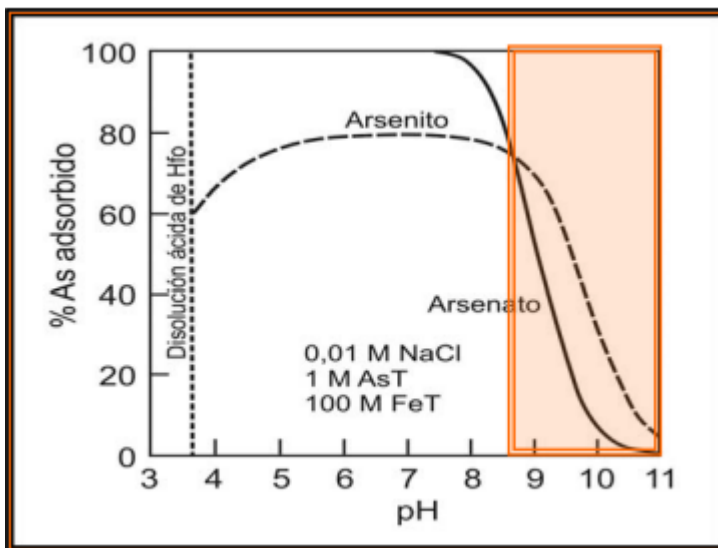
Las reacciones de adsorción-desorción son descritas mediante isotermas de adsorción (o desorción). Una isoterma de adsorción o intercambio relaciona la concentración de un determinado componente en solución con su concentración en la superficie de la partícula. Esa concentración en la superficie no solo depende del componente implicado y de la carga de superficie, también depende de otros iones en solución y de su concentración, ya que competirán a su vez para ocupar lugares (sedes de intercambio) en la superficie.

Este fenómeno, está ligado a los procesos de adsorción-desorción, y es lo que se conoce como intercambio iónico. Las isotermas de adsorción pueden ser “lineales” o “no lineales”. Una isoterma “lineal” significa que la cantidad adsorbida de una especie es directamente proporcional a su concentración en la solución.

Las isotermas para los dos estados de oxidación del arsénico son muy diferentes, incluyendo su dependencia del pH (figura 2.2). La isoterma para As (V) es “no lineal” de forma muy acusada, la isoterma para As (III) lo es algo menos. (Altamirano, 2005, p.p. 30 - 31)

Una consecuencia de la isoterma de adsorción “no lineal” tan acusada del arsenato es que, incluso a concentraciones del orden de $\mu\text{g L}^{-1}$, la adsorción de arsénico sobre el óxido de hierro puede corresponder a miles de ppm en el caso de oxihidróxidos férricos. En general, aunque depende de las fases minerales presentes, la máxima sorción de As (III) se produce a $\text{pH} < 8$, mientras que la máxima adsorción de As (V) se da $\text{pH} < 7$.

Figura 2.2. Curvas de adsorción de As(III) y As(V), en función del pH.



El área sombreada representa el rango de pH para el cual se produce la máxima desorción de As. Fuente: Altamirano (2005).

Tanto arsenito como arsenato son adsorbidos en la superficie de una gran variedad de materiales presentes en el medio como son óxidos de metales, sobre todo de hierro, manganeso y aluminio. La adsorción de arsenato por oxihidróxidos de hierro es particularmente fuerte y las cantidades adsorbidas pueden ser apreciables incluso a bajas concentraciones de arsénico.

Las reacciones de adsorción y desorción entre arsenato y superficies en óxidos de hierro son particularmente importantes ya que esa fase mineral es muy común como recubrimiento de otras fases sólidas, y porque el arsenato se adsorbe fuertemente sobre las superficies de los óxidos de hierro en condiciones ácidas o con pH próximos a los valores neutros. Sin embargo, la desorción de arsenato de dichas superficies ocurrirá en el caso de pH con valores alcalinos.

Las reacciones de oxidación-reducción pueden controlar indirectamente la adsorción-desorción de arsénico por sus efectos sobre la especiación, Por ejemplo, la reducción de arsenato a arsenito puede facilitar la movilización de arsénico debido a que el arsenito (As III) es adsorbido más débilmente que el arsenato (As V). Reacciones redox involucrando tanto arsénico adsorbido como acuoso puede afectar la movilidad del arsénico.

2.1.1.3.Efectos del arsénico sobre la salud.

El As es un elemento muy tóxico. Los compuestos inorgánicos de As pueden provocar una intoxicación aguda cuando el individuo está expuesto a una dosis elevada, tanto como única dosis o como dosis repetidas durante un corto plazo (no mayor a 24 horas). Estos efectos se manifiestan poco tiempo después de la ingestión (o inhalación) del compuesto. Los efectos más destacados de la intoxicación aguda por As son náuseas, vómitos, diarrea, efectos cardiovasculares y encefalopatía. (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p. 36)

Las concentraciones de As que se encuentran naturalmente en las aguas subterráneas no producen intoxicaciones agudas; sin embargo, pueden producir intoxicaciones crónicas debido a la ingesta, durante períodos de tiempo prolongados (años), de pequeñas cantidades de As a través del agua y de alimentos cultivados o cocinados con esa agua.

Los efectos sobre la salud debido a la toxicidad crónica del As se consideran actualmente dentro del término “arsenicosis”, patología que incluye una serie de manifestaciones clínicas causadas por la exposición prolongada a As. El primer indicio de toxicidad crónica surgió por el uso medicinal de compuestos de As, pero, actualmente, la principal etiología de la arsenicosis es la ambiental, principalmente a partir de la utilización de aguas ricas en As para consumo humano, con una población expuesta muy extendida geográficamente, como ya se ha mencionado.

La exposición crónica al As ha sido asociada con una variedad de problemas de la salud, incluyendo varios tipos de cáncer (piel, pulmón, vejiga, hígado, riñón y próstata), enfermedades o efectos neurológicos, gastrointestinales, hematológicos, patologías perinatales y otras manifestaciones clínicas, inmunológicas, efectos vasculares, incluyendo infarto de miocardio, hipertensión, diabetes, aborto, bajo peso al nacer, hiperqueratosis e hiperpigmentación. El engrosamiento palmoplantar, la hiperqueratosis, el aumento de la pigmentación de la piel y el desarrollo de cáncer de piel, pulmón y vejiga son los problemas de salud más frecuentemente reportados en la literatura. El As presenta un efecto inhibitorio sobre la hematopoyesis, produciendo anemia de tipo hipoplástico. También se lo asocia con neurotoxicidad, debido a que produce una disminución en la velocidad de conducción periférica. (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p. 37)

Según estudios poblacionales, casos clínicos en serie e informes relativos a la exposición ambiental, medicamentosa y ocupacional al As (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p. 37), éste afecta a múltiples sistemas del organismo humano. En las poblaciones expuestas, se suele observar una amplia variedad de síntomas y, entre ellos, las manifestaciones dermatológicas son las más características. Las lesiones dermatológicas tienen un período de latencia que puede alcanzar los diez años. Algunos de los síntomas son dependientes de la dosis y del tiempo de exposición.

2.1.1.4. Toxicidad de las especies arsenicales.

La toxicocinética y el metabolismo del As en el cuerpo humano continúan siendo temas en discusión a pesar de los intentos por generar modelos que verifiquen las bien establecidas relaciones entre el nivel de exposición al As y las patologías derivadas. (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p. 47-48)

Existen numerosos estudios *in vitro* e *in vivo* en animales (mamíferos) de laboratorio referidos a la toxicidad del As en sus formas inorgánicas y orgánicas para casos de exposición aguda y crónica. En uno de los documentos más recientes de la OMS referidos a la evaluación y asignación de riesgo para As, se puede encontrar una revisión detallada y referenciada relativa a ensayos realizados *in vitro*, en bacterias y células de mamíferos (incluyendo células humanas) así como ensayos *in vivo*, que ilustran el alcance de la toxicidad del As en los procesos reproductivo, embrionario y fetal, en la expresión genética, en los distintos tipos de carcinomas y en los sistemas vascular, nervioso e inmune.

Dado que la actividad bioquímica y comportamiento toxicológico del As varía de acuerdo a su especie química, la identificación y cuantificación de éstas adquiere relevancia desde el punto de vista sanitario, ambiental, laboral y nutricional. Esto significa que, para la asignación de riesgo toxicológico del As, se deben considerar factores tales como la movilidad y la disponibilidad tanto ambiental como biológica de la especie química.

En general, se acepta que la toxicidad de las especies más comúnmente encontradas disminuye de acuerdo a la siguiente secuencia:

As(-III) (AsH_3) >> AsIII inorgánico (iAs(III), arsenito) > As(V) inorgánico (iAs(V), arseniato) >> ácido monometilarsínico (MMA^V) > ácido dimetilarsínico (DMA^V) >> arsenobetaína (AsB), ion tetrametilarsonio (M_4As^+) y arsenocolina (AsC).

Las especies arseniato (As(V)) y arsenito (As(III)) se consideran carcinogénicas, mientras que se demostró que AsB y AsC son prácticamente inocuas. Como se ve, el ámbito de toxicidad es amplio y, como tanto la toxicidad como la biodisponibilidad del As dependen de la/s especie/s vinculadas, resulta conveniente la determinación cuantitativa de cada una de sus especies si se desea evaluar el grado de riesgo a través de los marcadores de exposición. (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p. 48)

2.1.2. El arsénico en el agua.

El arsénico está presente en el agua por la disolución natural de minerales de depósitos geológicos, la descarga de los efluentes industriales y la sedimentación atmosférica. En aguas superficiales con alto contenido de oxígeno, la especie más común es la pentavalente o arsenato (As^{+5}). Bajo condiciones de reducción, generalmente en los sedimentos de los lagos o aguas subterráneas, predomina el arsénico trivalente o arsenito, (As^{+3}). (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 10)

Los estados de oxidación de mayor presencia en el agua son: El trivalente (As^{+3}) y el pentavalente (As^{+5}) y con menos frecuencia como As^0 , As^{-1} y As^{-2} . Aunque ambas especies (As^{+3} y As^{+5}) son móviles en el medio, es el arsenito el estado más lábil y biotóxico. El estado de oxidación del arsénico, y por tanto su movilidad, están controlados fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH.

La principal vía de dispersión del arsénico en el ambiente es el agua. Aún si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos. La concentración del arsénico en aguas naturales es muy variable y dependerá de las formas de arsénico en el suelo local.

Los microbios, plantas y animales pueden convertir todos estos compuestos químicos de arsénico inorgánico en compuestos orgánicos. Las condiciones que favorecen la oxidación química

y biológica del arsénico inducen el cambio a especies pentavalentes y a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambiarán el equilibrio al estado trivalente.

Las formas orgánicas de arsénico suelen aparecer en concentraciones menores que las especies inorgánicas, aunque pueden incrementar su proporción como resultado de reacciones de metilación catalizadas por actividad microbiana (bacteria, algas). Las formas orgánicas dominantes son el ácido dimetilarsínico (DMAA, $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}(\text{OH})$) y el ácido monometilarsónico (MMAA, $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$), donde el arsénico está presente en ambos casos como As^{+5} . (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 10)

2.1.2.1. Distribución de arsénico en aguas superficiales.

Los valores de fondo de contenido de arsénico en ríos son relativamente bajos, en general, inferiores a $0,8 \mu\text{g/L}$ aunque pueden variar dependiendo de factores como recarga (superficial y subterránea), litología de la cuenca, drenaje de zonas mineralizadas, clima, actividad minera y disposición de residuos urbanos y/o industriales. En áreas de clima árido, el aumento de la concentración de arsénico en las aguas superficiales se ve favorecido por procesos de evaporación, que además provocan un aumento en la salinidad y pH de las aguas. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 10)

Los valores de fondo de contenido de arsénico en aguas lacustres no difieren mucho de los observados en ríos, al estar básicamente controlados por los mismos factores físicos. Sin embargo, en los lagos se tiene la intensificación de los procesos de evaporación (p.ej., lagos de climas áridos), o la estratificación de la columna de agua, que genera la aparición de un ambiente oxigenado en el epilimnio (capa superior) y otro de condiciones anóxicas en el hipolimnio (capa inferior). Por lo tanto, también se produce una estratificación relativa de las especies de arsénico, con tendencia al predominio de $\text{As}(\text{V})$ en el epilimnio y $\text{As}(\text{III})$ en el hipolimnio, además de una variación de la concentración de arsénico con la profundidad. Sin embargo, la especiación de arsénico en los lagos no siempre sigue las pautas previstas. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 10)

En el agua de mar, la concentración promedio de arsénico se encuentra en un rango de $1,5$ a $4 \mu\text{g/L}$. Las concentraciones en zonas de estuarios son variables, como resultado del aporte de aguas continentales y sedimentos continentales, y de variaciones locales de salinidad y gradientes redox.

Las corrientes fluviales de zonas mineras o con mineralizaciones presentan contenidos altos de arsénico, generalmente en el rango de 200-400 $\mu\text{g/L}$. La contaminación de As de origen geotermal en aguas superficiales y en acuíferos poco profundos también ha sido reportada con frecuencia en áreas geotermales en todo el mundo. Se han citado valores de concentración de arsénico de hasta 370 $\mu\text{g/L}$ en zonas de influencia de sistemas geotermales. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 11)

2.1.2.2. Arsénico en las aguas continentales subterráneas.

En la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen ligado a procesos geoquímicos naturales. Uno de las peculiaridades más notables del problema del arsénico de origen natural en las aguas subterráneas, es que no siempre hay una relación directa entre el alto contenido en arsénico en el agua y un alto contenido en arsénico en los materiales que constituyen el acuífero. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 11)

No se conoce un modelo geológico/hidrogeológico común para todas las ocurrencias identificadas, encontrándose aguas con arsénico en situaciones muy variadas, tanto en condiciones reductoras como en condiciones oxidantes, o en acuíferos sobreexplotados, tanto en zonas áridas como en zonas húmedas, o tanto en acuíferos superficiales libres como en acuíferos profundos confinados. Esta variedad de situaciones viene definida por la peculiaridad de las circunstancias y procesos que concurren en cada uno de los casos, o en otras palabras, la presencia de arsénico en cada caso es la consecuencia de un ambiente geoquímico y condiciones hidrogeológicas específicas.

A diferencia de la contaminación antropogénica, la cual genera una afección de carácter local, la ocurrencia de concentraciones altas de arsénico de origen natural puede afectar a grandes áreas. Los numerosos casos de “contaminación” natural de aguas subterráneas por arsénico que existen en el mundo están relacionados con ambientes geológicos muy diferentes: metasedimentos con filones mineralizados, formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, distritos mineros, sistemas hidrotermales, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias, etc. La concentración de arsénico en las aguas subterráneas está fundamentalmente controlada por las interacciones agua-

roca en el seno del acuífero. En condiciones naturales los valores varían mucho de un entorno a otro. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 11)

2.1.2.3. Origen del arsénico por contaminación natural.

El origen del arsénico es principalmente geogénico. Este se encuentra presente en las rocas y sus minerales. Es movilizado por desintegración y lixiviación de rocas y procesos geoquímicos naturales (acentuado en muchos lugares por la actividad minera) y así liberado al ambiente, siendo el agua subterránea y superficial el recurso más afectado. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 16)

El origen natural de la presencia del arsénico en aguas subterráneas no está bien comprendido, pero se ha sugerido a la disolución o desorción de los minerales que constituyen el acuífero (principalmente óxidos metálicos) bajo condiciones oxidantes como el principal mecanismo responsable, en combinación con las bajas velocidades del flujo subterráneo, aunado a la evaporación.

Los factores más importantes que afectan la química del arsénico y, por tanto, su movilidad son los procesos químicos tales como disolución reductiva de óxidos y oxihidróxidos de hierro, la reducción de sulfato y la precipitación de pirita, las transformaciones biológicas y los procesos físico-químicos como la adsorción/desorción y el intercambio iónico. La concentración, especiación, movilidad y toxicidad del arsénico dependen, por supuesto, del pH, de las reacciones redox de disolución-precipitación, adsorción/desorción y de intercambio iónico que se lleven a cabo.

Entre los procesos fisicoquímicos implicados, los procesos de adsorción y de intercambio iónico son los que permiten llegar a una mejor descripción de muchos sistemas naturales. Aunque las concentraciones de arsénico en la atmósfera son habitualmente bajas, la atmósfera juega un papel fundamental porque los elementos traza son capaces de viajar largas distancias y transportados a zonas distantes. El arsénico entra en la atmósfera por procesos de erosión, emisiones volcánicas, emisiones en incendios forestales y otros procesos y retorna a la corteza terrestre por procesos de deposición seca y deposición húmeda. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 16)

Mientras que la calidad de las aguas superficiales se centra en el control de las emisiones de contaminantes, en el caso de las aguas subterráneas, la clave radica en identificar las áreas y los mecanismos que pueden facilitar la entrada de compuestos indeseados en el flujo de las aguas y en el desarrollo de predicciones fiables del transporte de contaminantes (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 16), pero también hay factores naturales como las geológicas que determinan la presencia del mismo en el agua subterránea.

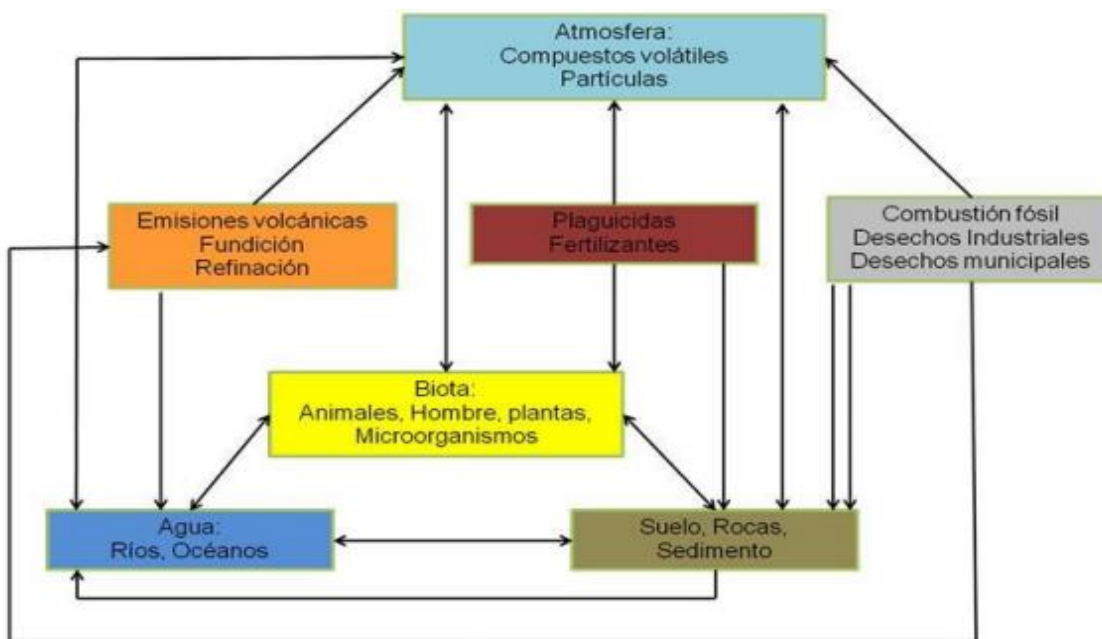
2.1.2.4. Origen antropogénico - Actividades contaminadoras de los sistemas acuáticos.

Aunque la mayor parte del arsénico que encontramos en las aguas es de origen natural, no podemos ignorar el As de origen antropogénico. Aun así, el origen del arsénico no determina su toxicidad, sino que ésta está determinada por la especie o grado de oxidación en el que el As se encuentre. El As ha sido utilizado frecuentemente a lo largo de los años en grandes cantidades y sin ningún tipo de control, tanto en la minería como en diferentes industrias, ya sea como insecticida, herbicida, raticida, en pinturas, imprenta, en medicina y en muchas más actividades. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 17-19)

A lo largo de este apartado se irán viendo cuáles son sus compuestos y qué usos tienen. Para empezar, es interesante ver qué ciclo sigue el arsénico, tanto el de procedencia natural como el de origen antropogénico. En la Figura 2.2 se muestra cómo el arsénico que forma parte del sedimento y las rocas, que son el punto de partida original de éste, se disuelve en el agua llegando a ríos y océanos de manera natural, o bien el hombre lo extrae con fines industriales, llegando igualmente a ríos y océanos, dónde éste entra en los ciclos vitales de los organismos vivos, y de ahí va a la atmósfera.

Así como el origen prevalente del arsénico presente en el agua es el natural, en el caso del arsénico presente en la atmósfera, juegan un papel muy importante las emisiones humanas de arsénico a partir de chimeneas, pinturas, pulverización de pesticida y riego de suelos áridos con agua cargada de As. Uno de los impactos derivados de la extracción humana de As de suelos y minas para fines antropogénicos crea una rotura del ciclo natural de éste, a la vez que una nueva incorporación al ciclo en grandes cantidades.

Figura 2.3. Ciclo del arsénico en el medio ambiente en el que el As sufre procesos de volatilización, de precipitación y de especiación.



Fuente: (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p.p. 18)

En cuanto a las concentraciones promedio que normalmente encontramos de arsénico en el agua, tanto superficial como subterránea, en ríos y acuíferos que no han sido contaminados por efluentes de minería u otras actividades antropogénicas, éstas son usualmente menores a 0,01 mg As/L; mientras que, en sitios cercanos a minas o lugares contaminados por minerales arsenicales, las concentraciones fluctúan entre 0,2 y 1 mg As/L como valor promedio. Eso no significa que no se hayan encontrado concentraciones muy superiores en determinados puntos.

También se ha observado que las concentraciones de As en el suelo son mayores en zonas agrícolas tratadas con plaguicidas arsenicales. Sucede lo mismo en el aire, en el que las concentraciones de arsénico también son mayores alrededor de áreas industriales emisoras de As. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 18)

Aunque el curso está orientado al medio acuático (concretamente el agua potable), la contaminación que encontramos en el aire y en los suelos, no está retenida, sino que puede ser

fácilmente arrastrada por la lluvia y así llegar fácilmente hasta los ríos y acabar contaminando también las aguas que pueden ser consumidas por humanos, plantas y otros animales. De modo que cuanto más se utilice As en la industria, más aumentamos la probabilidad de contaminación de las aguas y así las posibilidades de que alguna población acabe consumiendo aguas contaminadas. (Alarcón, Leal, Miranda, Benavides, & Martín, 2014, p. 19)

2.1.3. *Tecnologías convencionales, no convencionales y en estudio para remover arsénico.*

En general las tecnologías para remover As dependen de un proceso fisicoquímico básico que puede aplicarse solo, de manera simultánea o en secuencia: oxidación/reducción, coagulación-filtración, precipitación, adsorción e intercambio iónico, separación sólida/líquido, exclusión física, tecnologías de membrana, métodos biológicos, etc. (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p.p. 79 – 80).

No hay una regla para elegir las tecnologías de remoción, sobre todo cuando el agua para consumo humano proviene de una fuente de subterránea, y pueden ser apropiados diferentes enfoques para distintos casos. La Tabla 2.1 muestra una clasificación de las metodologías para remediación de arsénico en agua. Esta clasificación no es única y pueden encontrarse múltiples alternativas.

Tabla 2.1.

Metodologías para remediación de arsénico en agua.

#	Metodología	#	Metodología
1	Adsorción: Alúmina activada, sorbentes basados en hierro y nanomateriales y materiales geológicos.	6	Filtración por membrana: Ósmosis inversa, Nano/Ultra/Microfiltración y Electrodialisis.
2	Oxidación/reducción: fotoquímica e <i>in situ</i> .	7	Biorremediación: Biosorbentes y oxidación biológica
3	Precipitación: remoción con Fe/Mn.	8	

-
- | | | | |
|---|-------------------------|--|------------------------|
| 4 | Coagulación–filtración. | Sustitución de la fuente: Agua subterránea con menor contenido de As, Agua superficial tratada y Agua de lluvia. | |
| 5 | Intercambio iónico. | 9 | Ablandamiento con cal. |
-

Fuente: (Grupo AD HOC arsénico en agua, 2018, p.p. 79 – 80).

La mayoría de las tecnologías de remoción de As son eficientes cuando el elemento está presente en el estado pentavalente, principalmente como oxianiones H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} (pH 2-12). La forma trivalente es neutra (H_3AsO_3) hasta pH 9,2, y presenta menor capacidad para ser removida. Por ello, la mayoría de los métodos de remediación de As usan una etapa previa de oxidación para transformar todo el As en As(V), sin embargo, la oxidación sin la ayuda de otras transformaciones físicas o químicas no elimina el As del agua, sino que debe acompañarse de otro tratamiento que elimine el elemento de la solución. Como es obvio, la ebullición del agua para la purificación no elimina el As; por el contrario, este proceso aumenta la concentración de As por evaporación, hecho comúnmente ignorado por las personas que podrían resultar afectadas.

2.1.4. Referencia de contenido de arsénico en agua.

Altamirano & Delgado (2020) evaluaron el contenido de arsénico en la Comunidad de La Fuente localizada al NE del complejo volcánico Momotombo-El Hoyo y cerca de la Caldera Monte Galán, donde 112 familias se abastecen de agua subterránea, se determinó la concentración de arsénico total en agua de 30 pozos excavados, tres pozos perforados y un manantial.

Las concentraciones de arsénico oscilaron en el rango desde 2 $\mu\text{g/L}$ (Casas de Rafaela Rojas y Porfirio Reyes) hasta 103 $\mu\text{g/L}$ en el manantial Aguas Calientes (La Chistatosa). El 70% de las muestras analizadas (24 fuentes) exceden el límite nacional adoptado por el país de 10 $\mu\text{g As/L}$ para agua de consumo humano (CAPRE, 1994). Los sitios con las mayores temperaturas (35,6 a 45,8 $^\circ\text{C}$) son los que presentan las mayores concentraciones de arsénico (38 a 103 $\mu\text{g/L}$), mayores valores de conductividad eléctrica (983 – 1140 $\mu\text{S/cm}$) y menores valores de pH (5,80 – 7,08 unidades).

Los pobladores fueron informados sobre el riesgo al que están expuestos por ingerir agua contaminada con altos valores de este tóxico; a la vez que se identificaron fuentes seguras de agua para consumo humano, las cuales fueron recomendadas a los usuarios. Por lo que, Altamirano & Delgado (2020), además de generar información científica, se convierte en una herramienta para apoyar en la toma de decisiones por parte de las autoridades, y cambio por parte de los pobladores locales en el uso de fuentes alternativas para agua de consumo humano y de preparación de sus alimentos.

2.1.5. Referencia del consumo de agua en una comunidad nicaragüense.

Toruño, Cruz, Urbina, Flores, & Lanzas (2017) realizaron un estudio sobre el consumo percapita de agua potable en el sistema denominado El Tanque, municipio de Posoltega localizado específicamente 5 Km al suroeste de la cabecera municipal, carretera Panamericana León-Chinandega. Dicho estudio describe que el sistema de agua potable Miniacueducto por bombeo eléctrico (MABE) de El Tanque fue construido por el programa PALESA (CARE COSUDE) en el año 2000. En censo practicado en febrero 2016 como parte de este estudio, se encontró que el sistema beneficia a un total de 169 hogares, de los cuales se encuestó al 100% y se procesaron 145 encuestas, que equivalen al 86%. Con una densidad poblacional de 738 habitantes.

Las encuestas que no se procesaron son tomas instaladas en lugares públicos (2 iglesias) y las restantes son usuarios que no están activos o no tienen medidor. En el año 2015, el consumo máximo y mínimo per cápita en la comunidad El Tanque fueron de $3,57 \text{ m}^3$ y $2,4 \text{ m}^3$ con un promedio de $3,1 \text{ m}^3$. También se determinó que los consumos mensuales per cápita del 2015 son mayores que los de 2014. Todos los consumos promedio mensuales están por encima de la Norma Rural Nacional (NTON 2001) = 60 litros por persona al día (lppd) = $1,8 \text{ m}^3$ al mes.

También se puede observar que el consumo per cápita de agua en tiempo de verano y en la canícula el consumo llegó a su valor máximo $3,57 \text{ m}^3$. En el mes de mayor precipitación y temperatura menos cálida (Diciembre) el consumo es de $2,40 \text{ m}^3$ y en el mes más seco y altas temperatura (Agosto) el consumo es de $3,57 \text{ m}^3$.

2.1.6. Adsorción.

La adsorción es un fenómeno de transferencia de materia entre fases, el cual se utiliza ampliamente en los tratamientos para eliminar sustancias de las fases fluidas. Este se puede definir como: “el enriquecimiento de especies químicas de una fase fluida en la superficie de un sólido”. Este enriquecimiento crea una fase intermedia llamada interface, donde tiene lugar la adsorción entre la fase líquida que tiene el componente que deseamos eliminar y el otro componente que es el adsorbente. (Castelló, 2017)

En la fase fluida debe estar el componente a adsorber disuelto en el líquido. En resumen, estos procesos de adsorción necesitan 2 fases: la fase sólida o adsorbente y la fase líquida que es donde se encuentra el adsorbato.

La eficacia del proceso de adsorción está influenciada por una gran variedad de parámetros, entre ellos la interacción entre el fluido y el adsorbente, la superficie específica de éste, el tamaño de la molécula, la temperatura, el pH y el tiempo de contacto. Así pues, es fundamental el tipo de adsorbente elegido. Un adsorbente muy utilizado es el carbón activo, aunque también se emplean otros adsorbentes inorgánicos como las zeolitas, la vermiculita o el vidrio volcánico. (Castelló, 2017)

La principal característica de la adsorción es la capacidad que tiene de retener al adsorbato en sus paredes, es decir, en la superficie. Por ello, los adsorbentes deben presentar una alta superficie por unidad de masa. El carbón activo presenta una alta superficie por unidad; es decir, tiene una alta capacidad de adsorción por lo cual cumpliría los requisitos que necesitamos para nuestro trabajo.

Además, si seleccionamos el carbón activo como adsorbente, tendremos acceso a una amplia variedad de selección. Esto se debe al hecho de que el carbón activo puede ser producido a partir de diferentes materiales que contengan mayoritariamente carbono en su estructura molecular. Los materiales más comunes son: la madera, el carbón de leña, el lignito, la turba, el serrín, residuos plásticos, etc.

2.1.6.1. Cinética de adsorción.

En los casos generales, el equilibrio de adsorción no se establece instantáneamente, esta afirmación es correcta en adsorbentes porosos ya que la transferencia de masa de la disolución a los sitios donde tiene lugar la adsorción (dentro de las partículas adsorbentes) está limitada por resistencias de transferencia de masa que determinan el tiempo requerido para alcanzar el estado de equilibrio. Este progreso temporal donde tiene lugar la adsorción se denomina cinética de adsorción. (Castelló, 2017)

La velocidad de adsorción se limita generalmente mediante procesos de difusión hacia la superficie adsorbente externa (difusión externa) y dentro de las partículas adsorbentes porosas (difusión interna). Las investigaciones realizadas sobre la cinética de adsorción son necesarias para aclarar los límites de los mecanismos de transferencia de masa y para evaluar los parámetros característicos de transferencia de masa. Los parámetros de transferencia de masa, al igual que los de equilibrio, son datos de entrada esenciales para la determinación de los tiempos de contacto requeridos en reactores de suspensión, así como para el diseño de adsorbedores de lecho fijo.

El progreso del proceso de adsorción puede caracterizarse en cuatro etapas:

1. El transporte del adsorbato desde la fase líquida a la capa límite hidrodinámica localizada alrededor de la partícula adsorbente.
2. El transporte a través de la capa límite a la superficie externa del adsorbente, denominada difusión de película o difusión externa.
3. El transporte al interior de la partícula adsorbente por difusión porosa y/o por difusión superficial.
4. La interacción energética entre las moléculas de adsorbato y los sitios donde tiene lugar la adsorción final.

Generalmente, la primera y la cuarta etapa son muy rápidas con lo que la velocidad total del proceso de adsorción no se ve afectado. Por ello, la velocidad total del proceso de adsorción se determina mediante procesos por difusión de película (difusión externa) y/o intraparticular (difusión interna). (Castelló, 2017)

2.1.7. Carbón activado.

El carbón es un mineral de origen orgánico constituido básicamente por carbono. Su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años. Las plantas al descomponerse forman una capa llamada turba. Hay tres tipos básicos de carbón (Manual del Carbón Activado, 2016, pág 7):

- ✓ Lignito: Se forma una vez comprimida la turba. Es el carbón de menor valor calórico, porque se formó en épocas más recientes y contiene menos carbón (30%) y más agua. Es una sustancia parda y desmenuzable en la que se pueden reconocer algunas estructuras vegetales.
- ✓ Hulla: Se origina por la compresión del lignito. Tiene un importante poder calorífico por lo que se utiliza en las plantas de producción de energía. Es dura y quebradiza, de color negro. La concentración de carbono está entre el 75 y el 80%.
- ✓ Antracita: procede de la transformación de la hulla. Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calorífico. Arde con dificultad, pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro, brillante y muy duro. Tiene una concentración de hasta el 95% de carbono.

Con el término genérico de carbón se conoce a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente. Los átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 8)

Una de las maneras más sencillas de diferenciar los carbones que se encuentran en la naturaleza de aquellos que son fabricados por el hombre, es de acuerdo al grado de ordenamiento de sus átomos. En el extremo de mayor orden se encuentra el diamante y poco antes de éste el grafito. De acuerdo con esto un carbón estará más ordenado mientras su proceso de formación se haya llevado a cabo a mayor temperatura y a mayor tiempo. Se puede encontrar en varios formatos; stick, granos, pequeños trozos e incluso en forma de esponja, siendo este último el menos efectivo. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 9)

Los carbones activados son materiales porosos, amorfos y preparados químicamente para que tengan un elevado grado de porosidad y alta superficie específica interna (Soto, 2007). Estas características, junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo componen, le dan la propiedad de atraer y atrapar ciertas moléculas del fluido que rodea al carbón. A esta propiedad se le llama “adsorción”; al sólido que adsorbe se le denomina adsorbente y a la molécula atrapada, adsorbato.” (García & Granillo, 2016, pág. 11)

Se trata de un material poroso que se obtiene por carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie intraparticular. La elevada superficie específica facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 11)

La actividad del carbón activo en los procesos de adsorción viene dada fundamentalmente, por la naturaleza de la materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción del mismo. Su capacidad absorbente se ve muy favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares, dada su estructura química, además las reacciones químicas en su superficie están influenciadas por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde los carbones tienen electrones desapareados y valencias insaturadas presentando mayor energía potencial. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 11; Garcia & Granillo, 2016, pág. 12)

2.1.7.1. Propiedades del carbón activado.

En la actualidad, el carbón activado es utilizado para remover color, olor y sabor de una infinidad de productos, por lo cual lo podemos encontrar en aplicaciones tan sencillas como peceras o filtros de refrigerador, hasta complejos sistemas industriales como modernas plantas de tratamiento de aguas residuales o delicados sistemas de elaboración de antibióticos. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 13)

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, su buena porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los

microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 13)

Por otra parte, el carbón activado tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes...), mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente. De ahí que más de 190 000 toneladas al año (de las 375 000 producidas) se destinen a la eliminación de contaminantes procedentes de sectores muy variados, tanto en fase gas (sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, vapores de gasolinas...) como líquida (aguas potables, industriales y residuales, tintorerías...). (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 13)

Finalmente, cuando la sustancia a eliminar tiene una polaridad apreciable, bajo volumen molecular y está muy diluida en aire, la retención a temperatura ambiente por el carbón sólo es efectiva si se impregna con reactivos específicos o se aprovechan las propiedades catalíticas del carbón. De esta manera, tras la adsorción se producen unas reacciones químicas que transforman los productos tóxicos en inertes que se desorben o quedan retenidos en la porosidad del carbón. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 14)

2.1.7.2. Características del carbón activado.

2.1.7.2.1. Composición química.

El término carbón activo designa un amplio espectro de materiales que se diferencian fundamentalmente en su estructura interna (distinción de poros y superficie específica) y en su granulometría. Desde el punto de vista de la composición química, el carbón activo es carbón prácticamente puro, al igual que lo es el diamante, el grafito, el negro de humo y los diversos carbones minerales o de leña.

Todos ellos poseen la propiedad de adsorber, que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido llamado adsorbente atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos y que están contenidas en un líquido o gas. La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75 – 80% en carbono, 5 – 10% en cenizas, 9,5 – 14,5% en oxígeno y 0,5% en hidrógeno. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 15)

2.1.7.2.2. Estructura física.

Según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists), los poros se clasifican en base al diámetro de los mismos, de acuerdo a lo siguiente (García & Granillo, 2016, pág. 12):

- ✓ Microporo: Menores a 2 nm (20Å), realizan la adsorción y contribuyen a la mayor parte del área de la superficie interna.
- ✓ Mesoporos: Entre 2 y 50 nm (20Å y 500Å) y realizan el transporte.
- ✓ Macroporos: Mayores a 50 nm (500Å) (típicamente de 200 a 2000 nm) y son la vía de entrada al carbón activado.

Los microporos tienen un tamaño adecuado para retener moléculas pequeñas que aproximadamente corresponden a compuestos más volátiles que el agua, tales como olores, sabores y muchos solventes. Los macroporos atrapan moléculas grandes, tales como las que son cloradas o las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) que se generan al descomponerse la materia orgánica. Los mesoporos son los apropiados para moléculas intermedias entre las anteriores. (Manual del Carbón Activado, 2016, pág. 16)

2.1.8. Columnas de adsorción.

La columna o torre utilizada en química es una instalación que se usa para realizar determinados procesos como son la destilación, la absorción, la adsorción, el agotamiento, etc; y cuya utilidad es la de separar los diversos componentes de una mezcla simple o compleja. (Castelló, 2017, pág. 56)

Las columnas son dispositivos cilíndricos, de altura mayor que su diámetro, que pueden ser de diversos tipos:

1. Columnas de platos perforados: consta de una serie de platos perforados, que pueden llevar a su vez válvulas o campanas, colocados a alturas diferentes y a intervalos regulares, con el fin de dispersar una de las fases.
2. Columnas de relleno: se diferencian de las anteriores por tener su interior ocupado por un relleno de anillos (llamados anillos de Raschig) o de material perforado. En estas columnas lo más importante es la mayor superficie de contacto ofrecida por el relleno.
3. Columnas de platos de campanas.
4. Columnas de platos de válvulas.

2.1.8.1. Características de las columnas de adsorción.

a. Columnas de flujo descendente.

1. Se dan en ellas procesos de adsorción y filtración simultáneos.
2. Se requieren lavados de la superficie filtrante más frecuentes.
3. Se produce una más rápida obstrucción de poros por aglomeración de partículas coloidales (en suspensión), lo que exige limpieza y regeneraciones más frecuentes del carbón, disminuyendo así su vida activa.

b. Columnas de flujo ascendente.

1. La densidad de las partículas aumenta a medida que pasa el tiempo en servicio, como consecuencia de la retención de materiales.
2. El lecho tiende a expandirse respecto de su posición de reposo en parado.
3. Se generan finos por atrición de partículas, pudiendo escapar con la corriente de salida.

Los sistemas o culminas pueden operar, según los casos, por presión o por gravedad. En uno y otro caso, la complejidad de la operación y el coste debidos a la mayor o menor necesidad de tubos y válvulas, dependerá del modelo de disposición para el flujo y del número de columnas instaladas. (Columnas de Adsorción, 2006)

2.2. Antecedentes

Para el estudio, se tomó como punto de partida los resultados obtenidos en investigaciones realizadas anteriormente con un objeto similar, para tener en cuenta las concepciones de otros autores con respecto al tema de investigación.

Internacionales

Hussam, en el 2002, desarrolló el filtro SONO en Bangladesh, el cual consiste en un sistema de filtración de dos pasos que funciona mediante una matriz de hierro compuesto, carbón vegetal, arena de río, y esquirlas de ladrillo. En el primer paso se elimina el arsénico, y en el segundo, además de las partículas más finas, se eliminan otros contaminantes. El filtro SONO, es un sistema de filtración que no utiliza sustancias químicas y que no precisa que el agua haya sido tratada previamente. Fabricar un filtro SONO cuesta unos 35 dólares EE.UU. Cada filtro puede producir entre 20 y 50 litros de agua depurada por hora, suficiente para abastecer a una o dos familias, y tiene una garantía de cinco años de vida útil. (Bangladesh Patente nº 1003935, 2002)

Soto, 2018 realizó un estudio en Argentina donde desarrolló estrategias tecnológicas para la remoción de arsénico en aguas subterráneas mediante el empleo de geomateriales, donde diseñó un sistema simple y de bajo costo para la remoción de este contaminante, mediante extrudados de material ferruginoso rico en minerales de arcilla y especies oxídicas de hierro colocados eventualmente en un filtro con capacidad de hasta 2000 L/día dirigido a zonas rurales o periurbanas de muy baja densidad poblacional (escuelas, barrios, caseríos, etc.). El sistema experimental de eliminación de As en aguas está conformado por tres tanques rotoplásticos conectados por tubos PVC, distribuidos de así, tanque 1 donde ocurre el proceso de adsorción, tanque 2 en el cual se completa la sedimentación y tanque 3 que corresponde al almacenamiento del agua en condiciones de consumo ($10 \mu\text{g/l}$, < 3 Unidades Nefelométricas de turbidez (NTU)). (Soto, 2018)

Jiménez-Penagos, 2020, planteó en Colombia un diseño conceptual de un sistema piloto de columna de adsorción de lecho fijo, utilizando materiales de 3 diferentes tipos de biomásas modificados con nanopartículas de carbón activado. El diseño se formuló a partir de simulaciones apoyadas por el software FAST, fundamentados en el sistema de modelación de difusión homogénea de superficies y el modelo de Isoterma de Freundlich, en base a los parámetros de condiciones iniciales del agua residual a tratar, variando los parámetros de trabajo como la masa, la porosidad y el caudal de flujo, esto para definir si su posterior reúso era viable o no. Los resultados indican que, la columna reduce al 99% la concentración de contaminantes. (Jiménez-Penagos, 2020)

Nacionales

A nivel nacional se realizó la búsqueda de tesis, monografías, seminarios o trabajos de fin de curso en los repositorios de la UNAN-Managua, UNI, UCA, UNAN-León, URACCAN, en los cuales no se encontraron investigaciones relacionadas al diseño de un sistema de columnas de adsorción tanto teórico como ejecutado de un sistema de columnas de adsorción con carbón activado a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico. Es importante mencionar que se encontraron investigaciones donde desarrollan pruebas de remoción de arsénico con diferentes tipos de carbón activado, pero no un diseño de columnas que sirva a las comunidades que sufren de la problemática de arsénico en agua.

2.3. Preguntas directrices

En base al planteamiento del problema y su delimitación surgen las preguntas o directrices de investigación:

1. ¿Cuál sería el mejor carbón activado a utilizar como agente adsorbente en el diseño del sistema de columnas?
2. ¿Cuáles serían las dimensiones y capacidad de un sistema de tratamiento para remover arsénico?
3. ¿Cuál es el diseño para un sistema de filtración que permita una remoción efectiva de arsénico a escala de laboratorio con proyección a uso en las comunidades?
4. ¿Cuál es el costo de fabricación del diseño despreciando el valor del carbón activado?

Capítulo III

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Descripción del ámbito de estudio y tecnológico.

El ámbito de estudio a nivel geográfico corresponde al Departamento de Química, Recinto Universitario “Rubén Darío” de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua) ubicada de la Rotonda Universitaria Rigoberto López Pérez, 150 metros al Este.

El área tecnológica del presente estudio corresponde a las líneas de investigación de la carrera de Química Ambiental. Específicamente en el *área de formación académica Ambiental, línea de investigación Control de Calidad Ambiental y tema de interés Desarrollo de procesos de separación basados en lixiviación, extracción con solventes, adsorción, intercambio iónico, precipitación o tecnologías de membrana.*

3.1.2. Tipo de estudio.

De acuerdo al nivel inicial de profundidad del conocimiento es *exploratorio* puesto que en base a la búsqueda de antecedentes no se encontraron investigaciones a nivel nacional que fundamenten el diseño de un sistema de columnas de adsorción únicamente con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico (Piura, 2012). Partiendo de la exploración se procede a realizar una *descripción* de las variables en estudio, con el propósito de hacer énfasis en el diseño del sistema de columnas de adsorción, llegando al punto de investigación de la propuesta.

De acuerdo, al tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información, el estudio es *prospectivo*, puesto que los datos fueron obtenidos durante la investigación únicamente basados en fórmulas y referencias de volúmenes de agua necesarios en consumos diarios, para determinar el tamaño del diseño. Por el período y secuencia del estudio es *transversal* puesto que la asociación del caudal de agua a tratar con el diseño del sistema de columnas de adsorción se realizó en un solo momento o periodo de tiempo. (Canales, Alvarado, & Pineda, 1996).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población.

La población corresponde a una parte del universo que se desea estudiar (Piura, 2012). en base al tema de investigación y las variables la población está definida por todos los sistemas de tratamiento de aguas naturales, con el propósito de eliminar contaminantes y llevarlas a parámetros aptos al consumo humano.

3.2.2. Muestra.

La muestra es una parte de la población que se aísla para ser estudiada (Piura, 2012), bajo este concepto se define como la muestra de investigación los sistemas de tratamiento de aguas naturales con medios de adsorción, específicamente sistemas equipados con carbón activado que permitan la eliminación de arsénico.

3.2.2.1. *Criterios de inclusión*

Los criterios de inclusión en una investigación son los parámetros que definen las características globales de la muestra, los cuales corresponden a:

- a. Medio adsorbente carbón activado.
- b. Sistema de columnas con carbón activado.
- c. Flujo volumétrico de tratamiento de agua para una vivienda rural.

3.2.2.2. *Criterios de exclusión*

Los criterios de exclusión en una investigación son los parámetros que definen las características que no son necesarias en la muestra, los cuales corresponden a:

- a. Procesos de separación basados en lixiviación, extracción con solventes, intercambio iónico, precipitación o tecnologías de membrana.
- b. Sistemas de tanques tipo Batch (flujo discontinuo) o CSTR (flujo continuo).
- c. Flujo volumétrico de tratamiento de agua a escala industrial.

3.3. Variables

3.3.1. Variables independientes.

Las variables independientes se conocen como las condiciones o parámetros que serán manipulados por los investigadores, en la presente investigación corresponden a las siguientes:

- a. Tipo de carbón activado a carbón activado que se debería utilizar como agente adsorbente en el diseño.
- b. Las dimensiones del sistema de tratamiento.
- c. La capacidad del sistema de tratamiento para remover arsénico.

3.3.2. Variable dependiente.

La variable dependiente se conoce como el problema, situación o fenómeno que debe ser resuelto por los investigadores, en la presente investigación corresponde a la siguiente:

- a. Diseño para un sistema de filtración que permita una remoción de arsénico efectiva como proyección para ser usado en las comunidades que presenten problemáticas con la presencia de As.

3.4. Materiales

3.4.1. Materiales para recolectar información.

La recolección de información para sustentar y concretar el desarrollo de la investigación se realizó mediante las siguientes fuentes, materiales y herramientas de investigación:

- ☞ Libros.
- ☞ Monografías y seminarios.
- ☞ Artículos científicos.
- ☞ Publicaciones de sitio web.
- ☞ Fichas de citas textuales.

3.4.2. Materiales para procesar la información.

La información fue presentada por medio de tablas, gráficos, diagrama de flujos y equipos. La información fue procesada con la ayuda de los siguientes softwares:

- ☞ Microsoft Word 2019 versión 16.1.6746.2048: Tablas, trabajo escrito.
- ☞ Microsoft Power Point 2019 versión 16.1.6746.2048: Imágenes, figuras, diapositivas.
- ☞ Microsoft Excel 2019 versión 16.1.6746.2048: Estimación de costos.
- ☞ Programa de diseño gráfico SKETCHUP.

3.5. Métodos

3.5.1. Método de investigación.

El método de investigación empleado en este estudio corresponde a un *enfoque cualitativo*, puesto que realizó un análisis de contenido bibliográfico y se dará salida a una parte de los objetivos planteados, además para cumplir el alcance de la investigación es necesario emplear a su vez herramientas cuantitativas o numéricas, las cuales permiten llevar a cabo los diferentes cálculos necesarios para el diseño del sistema de columnas de adsorción.

3.5.2. Matriz comparativa.

La matriz comparativa es una tabla de doble entrada que muestra información de una forma resumida y concentrada a través de columnas y filas. Esta se empleó para comparar las características de dos diferentes carbones activados elaborados a nivel internacional y uno nacional, los cuales han sido evaluados para remover arsénico, con el propósito de proponer el posible carbón activado a emplear en el diseño del sistema de columnas de adsorción si se llega a ejecutar.

3.5.3. Capacidad del diseño.

La capacidad de tratamiento del diseño está definido por el caudal estimado a partir de la referencia de Toruño, Cruz, Urbina, Flores, & Lanzas (2017) en base a su estudio sobre el consumo percapita de agua potable. Los resultados indican que en tiempo de verano y en el mes de mayor precipitación y temperatura menos cálida en promedio hay un consumo de agua per cápita del **3,1 m³ mensual**. Por lo tanto, para conocer **el volumen de consumo diario por una persona**, se divide el consumo de agua per cápita entre los días promedio de un mes, equivalente a 30, siendo así el volumen de **103,3 litros**.

Para determinar la cantidad de agua a tratar, se debe considerar el número de habitantes promedio en la comunidad; según el VIII censo de población y IV de vivienda realizado por el INIDE, en el municipio de Posoltega (al que pertenece la comunidad el Tanque) el promedio de habitantes por vivienda es de 6 personas (Rodríguez, 2005). Por lo tanto, se multiplican los 103,3 lppd por 6 habitantes/vivienda, donde el **volumen total** es de **619,8 L/día**, siendo este es el *caudal* que se propone para definir el dimensionamiento del diseño.

3.5.4. Concentración de arsénico inicial y final de arsénico.

La concentración de arsénico inicial se determinó en base a la información obtenida por Altamirano & Delgado (2020) quienes evaluaron el contenido de arsénico en la Comunidad de La Fuente localizada al NE del complejo volcánico Momotombo-El Hoyo y cerca de la Caldera Monte Galán. Durante la fase de campo encontraron diferentes concentraciones de arsénico, en dependencia de los puntos de toma de muestra, por lo tanto, como referencia se consideró la concentración más alta, la cual corresponde a **103 µgAs/L ≈ 0,103 mgAs/L**, conductividad eléctrica de 1140 µS/cm y pH entre 5,80 – 7,08 unidades de pH.

Para determinar la concentración final de arsénico se realizó la revisión de las normas CAPRE, las cuales indican que el tipo de agua para consumo humano es del tipo 1; por lo tanto, el contenido de arsénico total después del tratamiento debe ser menor a **10 µgAs/L ≈ 0,01 mgAS/L**.

3.5.5. Condiciones de operación.

Las condiciones de operaciones, determinan las concentraciones a las cuales se someterá el equipo diseñado, caudal y adsorción, estos se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1.

Parámetros de operación.

Parámetro	Concepto	Valor	Fuente
C_i	Concentración de entrada	0,103 mg/L	(Altamirano & Delgado, 2020)
C_f	Concentración final	0,01 mg/L	
Q	Caudal	619,8 L/d	(Toruño, Cruz, Urbina, Flores, & Lanzas, 2017)
ρ	Densidad del fluido	995,6 Kg/m ³	(Propiedades del agua en función de su temperatura, s.f.)
μ	Viscosidad dinámica	797,7 x10 ⁻⁶ Kg/m·s	
ν	Viscosidad cinemática	0,801x10 ⁻⁶ m ² ·s	(Solano, s.f.)
\emptyset	Esfericidad	0,54	(Masciarelli, Masciarelli, & Fernando, 2018)
ε	Porosidad	0,554	(Leyva-Ramos, Ocampo-Pérez, Torres-Rivera, Berber-Mendoza, & Medellín-Castillo, 2009)
V_p	Volumen de partícula	9,65x10 ⁻⁷ m ³	
t_f	Tiempo de funcionamiento	30 min	(Ures, Jácome, & Suárez, 2014)
H_L	Carga hidráulica superficial	5 m/h	

Los parámetros del carbón activado y función estacionaria, se establecieron en base a los valores establecidos en condiciones de operación por rangos estándar encontrados en la bibliografía (Anexo 1); los valores de la densidad y viscosidad para el agua es a condiciones de temperatura de 30 °C. Fuente: Recopilado por autores.

3.5.6. Dimensionamiento de lecho de carbón activado.

Se procedió a diseñar el sistema de columnas de adsorción basado en un diseño continuo en paralelo a través de los contactares, con el propósito de poder quitar las columnas para su debido mantenimiento. Para ello, se emplean las ecuaciones presentadas en la tabla 3.2.

Tabla 3.2.

Ecuaciones para el dimensionamiento de lecho de carbón activado.

Parámetro a medir	Ecuación	Numero	Fuente
Tiempo efectivo de contacto (τ). <i>Donde: ε_b (fracción de huecos en el lecho de carbono, V_b (volumen del lecho o carbón) y Q es el caudal.</i>	$\tau = \frac{V_b * \varepsilon_b}{Q}$	Ec.1	(Reddy, 2021)
Tasa de carga hidráulica (H_L). <i>Dónde: Q es el caudal y A_T es el área trasversal.</i>	$H_L = \frac{Q}{A_T}$	Ec.2	
Altura de lecho (H_{LCT}).	$H_{LCT} = \frac{V_b}{A_T}$	Ec.3	(De Avila, Puello, & Castilla, 2019)
Volumen de rendimiento (V_L).	$V_L = Q * t_f$	Ec.4	(Ures, Jácome, & Suárez, 2014)
Altura total de la columna (H_{CT}).	$H_{CT} = 1,2 * H_{LC}$	Ec.5	
Altura de cada lecho por columna (H_{LC}). <i>Donde n es el número de columnas.</i>	$H_{LC} = \frac{H_{LCT}}{n}$	Ec.6	(De Avila, Puello, & Castilla, 2019)
Altura de cada columna (H_C).	$H_C = \frac{H_{CT}}{n}$	Ec.7	
Velocidades de filtro (v_f).	$v_f = \frac{Q}{A_T}$	Ec.8	(Ures, Jácome, & Suárez, 2014)
Área transversal de un cilindro.	$A_T = \pi * r^2$	Ec.9	

Diámetro (D).	$D = 2 \cdot r$	Ec.10	(Área de Superficie de los Cilindros, 2021)
Numero de Reynolds (Re) en conducción hidráulica.	$Re = \frac{D \cdot v_f \cdot \rho}{\mu}$	Ec.11	(Vélez, 2017)
Área transversal para tuberías.	$A_r = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ext}^2 - d_{int}^2)$	Ec.12	
<i>Donde: d_{ext}^2 y d_{int}^2 son los cuadrados de los diámetros externos e internos.</i>			
Velocidad de flujo (V).	$V = \frac{Q}{A_T}$	Ec.13	(Pérez & Renedo, 2019)
Numero de Reynolds para tuberías (Re).	$Re = \frac{V \cdot L_c}{\nu}$	Ec.14	
<i>Dónde: L_c es el diámetro interno y ν es la viscosidad cinemática.</i>			
Factor de fricción para flujo laminar (f).	$f = \frac{64}{Re}$	Ec.15	
Perdida de presión (ΔP_L)	$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2}$	Ec.16	(Cengel & Cimbala, 2006)
<i>Dónde: L es la longitud y D es el diámetro interno del tubo.</i>			
Perdida de carga (h_L).	$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho \cdot g}$	Ec.17	
<i>Donde g es la gravedad: $9,81 \frac{m}{s^2}$.</i>			
Volumen de partícula (V_p).	$V_p = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3$	Ec.18	(Masciarelli, Masciarelli, & Fernando, 2018)
<i>Donde D_p es el diámetro de partícula.</i>			
Expresión de Ergun:	$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot v}{(\phi \cdot D_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{\phi \cdot D_p}$	Ec.19	

Caída de presión y pérdida de carga para las tuberías y lechos de carbón.

$$\Delta P_T = \Delta P_L + \Delta P_{LC}$$

Ec.20

(De Avila, Puello, & Castilla, 2019)

Fuente: Recopilación de los autores.

3.5.7. Diseño del sistema de columnas de adsorción.

El diseño del sistema de columnas de adsorción consiste en la estructuración esquemática de todo el equipo propuesto, adaptando las columnas de adsorción a las tuberías y tanques con las condiciones que se calcularon. Por lo tanto, se realiza el esquema en 2D.

3.5.8. Estimación del costo requerido para construir el sistema de columnas.

Para la estimación del costo que se requeriría para construir el diseño propuesto se emplea el programa de Microsoft Excel, detallando cada uno de los materiales a utilizar a excepción del carbón activado puesto que no hay una estimación del valor del mismo. Se procedió a visitar la ferretería Jenny ubicada en el mercado Roberto Huembés de Managua, Casa del Tanque, SINSA y ferreterías minoritarias, para realizar la cotización de los precios unitarios de cada material, luego se calcula en base a las dimensiones del diseño el precio total de cada material a utilizar hipotéticamente se realice su construcción, así mismo se consigna el precio de todo el diseño.

Capítulo IV

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Selección del carbón activado.

Para la posible propuesta de carbón activado a emplear en el sistema de columnas de adsorción, se realizó la búsqueda en bases de datos sobre investigaciones que presenten la elaboración del carbón activado con diferentes tipos de origen y que hayan sido evaluados en su capacidad de adsorción por medio de isothermas de adsorción de Langmuir.

El análisis documental se realizó empleando una matriz comparativa contrastando los diferentes parámetros que se requieren para un mejor porcentaje de remoción y dimensionamiento de las columnas. Los datos se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.

Matriz comparativa de parámetros para la selección del carbón activado.

Parámetro	Autores		
	(Hidalgo & Rivera, 2017)	(Mendieta, 2008)	(Condori, 2019)
Origen del carbón activado.	Bagazo del café	Semilla de nancite	Lemna Gibba (lenteja de agua)
Condición de activación.	Activación química con ácido fosfórico al 40%.	Activación química con Hidróxido de sodio 0,4 M.	Activación química con Cloruro Férrico al 40%.
Área superficial (m ² /g)	1024,3655	700	1035
Porosidad.	Microporoso	Mesoporoso	Microporoso
Densidad aparente (g/mL).	0,6013	-	0,50
pH.	6,064	7	7,12

Eficiencia.	56%	69,80%	97,60%
Factor de Langmuir (a).	0,0081	0,18	1.6369
Factor de Langmuir (b).	2,2195	1,26	2,0697
R ² .	0,978.	0,9622	0,9736
R _L .	0,459	-	-
Tiempo de residencia (min).	10	60	30

Fuente: Autores.

4.1.1.1. Análisis del carbón activado de Hidalgo & Rivera (2017)

El pH tiene valor similar y ligeramente ácido en relación a los carbones activados comerciales, esto indica que tiene una capacidad de adsorción del material normal ya que a pH bajos la capacidad de adsorción disminuye, y estos carbones tienen pH muy próximos a 7 el cual es neutro. La densidad aparente mide la razón del material seco sobre su volumen y al tener un valor bajo existe alta porosidad en el carbón activado, lo mencionado se confirma con el número de yodo el cual al tener 845,67 mg/g, indica que tiene mayor porosidad, esto quiere decir mayor número de microporos, por lo tanto, mejor capacidad de adsorción.

De acuerdo a la isoterma de Langmuir el área superficial por su valor indica que tiene menor tamaño de partícula y los poros son muy pequeños, por lo tanto, el área superficial tiende a ser mayor. Además, reporta que la superficie del carbón activado es homogénea y la adsorción ocurre formando monocapas. El parámetro de equilibrio (RL) entre 0 y 1 confirma que la capacidad máxima de adsorción es elevada, por lo tanto, favorecen la adsorción del adsorbato.

4.1.1.2. *Análisis del carbón activado de Mendieta (2008)*

El pH tiene valor neutro el cual mejora la adsorción de las moléculas a eliminar. Al no reportar el valor de la densidad aparente y en contraste con el área superficial relativamente baja se comprende que la capacidad de adsorción ha sido influenciada por el pH al ser del 69,80%. De acuerdo al tamaño medio del poro de 28 amstrong es un tipo de carbón mesoporoso y al no presentar el número de yodo no se puede argumentar que en otras condiciones de experimentación para remover arsénico sea efectiva al porcentaje mencionado. Se puede inferir de acuerdo a la isoterma de Langmuir y el tiempo de residencia que prácticamente puede existir una saturación del carbón y la eficiencia con el tiempo disminuye generando variaciones en el procedimiento.

4.1.1.3. *Análisis del carbón activado de Condori (2019)*

El pH tiene un valor mayor de 7, esto influye directamente en la adsorción del material ya que a pH mayores o iguales a 6 aumenta la capacidad adsortiva del carbón. La densidad aparente al ser menor incrementa la capacidad adsortiva y con el número de yodo de 827,79 mg/g (Condori, 2019), se confirma una mayor porosidad, por lo tanto, mayor número de microporos, mejorando la eficiencia en un 97,60% y con un tiempo de residencia comprendido por 30 minutos presenta la mejor capacidad de adsorción. Lo antes mencionado se corrobora con los valores de la isoterma de Langmuir y el área superficial.

4.1.1.4. *Carbón activado propuesto*

La capacidad de adsorción del carbón activado depende de varios parámetros que demuestran indirectamente su microporosidad, siendo los principales el número de yodo y el área superficial, los cuales indican la proporción de los poros, su tamaño y el área de contacto en el que la muestra puede estar con el carbón activado. Además, es inversamente proporcional al tamaño de las partículas, contenido de humedad, densidad aparente y cenizas totales, siendo directamente proporcional al pH, número de yodo y área superficial.

Por lo tanto, en base a lo mencionado y la eficiencia se hace la propuesta del carbón activado si se llega a construir el equipo, el cual corresponde al elaborado por Condori en el 2019; las condiciones son su origen que es la Lemna Gibba (lenteja de agua), ante su

respectivo pretratamiento y activación química con Cloruro Férrico al 40%, microporoso, pH de 7,12 y sus condiciones de operación son tiempo de residencia de 30 minutos para una adsorción o remoción de arsénico del 97,60%.

4.1.2. Cálculos de dimensionamiento y sistema de columnas.

Para realizar los cálculos de dimensionamiento de las columnas de adsorción, se emplean los datos recopilados en la bibliografía para el caudal (consumo de agua precipita), concentración de arsénico en aguas de Nicaragua y del carbón activado propuesto, además de los parámetros establecidos en el diseño metodológico.

4.1.2.1. Valores de condiciones de operación.

Como se establece en el tema y planteamiento del problema, el proyecto está dirigido a diseñar un de sistemas de columnas de adsorción, para remover arsénico en aguas naturales. Por lo tanto, para realizar el diseño se determinó un adsorbato solución acuosa de arsénico y una concentración inicial concreta, considerando la remoción a niveles permisibles por las normas que rigen a Nicaragua y las condiciones de operaciones presentadas en el diseño metodológico.

Tabla 4.2.

Valores de operación.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Fuente</i>
C_i	0,103 mg/L	(Altamirano & Delgado, 2020)
C_f	0,01 mg/L	(CAPRE, 1994)
Q	3,1 m ³ /d	(Toruño, Cruz, Urbina, Flores, & Lanzas, 2017)
EBCT (tiempo de contacto en lecho vacío).	30 min	(Ures, Jácome, & Suárez, 2014)
Tiempo de operación.	8 horas	

Fuente: Autores.

El volumen de consumo mensual de agua per cápita para una casa según Toruño, Cruz, Urbina, Flores, & Lanzas (2017) es de $3,1 \text{ m}^3$, considerando el caudal diario, se divide este valor entre los días correspondientes al mes, por lo que, el consumo de agua per cápita diario es de $0,301 \text{ m}^3$, convirtiendo a litros equivale a 103,3 litros para una persona. Verificando el consumo de agua (lppd) en la comunidad el Tanque con respecto a la NTON 09 007-19, la cual indica que la dotación de agua para poblaciones rurales concentradas es de 100 lppd, por lo que, se indica que el consumo de agua per cápita en estudio excede del valor normado.

Para determinar el caudal a tratar, se consideró el número de habitantes promedio en la comunidad; según el VIII censo de población Y IV de vivienda realizado por el INIDE, en el municipio de Posoltega (al que pertenece la comunidad el Tanque) el promedio de habitantes por vivienda es de 6 personas (Rodríguez, 2005). Por lo tanto, se multiplican los 103,3 lppd por 6 habitantes/vivienda, donde el volumen total es de 619,8 L/día. Conociendo un EBCT (tiempo de contacto del lecho vacío) de 30 minutos y el tiempo de operación de los filtros de 8 horas se tiene que el caudal es:

$$619,8 \frac{L}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 1,2913 \frac{L}{\text{min}}$$

4.1.2.2. Cálculos del dimensionamiento y parámetros del lecho de carbón activado.

Despejando la ecuación 1 del tiempo efectivo de contacto (τ) con valor de 30 minutos, escogido por valor tabla (Anexo 1, imagen A1.1) se obtiene el volumen del lecho, donde ε_b (fracción de huecos en el lecho de carbono) tiene un valor por criterio de referencia del carbón Filtrasorb 400, que es fabricado por Calgon, Corp de 0,554. Se tiene:

$$\tau = \frac{V_b * \varepsilon_b}{Q}$$

$$V_b = \frac{\tau * Q}{\varepsilon_b} = \frac{30 \text{ min} * 1,2913 \frac{L}{\text{min}}}{0,554}$$

$$V_b = 69,9259 \text{ L}$$

Por lo tanto, *el volumen del lecho de carbón activado es de 69,9558 litros.*

Ahora bien, conociendo el volumen del lecho se procede a calcular el área transversal del lecho a partir de la ecuación 2, el valor de H_L según criterios de los rangos de los principales parámetros de diseño y funcionamiento de los filtros de carbón activo granular (Anexo 1, imagen A1.1) para tratamiento de agua, se toma el mínimo valor, que es 5 m/h:

Se convierten los L/min a m^3/h , entonces: $619,8 \frac{L}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{0,001 m^3}{L} = 0,0258 \frac{m^3}{h}$

$$H_L = \frac{Q}{A_T}$$

$$A_T = \frac{Q}{H_L} = \frac{0,0258 \frac{m^3}{h}}{5 \frac{m}{h}} = 5,16 \times 10^{-3} m^2$$

Calculada el área transversal del lecho se determina la longitud o altura del lecho empleando la ecuación 3, por lo que el volumen del lecho se convierte a m^3 , siendo este de **0,0699 m^3** :

$$H_{LCT} = \frac{V_b}{A_T}$$

$$H_{LCT} = \frac{0,0699 m^3}{5,16 \times 10^{-3} m^2}$$

$$H_{LCT} = 13,55 m$$

Volumen de rendimiento o de producción es el volumen de agua que pasa a través del reactor durante el tiempo de funcionamiento del filtro (t_f). Para el sistema propuesto se tiene que el *volumen de rendimiento es*:

$$V_L = Q * t_f = 30 \text{ min} * 1,2913 \frac{L}{\text{min}} = 38,739 L.$$

Altura de las columnas.

Para determinar la altura de la columna total, se adiciona un 20% de espacio libre para compensar la adsorción (De Avila, Puello, & Castilla, 2019), que eleva el lecho, así como también un nivel flujo libre. Por lo tanto, empleando la ecuación 5:

$$H_{CT} = 1,2 * H_{LC}$$

$$H_{CT} = 1,2 * 13,55 \text{ m}$$

$$H_{CT} = 16,26 \text{ m}$$

Calculada la altura total de la columna, se procede a determinar la altura de cada columna y lecho, por lo que, el denominador para las ecuaciones 6 y 7 corresponde a 6 (puesto que son 6 columnas). Los valores calculados anteriormente para H_{LCT} y H_{CT} se procesan a continuación:

$$H_{LC} = \frac{H_{LCT}}{n} \quad H_{LC} = \frac{13,55 \text{ m}}{6} = 2,3 \text{ m} \quad \textit{Altura de lecho en cada columna.}$$

$$H_C = \frac{H_{CT}}{n} \quad H_C = \frac{16,26 \text{ m}}{6} = 2,7 \text{ m} \quad \textit{Altura de cada columna.}$$

Numero de Reynolds para el lecho.

En el tratamiento de agua, la velocidad superficial muestra la velocidad del líquido en un lecho vacío con un área transversal A_T y corresponde a la tasa de carga hidráulica (HLR). También se denomina tasa de carga superficial. Se convierte el caudal a unidades de m^3/s , siendo de $2,1521 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. Empleando la ecuación 8, se obtiene:

$$v_f = \frac{Q}{A_T}$$

$$v_f = \frac{2,1521 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{5,16 \times 10^{-3} \text{m}^2}$$

$$v_f = 4,17 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se calcula el radio del lecho, a partir de la ecuación 9:

$$A_T = \pi \cdot r^2$$

$$r^2 = \frac{A_T}{\pi} = \frac{5,16 \times 10^{-3} m^2}{\pi} = 1,64 \times 10^{-3} m^2$$

$$\sqrt{r^2} = \sqrt{5,8716 \times 10^{-4} m^2}$$

$$r = 0,0405 m \cong 4,05 cm$$

Además de determina el diámetro interno de la columna, con la ecuación 10:

$$D = 2 \cdot r$$

$$D = 2 * 4,05 cm = 8,1 cm$$

El diámetro y velocidad de flujo se han calculado para determinar el tipo de flujo en el lecho, en conjunto con los valores de las variables indicados en la tabla 3.1, se determina el número de Reynolds con la ecuación 11:

$$Re = \frac{D \cdot v_f \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,081 m \cdot 4,17 \times 10^{-3} \frac{m}{s} \cdot 995,6 \frac{Kg}{m^3}}{797,7 \times 10^{-6} \frac{Kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 421,56$$

En tuberías circulares los valores del número de Reynolds indican el régimen de movimiento del fluido (Vélez, 2017), los cuales corresponden a:

- Si $Re \leq 2100$, el flujo es laminar.
- Si $2100 \leq Re \leq 4000$, el flujo se denomina de transición.
- Para $Re \geq 4000$, el flujo es turbulento.

Por lo tanto, según el criterio de Reynolds y el valor calculado para el flujo de agua a tratar, es laminar. Es decir, que el movimiento del flujo sería ordenado, estratificado y suave en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido seguirá una línea de corriente.

Tabla 4.3.

Resultados de diseño de columnas de adsorción con carbón activado.

Dimensiones	Longitud
Diámetro interno de la columna	0,081 m
Altura de lecho de carbón activado	2,3 m
Altura de columna	2,7 m

Fuente: Autores.

4.1.2.3. *Calculo de las caídas de presión.*

4.1.2.3.1. *Caídas de presión en tuberías.*

Las especificaciones de los tubos propuestos para el diseño se encuentran en el catálogo predial Durman. Para determinar las caídas de presión del sistema primero se debe calcular el número de Reynolds con la ecuación 14, previamente es necesario calcular las áreas transversales y velocidad del flujo con las ecuaciones 11 y 12 respectivamente:

Como se sugieren tubos con las mismas pulgadas, el cálculo del área transversal de los tubos es uno solo, exceptuando el tubo de la columna, el cual ya se conoce su área trasversal.

$$A_T = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ext}^2 - d_{int}^2)$$

$$A_T = \frac{\pi}{4} \cdot (0,04^2 m^2 - 0,0254^2 m^2)$$

$$A_T = 7,49 \times 10^{-4} m^2$$

Calculo de la velocidad.

$$V = \frac{Q}{A_T}$$

Tubo de 1”

$$V = \frac{2,1521 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{7,49 \times 10^{-4} m^2}$$

$$V = 0,028 \frac{m}{s}$$

Tubo 3,19”

$$V = \frac{2,1521 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{5,16 \times 10^{-3} m^2}$$

$$V = 4,1407 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$$

Tabla 4.4.

Calculo de área trasversal y velocidad de flujo.

Tubo	Longitud, m	Diámetro interno, m	Diámetro externo, m	A_T, m^2	$Q, \frac{m^3}{s}$	$V, \frac{m}{s}$
1”	0,1	0,0254	0,04	$7,49 \times 10^{-4}$	$2,1521 \times 10^{-5}$	0,028
1”	0,05	0,0254	0,04	$7,49 \times 10^{-4}$	$2,1521 \times 10^{-5}$	0,028
3,19”	2,7	0,081	0,084	$5,16 \times 10^{-3}$	$2,1521 \times 10^{-5}$	4,1407

Fuente: Autores y (Durman, 2016).

Calculo del número de Reynolds para los tubos.

$$Re = \frac{V \cdot L_c}{\nu}$$

Tubo de 1”

$$Re = \frac{0,028 \frac{m}{s} \cdot 0,0254 m}{0,801 \times 10^{-6} m^2 \cdot s}$$

$$Re = 887,8901$$

Tubo 3,19”

$$Re = \frac{4,1407 \times 10^{-3} \cdot 0,081 m}{0,801 \times 10^{-6} m^2 \cdot s}$$

$$Re = 418,7224$$

Tabla 4.5.

Resumen de variables para el numero de Reynolds en los tubos.

<i>Tubo</i>	<i>Longitud, m</i>	<i>V, m/s</i>	<i>Lc, m</i>	<i>v, m²·s</i>	<i>Re</i>
1”	0,1	0,028	0,0254	0,801x10 ⁻⁶	887,8901
1”	0,05	0,028	0,0254	0,801x10 ⁻⁶	887,8901
3,19”	2,7	4,1407x10 ⁻³	0,081	0,801x10 ⁻⁶	418,7224

Fuente: Autores.

Factor de fricción en los tubos.

Empleando la ecuación 15 se obtiene:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Para tubo 1”

$$f = \frac{64}{887,8901}$$

$$f = 0,0720$$

Para tubo 3,19”

$$f = \frac{64}{418,7224}$$

$$f = 0,1528$$

Tabla 4.5.

Resumen de variables para la fricción ejercida en los tubos.

<i>Tubo</i>	<i>Longitud, m</i>	<i>Re</i>	<i>f</i>
1”	0,1	887,8901	0,0720
1”	0,05	887,8901	0,0720
3,19”	2,7	418,7224	0,1528

Fuente: Autores.

Caidas de Presión.

Empleando la ecuación 16, se determina la caída de presión para cada tubo:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2}$$

Para tubo 1" de 0,1 m

$$\Delta P_L = 0,0720 \times \frac{0,1m}{0,0254m} \frac{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot (0,028m/s)^2}{2}$$

$$\Delta P_L = 0,1107 \frac{Kg}{m \cdot s^2} \cong 0,1107 Pa$$

Para tubo 1" de 0,05 m

$$\Delta P_L = 0,0720 \times \frac{0,05m}{0,0254m} \frac{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot (0,028m/s)^2}{2}$$

$$\Delta P_L = 0,0553 \frac{Kg}{m \cdot s^2} \cong 0,0553 Pa$$

Para tubo 3,19"

$$\Delta P_L = 0,1528 \times \frac{2,7m}{0,081m} \frac{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot (0,055m/s)^2}{2}$$

$$\Delta P_L = 7,6697 \frac{Kg}{m \cdot s^2} \cong 7,6697 Pa$$

Tabla 4.6.

Resumen de caídas de presión en los tubos.

Tubo	Longitud, m	Diámetro interno, m	V, m/s	ρ , kg/m ³	f	ΔP_L . Pa	ΔP_L en psi
1"	0,1	0,0254	0,028	995,6	0,0720	0,1107	$1,6055 \times 10^{-5}$
1"	0,05	0,0254	0,028	995,6	0,0720	0,0553	$8,0205 \times 10^{-6}$
3,19"	2,7	0,081	0,055	995,6	0,1528	7,6697	0,00111

Fuente: Autores.

4.1.2.3.2. Caída de presión en lecho.

Para determinar la caída de presión en el lecho se emplean las ecuaciones 18 y 19, por lo que, se tienen los siguientes datos en la tabla 4.7:

Tabla 4.7.

Parámetros para el cálculo de la caída de presión en el lecho.

Condición de operación	Valor	Parámetro del carbón	Valor
Diámetro interno	0,081 m	Esfericidad	0,54
Altura de lecho	2,3 m	Porosidad	0,554
Viscosidad del fluido	$797,7 \times 10^{-6}$ Kg/m s	Diámetro de partícula	0,012 m
Velocidad del fluido	$4,17 \times 10^{-3}$ m/s		
Densidad del fluido	$995,6$ Kg/m ³		
Gravedad	$9,81 \frac{m}{s^2}$		

Fuente: Autores.

Se calcula el diámetro de partícula a partir de $V_p = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3$, despejando la D_p se obtiene:

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{V_p \cdot 8}{4,19}}$$

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{9,65 \times 10^{-7} m^3 \cdot 8}{4,19}}$$

$$D_p = 0,012 m$$

La pérdida de presión en el lecho se calcula con la expresión de Ergun:

$$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot v}{(\phi \cdot D_p)^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{\phi \cdot D_p}$$

$$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = 150 \cdot \frac{(1 - 0,554)^2}{0,554^3} \cdot \frac{797,7 \times 10^{-6} \cdot 4,17 \times 10^{-3}}{(0,54 \cdot 0,012)^2} + 1,75 \frac{(1 - 0,554)}{0,554^3} \cdot \frac{995,6 \cdot (4,17 \times 10^{-3})^2}{0,54 \cdot 0,012}$$

$$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = 25,878 \frac{Kg}{m^2 s^2}$$

Las unidades:

$$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = \frac{\frac{Kg}{m \cdot s} \cdot \frac{m}{s}}{(m)^2} + \frac{\frac{Kg}{m^3} \cdot (\frac{m}{s})^2}{m}$$

$$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = \frac{\frac{Kg}{s^2}}{m^2} + \frac{\frac{Kg}{m \cdot s^2}}{m}$$

$$\frac{\Delta P_{LC}}{L} = \frac{Kg}{m^2 s^2} + \frac{Kg}{m^2 s^2}$$

Despejando la caída de presión provocada por el lecho se obtiene:

$$\Delta P_{LC} = 25,878 \frac{Kg}{m^2 s^2} \cdot L$$

$$\Delta P_{LC} = 25,878 \frac{Kg}{m^2 s^2} \cdot 2,3 m$$

$$\Delta P_{LC} = 59,5194 \frac{Kg}{m \cdot s^2} \cong 86,3255 psi$$

4.1.2.4. *Perdidas por carga de las tuberías y el lecho.*

Para calcular las pérdidas por carga se emplea la ecuación 17 para ambos casos.

4.1.2.4.1. *Perdidas por carga en las tuberías.*

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho \cdot g}$$

Para tubo 1" de 0,1 m

$$h_L = \frac{0,1107 \frac{Kg}{m \cdot s^2}}{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_L = 1,1334 \times 10^{-5} m$$

Para tubo 1" de 0,05 m

$$h_L = \frac{0,0553 \frac{Kg}{m \cdot s^2}}{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_L = 5,6620 \times 10^{-6} m$$

Para tubo 3,19”

$$h_L = \frac{7,6697 \frac{Kg}{m \cdot s^2}}{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_L = 7,8527 \times 10^{-4} m$$

Tabla 4.8.

Perdidas de carga en las tuberías.

Tubo	g	ρ	ΔP_L	h_L
1”	$9,81 \frac{m}{s^2}$	$995,6 \text{ kg/m}^3$	$0,1107 \frac{Kg}{m \cdot s^2}$	$1,1334 \times 10^{-5} m$
1”	$9,81 \frac{m}{s^2}$	$995,6 \text{ kg/m}^3$	$0,0553 \frac{Kg}{m \cdot s^2}$	$5,6620 \times 10^{-6} m$
3,19”	$9,81 \frac{m}{s^2}$	$995,6 \text{ kg/m}^3$	$7,6697 \frac{Kg}{m \cdot s^2}$	$7,8527 \times 10^{-4} m$

Fuente: Autores.

4.1.2.4.2. *Perdida por carga en el lecho.*

$$h_{LC} = \frac{\Delta P_{LC}}{\rho \cdot g}$$

$$h_{LC} = \frac{59,5194 \frac{Kg}{m \cdot s^2}}{995,6 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{LC} = 6,0940 \times 10^{-3} m$$

4.1.2.5. *Pérdidas de carga y caídas de presión totales.*

Para determinar el total de pérdidas y caídas en las tuberías y el lecho, se deben multiplicar los valores calculados por la cantidad de materiales. El cálculo se presenta en las tablas 4,9 y 4.10.

Tabla 4.9.

Perdidas de carga y caídas de presión total en las tuberías.

<i>Tubo</i>	ΔP_L en <i>psi</i>	h_L en <i>m</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Total</i> ΔP_L en <i>psi</i>	<i>Total</i> h_L en <i>m</i>
1"	$1,6055 \times 10^{-5}$	$1,1334 \times 10^{-5}$	4	$6,422 \times 10^{-5}$	$4,5336 \times 10^{-5}$
1"	$8,0205 \times 10^{-6}$	$5,6620 \times 10^{-6}$	14	$1,122 \times 10^{-4}$	$7,9268 \times 10^{-5}$
3,19"	0,00111	$7,8527 \times 10^{-4}$	6	$6,66 \times 10^{-3}$	$4,71 \times 10^{-3}$
<i>Total de perdida por tuberías</i>				$6,836 \times 10^{-3}$	$4,834 \times 10^{-3}$

Fuente: Autores.

Tabla 4.10.

Perdidas de carga y caídas de presión total en el lecho.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Numero de lechos</i>	<i>Pérdidas totales por los lechos de carbón.</i>
ΔP_L en <i>psi</i>	86,3255 <i>psi</i>	6	517,953 <i>psi</i>
h_L en <i>m</i>	$6,0940 \times 10^{-3}$ <i>m</i>	6	0,036 <i>m</i>

Fuente: Autores.

4.1.2.6. *Perdidas de carga y caídas de presión del sistema.*

Para determinar la caída de presión y pérdida de carga para las tuberías y lechos de carbón, se emplea la ecuación 20:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_L + \Delta P_{LC} & h_T &= h_L + h_{LC} \\ \Delta P_T &= 6,836 \times 10^{-3} \text{psi} + 517,953 \text{psi} & h_T &= 4,834 \times 10^{-3} \text{m} + 0,036 \text{m} \\ \Delta P_T &= 517,9598 \text{psi} & h_T &= 0,0408 \text{m} \end{aligned}$$

4.1.3. Diseño del sistema de columnas.

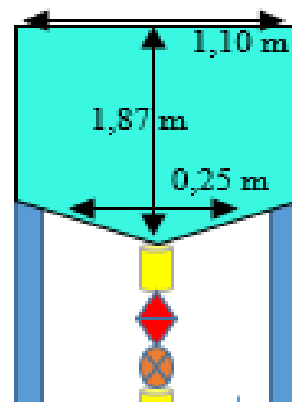
Al haber determinado las dimensiones de la columna de adsorción, se procedió a presentar la idea del diseño del sistema de adsorción, para este paso se ha definido que el número de columnas corresponde a 6, para tratar el volumen de agua representativo a un día de consumo per cápita de una familia promedio. Por ende, se procedió a definir el tipo de sistema de bombeo y las partes del diseño.

4.1.3.1. Selección del medio de bombeo y control de flujo volumétrico.

Como se ha mencionado el caudal o volumen de agua a tratar corresponde a $619,8 \frac{L}{día}$ de agua, el tiempo de retención corresponde a 30 minutos, es decir, que el agua tendrá un contacto con el carbón activado de media hora. Se propone un tiempo de trabajo del sistema de 8 horas al día. Debe considerarse que el diseño está dirigido a materiales económicos, por esta razón, se decidió que el medio de bombeo sea por gravedad, el agua sin tratar se almacenara en una tolva Rotoplas con capacidad de 1 300 litros reforzado al 45%, con una altura de 2,10 metros, diámetro de 2 metros y Angulo de 45°. El tanque tendrá adaptado a una válvula de pie de 1” para poder adaptarse al tubo PVC.

Como se muestra en la figura 4.1 correspondiente a un plano 2D, el tanque para asegurar un flujo por gravedad efectivo se colocará sobre una base metálica de 4,65 metros de altura. Conectado por tubos PVC a las columnas, en la salida del tanque en el tubo PVC se instala un medidor digital para flujo de agua de 1,5” con control de pantalla LCD digital de 5 a 150 L/min y una llave de paso para detener el flujo de agua cuando se haya completado el volumen estimado a tratar.

Figura 4.1. Sección de tanque 1 y flujo por gravedad.

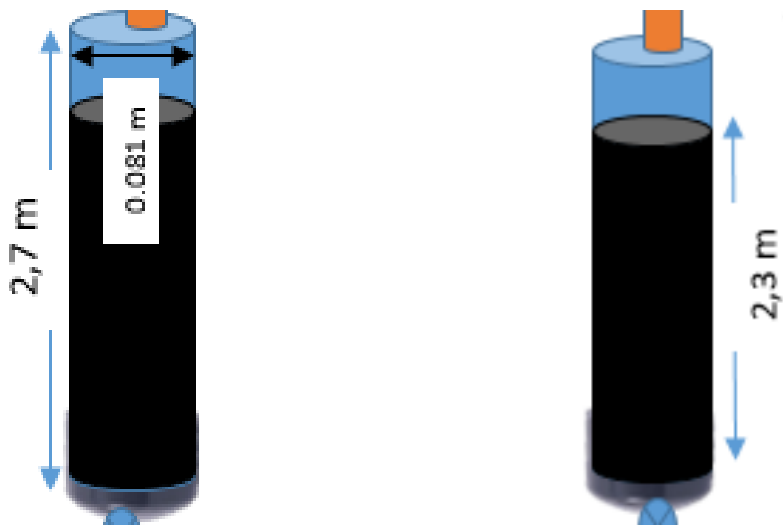


Fuente: Autores

4.1.3.2. *Columna de adsorción individual.*

La columna de adsorción como se especificó en la tabla 4.3 presenta las dimensiones calculadas a partir las condiciones de operación, en la figura 4.2. se presenta el diseño. Como se observa hay un espacio en la parte superior de la columna entre el carbón activado y el inicio de la columna, este espacio permite reducir exceso de fluido y que se rebase o tope la columna, evitando también aumentos de presión en el sistema. En la parte superior se colocó una tapa de PVC hembra y un adaptador de PVC macho de 1”.

Figura 4.2. Diseño en 2D de columna de adsorción.



Fuente: Autores.

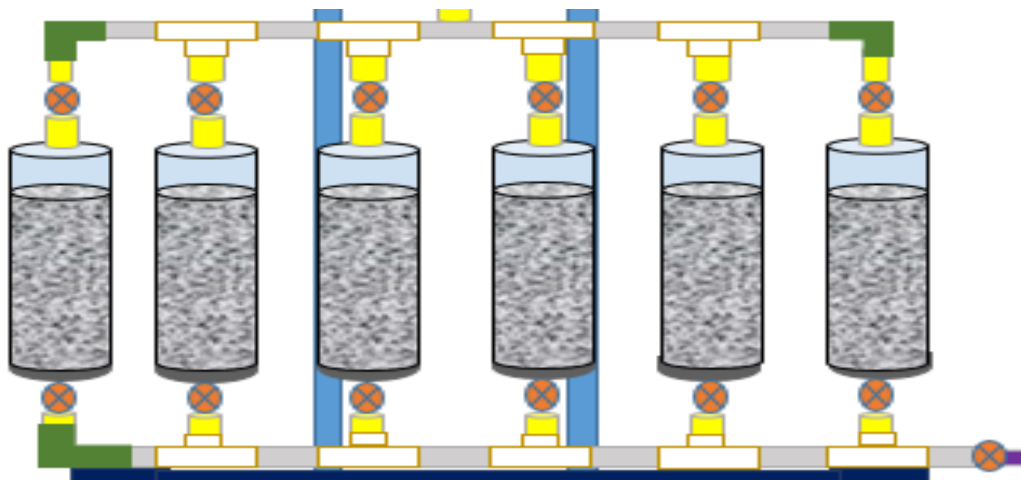
En la parte inferior de la columna se colocara una malla, la cual corresponde a una de número 10, es decir, de diámetro de 0,10 mm; este número se eligió en base al estudio de Condori (2019) del carbón activado propuesto quien indica que el tamaño de partícula (T_p) del carbón activado es de 0,350 mm el cual es favorable por ser un adsorbente granular que técnicamente proporciona seguridad sin generar caídas de presión en cuanto a lechos de adsorción se refiere, por lo tanto, el carbón activado al ser depositado en la columna o en el momento que llegue el flujo de agua a la columna no se perderá pasando por las tuberías, puesto que, el diámetro de la malla es inferior al tamaño de partícula del carbón.

Para asegurar la retención del flujo volumétrico la malla número 10 está integrada en una tapa de PVC hembra y un adaptador de PVC macho de 1", es decir que la parte inferior de la columna cuenta con el diseño de una fase móvil que permitirá también el desmontaje de lo columna para realizar el cambio del carbón activado después de su uso, esto como segundo sistema de seguridad para evitar el paso del flujo de agua, ya que, también se cuentan con las llaves de paso para hacer pasar el agua tratada al tanque de almacenamiento o tanque 2.

4.1.3.3. *Ensamble de columnas de adsorción.*

El sistema de columnas de adsorción como se muestra en la figura 4.3 se conecta por tubos PVC marca Durman para agua de 1 pulgada de diámetro (25 mm) con te roscada en las 4 columnas centrales y en las columnas de los extremos con un codo liso del mismo material y diámetro. La distancia desde la llave de paso a la columna es de 0,05 m y el espacio entre cada columna está determinado por 0,1 m de separación, por lo tanto, el sistema de columna tiene un largo de aproximadamente 1,28 m por 3,04 m de altura, sujetos a una base metálica como soporte de las columnas, la altura entre la base metálica y el suelo es de 0,8 m.

Figura 4.3. Columnas de adsorción continuo en paralelo.



Fuente: Autores.

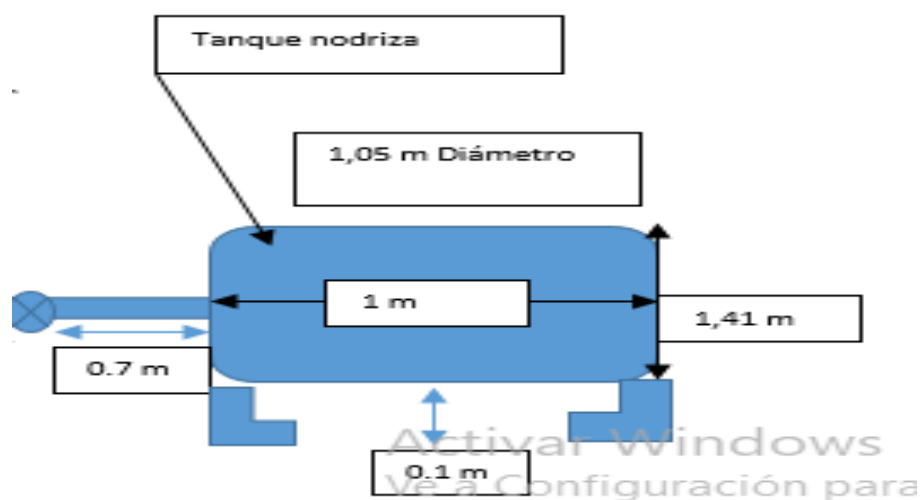
En la parte inferior de las columnas se conecta de la misma forma que en la entrada del flujo, a diferencia que en la salida de cada columna se colocó una llave de paso seguida de tubos PVC Durman para agua del diámetro establecido con una longitud de 0,1 m, donde la primera columna conectado con un codo liso al tubo de horizontal de salida de agua tratada y las columnas restantes con te roscacada. La distancia entre las columnas y el tanque de almacenamiento de agua tratada es de 0,80 m.

4.1.3.4. *Tanque de almacenamiento de agua tratada.*

Como se refleja en la figura 4.4 el tanque de almacenamiento de agua tratada está adaptado al tubo PVC de 1 pulgada por una válvula de pie de 1". Se seleccionó un tanque elíptico Rotoplas de 1 m de largo, 1,05 de ancho y 1,41 de altura metros, con una capacidad de 1 000 L que permita almacenar toda el agua tratada para uso diario, el agua podrá ser extraída del tanque por una apertura circular en la parte superior que es protegida con una tapa de rosca.

El tanque esta soportado por una base metálica que permita su estabilidad, donde la altura entre la base metálica y el suelo es de 0,1 m. Las bases metálicas que se han mencionado son de perlin negro económico con dimensiones 1,5"x3"x1/18".

Figura 4.4. Tanque 2, almacenamiento de agua tratada.

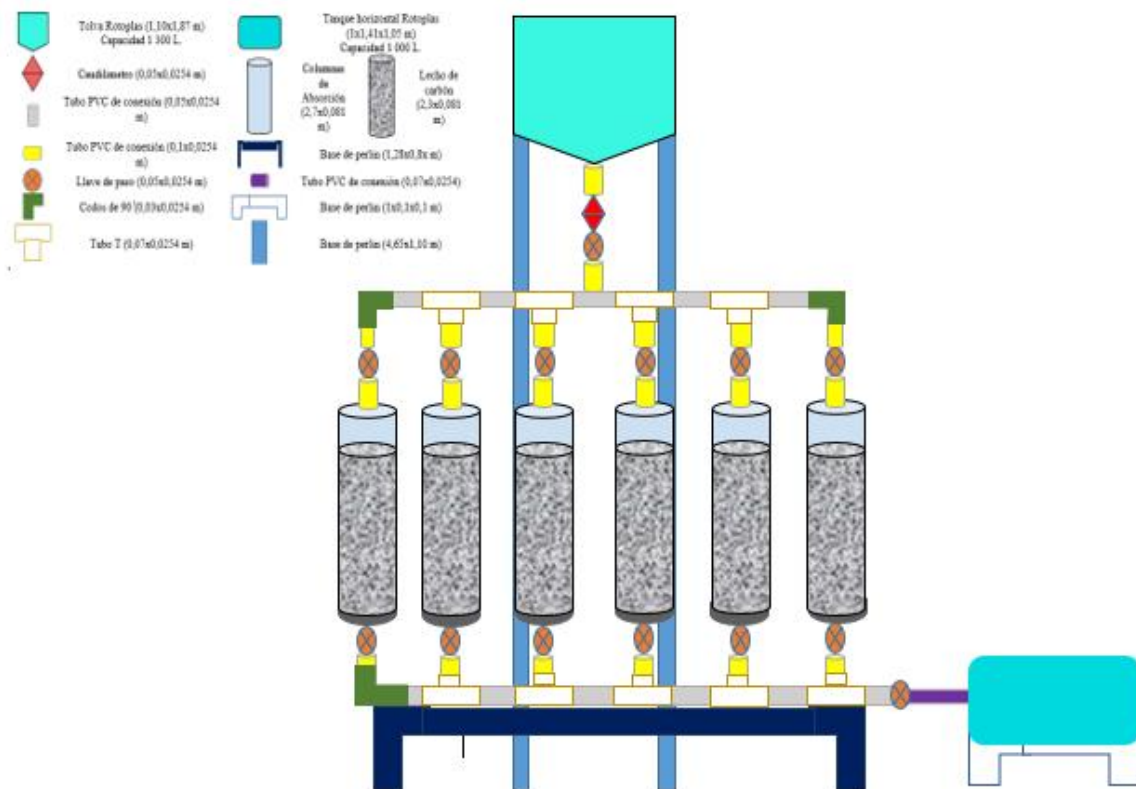


Fuente: Autores.

4.1.3.5. Diseño en SKETCHUP del sistema de columnas.

Como se ha desarrollado en los puntos anteriores del apartado 4.1.3, se ha definido como el diseño y modelado en el programa SKETCHUP en 2D. El sistema de columnas está dividido en una tolva Rotoplas que contendrá el agua sin tratar, columnas de adsorción y tanque de almacenamiento de agua tratada, como se presenta en la figura 4.5.

Figura 4.5. Diseño del sistema de columnas de adsorción con carbón activado.



La leyenda del diseño se encuentra en el anexo 2. Fuente: Autores.

Se considera el diseño del sistema de columnas de adsorción con carbón activado para el tratamiento de aguas naturales contaminadas con arsénico, como un sistema de flujo por gravedad en el cual por medio del cuadriámetro se tendrá el control del caudal diario de agua a tratar, luego pasa por el tubo conectado a las columnas, donde el flujo de agua laminar se distribuirá de forma homogénea en las 6 columnas.

Cuando estén llenas las 6 columnas se mediría el tiempo de residencia de 30 minutos, valor indicado por Condori (2019) y también referenciado por Ures, Jácome, & Suárez (2014) dentro de los parametros sugeridos, como óptimo para la remoción de arsénico al 97,60%. Teóricamente se considera una concentración inicial del metal disuelto en agua de 0,103 mg/L como indica Altamirano & Delgado (2020) y una concentración final esperada de 0,01 mg/L como indican las normas CAPRE (1994).

Ahora bien, es necesario determinar teóricamente la concentración que sería removida basándose en la eficiencia del carbón activado, por lo tanto, se considera que:

$$0,103 \text{ mg/L} \rightarrow 100\%, \text{ entonces } 97,60\% \rightarrow x \text{ mg/L}$$

Por regla de tres simples tenemos:

$$x = \frac{0,103 \text{ mg/L} \cdot 97,60\%}{100\%}$$
$$x = 0,100528 \text{ mg/L}$$

Este valor corresponde a la concentración de arsénico que removerá el carbón activado propuesto en las condiciones diseñadas, por lo que, si se resta 0,100538 mg/L a 0,103 mg/L (concentración inicial), el resultado es 0,002472 mg/L; esta es la concentración de arsénico contenida en el agua tratada con el diseño propuesto.

En comparación con lo que indica el nivel de tolerancia de arsénico en aguas de consumo humano que es de 0,01 mg/L, este valor calculado es menor, por lo tanto, la concentración de arsénico teórica que se encontraría en el agua tratada cumple satisfactoriamente lo establecido por las normas CAPRE (1994).

4.1.4. Estimación del costo del diseño.

Para la estimación del costo que se requerirá construir el diseño, se calculan en base a los precios unitarios de cada material y el total a emplear, se realiza la sumatoria de cada uno de estos precios y se determinó el costo total del diseño, los datos se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4.

Estimación de costo del diseño por materiales.

Material	Cantidad/Metros	Precio Unitario/Metro	Costo por material
Tolva de Rotoplas aéreo	1 unidad	C\$13 400	C\$13 400
Tanque elíptico Rotoplas	1 unidad	C\$11 800	C\$11 800
Tubo PVC transparente 3,18"	16,2 metros	C\$122,15	C\$1 978,83
Llave de bola	14 unidades	C\$109,55	C\$1 533,7
Caudilometro	1 unidad	C\$1 830,00	C\$1 830
Tubo PVC 1"	6 metros	C\$24,50	C\$147
Adaptador macho 1"	12 unidades	C\$14,35	C\$172,2
Tapa hembra de PVC 3"	24 unidades	C\$146,65	C\$3 519,6
Malla N 10 (diámetro 3")	6 unidades	C\$664,65	C\$3 987,9
Codo liso 1"	3 unidades	C\$17,85	C\$178,50
Te roscada	10 unidades	C\$9,80	C\$98
Perlin	50 metros	C\$99,05	C\$4 952,5
Mano de obra			C\$5 000
Total			C\$44 610,33

Fuente: Autores.

El costo total estimado del sistema diseñado es de **C\$44 610,33**. Este valor desprecia el costo de carbón activado, puesto que no cuenta con un precio, sin embargo, se puede elaborar y utilizarse. Esta estimación nos indica que el costo para construir el diseño es considerable, sin embargo, en función del beneficio debe considerarse que es una inversión prometedora y con proyección a patentizar el diseño para su posible venta.

Se realizó la búsqueda de tres sistemas de columnas de adsorción comerciales (anexo 4) en los cuales los precios varían entre C\$ 52 500 y C\$ 346 500. Los cuales tienen una alta eficiencia y baja eficiencia, siendo el más efecto el que tiene mayor precio; es importante aclarar que no especifican la sustancia que adsorben ni sus porcentajes de rendimientos, si bien es cierto, los materiales para construir el diseño propuesto no son sofisticados como los comerciales, se infiere que tiene una alta eficiencia, y su costo está dentro del rango intermedio de los sistemas de columnas más económicos.

Capítulo V

5.1. Conclusiones

En base a los objetivos planteados en la presente investigación y los resultados obtenidos se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. El carbón activado propuesto para emplearse como agente adsorbente en el sistema de columnas se ha seleccionado en base a microporosidad, pH de 7,12 y sus condiciones de operación son tiempo de residencia de 30 minutos para una adsorción o remoción de arsénico del 97,60%, el cual corresponde al elaborado con un respectivo pretratamiento y activación química con Cloruro Férrico al 40% a Condori.
2. Las dimensiones para el diseño se determinaron en base a una capacidad de consumo diario de agua por familia de $619,8 \frac{L}{día}$, la concentración inicial y final de arsénico de 0,103 mg/L y 0,01 mg/L respectivamente y condiciones de adsorción del carbón activado propuesto, por lo que, una columna tiene un diámetro interno de 0,081 m, una altura de lecho de carbón activado de 2,3 m y altura de columna de 2,7 m.
3. El modelo del diseño consiste en ensamblar 6 columnas paralelas que permitirán teóricamente el tratamiento de agua contaminada con arsénico, conectadas inicialmente a un tanque de recepción de agua sin tratar y posterior a un tanque de agua con una concentración de arsénico teóricamente de 0,002472 mg/L; el diseño esta modelado para realizar un trabajo diario de 8 horas al ser el tiempo de residencia de 30 minutos. La eficiencia calculada teóricamente indica que el diseño removerá arsénico hasta una concentración final inferior a lo establecido en la norma CAPRE.
4. El costo de fabricación del diseño es de C\$44 610,33 despreciando el valor del carbón activado; este valor se nota costoso, sin embargo, hay que considerar el funcionamiento del sistema de columnas que teóricamente es de un 97,60% de remoción de arsénico lo cual es prometedor y puede venderse este diseño, lo que a posteriori permitirá reducir los costos cuando sea masiva la producción.

5.2. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos y las conclusiones llegadas en la investigación, se propone lo siguiente:

1. Realizar la comparación de carbón activado comercial con el propósito de analizar otras opciones del mismo, para así considerar tres cosas, primero el rendimiento que tendrá teóricamente el sistema de columnas, segundo la posible disminución de las dimensiones del diseño a escalas más pequeñas y tercero poder integrar de la estimación de costo el valor del carbón activado.
2. Simular en software los resultados encontrados en la presente investigación en relación al sistema de columnas propuesto y la remoción de arsénico en las condiciones establecidas.
3. Llevar a cabo las pruebas en laboratorio bajo las mismas condiciones operacionales, empleando equipos de laboratorio básico, para confirmar las conclusiones planteadas en este documento.
4. Realizar análisis químico al agua antes de tratar y después del tratamiento, con el fin de conocer los rendimientos reales del sistema de columnas de adsorción.
5. Llevar a cabo un estudio técnico a nivel de proyecto para conocer la viabilidad que tendría esta idea de diseño.
6. Realizar pruebas de capacidad al carbón activado con los tiempos de operación con el fin de conocer el tiempo que debe cambiarse y dar tratamiento al carbón activado.

5.3. Bibliografía

- Alarcón, M. T., Leal, L., Miranda, S., Benavides, A., & Martín, I. (2014). *Arsénico en Agua: Presencia, cuantificación analítica y mitigación*. Libro Universitario, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua. Recuperado el 12 de Mayo de 2021, de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1056/1/Libro%202013-Arsenico%20en%20el%20Agua%20con%20ISBN.pdf>
- Alibaba. (2021). *Alibaba*. Recuperado el 21 de Octubre de 2021, de Alibaba.com
- Altamirano, M. (2005). *Distribución de la contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la subcuenca suroeste del valle de Sebaco, Matagalpa-Nicaragua*. Tesis Presentada a la Dirección de Postgrado de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, como requisito parcial para obtener el grado de Master en Ciencia, UNAN-Managua, Centro para la Investigación de Recursos Acuáticos (CIRA/UNAN), Sebaco. Recuperado el 19 de Mayo de 2021, de <https://repositorio.unan.edu.ni/2378/1/744.pdf>
- Altamirano, M., & Delgado, V. (21 de Enero de 2020). Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural “La Fuente”, para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua. *Torreón Universitario.*, 8(23), 58-72. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de <https://revistatorreonuniversitario.unan.edu.ni/index.php/torreon/article/view/295/502>
- Aymat, E. (2017). *Diseño de un sistema de tratamiento terciario de efluentes de la industria textil basado en la adsorción de colorantes*. Tesis de Grado para optar al título de Ingeniero, Universidad técnica de Catalunya, Escuela Técnico Superior de Ingeniería Industrial, Catalunya. Recuperado el 20 de Agosto de 2021
- Balladares, J. (2019). *Tecnologías Baratas y de Fácil Aplicación para Disminuir Arsénico en Agua Potable*. Estudio, MINISTERIO DE FOMENTO, INDUSTRIA Y COMERCIO REGISTRO DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL, DIRECCION DE PATENTES Y NUEVAS TECNOLOGIAS, Managua. Recuperado el 16 de Agosto

de 2021, de
<https://www.mific.gob.ni/Portals/0/Documentos/RPI/Patentes/Estudio%20Arsenico.pdf?ver=2019-08-15-155054-117>

Barragne-Bigot, P. (Marzo de 2004). *docplayer.es*. Recuperado el 14 de Agosto de 2021, de <https://docplayer.es/65117357-Contribucion-al-estudio-de-cinco-zonas-contaminadas-naturalmente-por-arsenico-en-nicaragua-philippe-barragne-bigot-unicef.html>

Canales, Alvarado, & Pineda. (1996). *Metodología de la investigación, Manual para el Desarrollo de personal de Salud*. OPS. Recuperado el 10 de Abril de 2019

Castellar, G., Cardozo, B., Suarez, J., & Vega, J. (Junio de 2013). Adsorción por lote y en una columna de lecho fijo del colorante B39 sobre carbón activado granular. *Prospectiva*, 11(1), 66-75. Recuperado el 14 de Agosto de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250735008.pdf>

Castelló, L. (2017). *Diseño de un sistema de adsorción para la eliminación de colorantes presentes en disolución acuosa*. Tesis para optar al Grado de Ingeniería Química, Universidad Politécnica de Valencia, Campus Dalcoi, Valencia. Recuperado el 15 de Abril de 2021, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/93468/CASTELL%20Dise%20de%20un%20sistema%20de%20adsorci%20para%20la%20eliminaci%20de%20colorantes%20presentes%20en%20diso%20l....pdf?sequence=1>

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. México, D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Recuperado el 30 de Noviembre de 2021

Comite Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamerica, Panama y Republica Dominicana. (1994). *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano*. Normativa, San José. Recuperado el 17 de Agosto de 2021

Comité Técnico a cargo de la revisión de la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense. (2020). *NTON 09 007 - 19 Diseño de sistemas de abastecimiento. Agua potable*. Norma, NTON, Managua. Recuperado el 2 de Diciembre de 2021

Condori, E. (2019). *Capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de Lemna Gibba (LENTEJA DE AGUA) frente a disoluciones acuosas de arsénico (As)*. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez", Facultad de Ingeniería y Ciencias Puras , Juliaca. Recuperado el 16 de Julio de 2021

De Avila, E., Puello, E., & Castilla, P. (2019). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN EQUIPO DE ADSORCIÓN CON DOS COLUMNAS A ESCALA DE LABORATORIO*. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Químico, UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA, ARTES Y DISEÑO, Cartagena. Recuperado el 15 de Agosto de 2021

Durman. (2016). *Catalogo Predial*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2021, de <https://www.durman.com/catalogos/elsalvador/catalogopredialdistribuidorelsalvador.pdf>

FlexBooks® 2.0. (3 de Febrero de 2021). Recuperado el 29 de Agosto de 2021

GEA. (2021). *GEA*. Recuperado el 15 de Abril de 2021, de <https://www.gea.com/es/products/emission-control/gas-scrubbers/absorption-columns.jsp>

Grupo AD HOC arsénico en agua. (2018). *Arsénico en agua*. Informe Científico, Red de Seguridad Alimentaria. Recuperado el 18 de Mayo de 2021, de <https://rsa.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/2018/08/Informe-Arsenico-en-agua-RSA.pdf>

Hidalgo, C., & Rivera, S. (2017). *Obtención de carbón activado a partir del bagazo del café como una propuesta de utilización del residuo de una industria cafetera*. Informe de materia integradora , ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL,

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, GUAYAQUIL. Recuperado el 14 de Agosto de 2021

- Hossain, M. (2006). Arsenic contamination in Bangladesh—an overview. *Agriculture, ecosystems & environment*, 113(4), 1-16. Recuperado el 14 de Agosto de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880905004329>
- Hussam, A. (2002). *Bangladesh Patente n° 1003935*. Recuperado el 14 de Marzo de 2021, de <https://www.wipo.int/ipadvantage/es/details.jsp?id=2629>
- Jiménez-Penagos, M. (2020). *Diseño de una columna de adsorción piloto para la implementación de biomasa modificada con nanopartículas magnéticas en el tratamiento de agua residual textil*. Trabajo de grado en modalidad de trabajo de investigación para optar el título de ingeniero civil , Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería , Bogotá. Recuperado el 12 de Marzo de 2021, de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25837/1/Dise%c3%b1o%20de%20una%20Columna%20de%20Adsorci%c3%b3n%20Piloto%20-%20TG%20Michael%20Jim%c3%a9nez.pdf>
- Joyal. (04 de Marzo de 2020). Obtenido de Shanghai Joyal Machinery Global Site: https://www.joyalcrusher.com/es/products/Grinding/Ball-Mill.html?gclid=CjwKCAjwh472BRAGEiwAvHVfGmVxW3kKDBkR1CvGPDzq5sSJ7i4Dc5g9Hc3HI1OMTsAEvdVRHCI9jxoCcJgQAvD_BwE
- Leyva-Ramos, R., Ocampo-Pérez, R., Torres-Rivera, O., Berber-Mendoza, M., & Medellín-Castillo, N. (2009). *Cinética de la adsorción de piridina sobre carbón activado granular*. Universidad Autónoma de San Luis Potosi, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, San Luis Potosí,. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021
- (2016). *Manual del Carbón Activado*. Manual de Máster en Ingeniería del Agua , Universidad de Sevilla , Escuela Universitaria de Politecnica , Sevilla. Recuperado el 29 de Agosto de 2020, de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Masciarelli, R., Masciarelli, S., & Fernando, S. (2018). *Fluidización* . Trabajo Practico, Universidad Tecnológica Nacional Rosario, Facultad Regional Rosario, Buenos

Aires. Recuperado el 30 de Noviembre de 2021, de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/4_ano/ingenieria_reaciones/TPN5.pdf

Mendieta, E. (2008). *Estudio de la capacidad de adsorción del carbon activado obtenido a partir de la semilla de nancite para la remoción de arsenico en aguas de pozos con alto contenido de arsenico*. Monografía para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química, Managua. Recuperado el 17 de Junio de 2021

Pérez, S., & Renedo, C. (2019). *Flujo de fluidos en tuberías*. Presentación Académica, Universidad de Cantabria, Ingeniería eléctrica y energética. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1307/course/section/1605/T06.pdf>

Propiedades del agua en función de su temperatura. (s.f.). Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de [webs.ucm.es: https://webs.ucm.es/info/Geofis/practicas/propiedades%20agua.pdf](https://webs.ucm.es/info/Geofis/practicas/propiedades%20agua.pdf)

Reddy, B. (2021). *Criterios de diseño de filtros GAC para el tratamiento de aguas residuales para su eliminación de microcontaminantes orgánicos*. Tesis de Maestría, Universidad de Lund, Departamento de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de Ingeniería Química. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021

Rodríguez, A. (2005). *VIII CENSO DE POBLACIÓN Y IV DE VIVIENDA*. VIII CENSO DE POBLACIÓN Y IV DE VIVIENDA, IMIDE, Chinandega. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de <https://www.inide.gob.ni/docu/censos2005/MONOGRAFIASD/CHINANDEGA.pdf>

Solano, J. (s.f.). *SCRIBD*. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de <https://es.scribd.com/doc/164721001/1-7-Viscosidad-cinematica>

Soto, E. (2018). *Desarrollo de estrategias tecnológicas para la remoción de arsénico en aguas subterráneas mediante el empleo de geomateriales: aspectos vinculados al*

diseño y escalado. Trabajo de Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la Plata, Argentina . doi:<https://doi.org/10.35537/10915/66733>

textoscientificos.com. (25 de Junio de 2006). Recuperado el 21 de Abril de 2021, de <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/columnas-adsorcion>

Toruño, J., Cruz, J., Urbina, A., Flores, A., & Lanzas, L. (2017). *Estudio de Consumo de Agua Potable en Comunidades Rurales del Occidente y Norte Centro de Nicaragua*. Cooperación Suiza en América Central, Programa Regional de Agua y Saneamiento (AGUASAN), Managua. Recuperado el 28 de Marzo de 2021, de <https://aguasannicaragua.com/wp-content/uploads/2018/05/Estudio-de-consumo-de-agua-potable-en-comunidades-rurales-del-occidente-y-norte-centro-de-Nicaragua.pdf>

Tuberías Presión PAVCO. (2014). *Manual Técnico de Tubo sistemas Presión PVC – PAVCO S.A. Manual* , PAVCO S.A. Recuperado el 14 de Septiembre de 2021

Ures, P., Jácome, A., & Suárez, J. (2014). *ADSORCIÓN DE CARBONO ACTIVADO (FS-TER-002)*. Ficha técnica , Universidad de Coruña. Recuperado el 28 de Noviembre de 2021

Vélez, L. (9 de Diciembre de 2017). *makinandovelez.wordpress*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de <https://makinandovelez.wordpress.com/2017/12/09/el-numero-de-reynolds-en-una-conduccion-hidraulica/>

Anexos

Anexo 1. Parámetros establecidos de operación y carbón activado.

Imagen A1.1. Valores típicos para diseño y operación en filtros GAC (Çeçen, 2012).

	Range	Unit
Flow rate, Q		
Water treatment	1200-9600	m ³ d ⁻¹
Tertiary treatment of municipal wastewaters	5000-380000	m ³ d ⁻¹
Physicochemical treatment of municipal wastewaters	2200-19000	m ³ d ⁻¹
Industrial wastewater treatment	19-16000	m ³ d ⁻¹
Empty-Bed Contact Time (EBCT)		
General	10-50	min
Typical	30	min
Water treatment	5-30	min
Tertiary treatment of municipal wastewaters	17-50	min
Physicochemical treatment of municipal wastewaters	20-66	min
Industrial wastewater treatment	30-540	min
Hydraulic Loading Rate, HLR		
General	5-25	m h ⁻¹
Typical	12	m h ⁻¹
Water treatment	5-15	m h ⁻¹
Tertiary treatment of municipal wastewaters	7-16	m h ⁻¹
Physicochemical treatment of municipal wastewaters	6-15	m h ⁻¹
Carbon Usage Rate (CUR)		
Tertiary treatment of municipal wastewaters	0.12-0.23	kg GAC/m ³
Physicochemical treatment of municipal wastewaters	0.29-1.04	kg GAC/m ³
Typical values of the GAC bed		
Bed volume, V _B	10-50	m ³
Cross-sectional area, A	5-30	m ²
Length, L _B		
General	3-9	m
Water treatment	1.8-4	m
Tertiary treatment of municipal wastewaters	3-10	m
Physicochemical treatment of municipal wastewaters	2.7-11	m
Void fraction in GAC bed, ε _B	0.3-0.6	m ³ /m ³
Apparent filter density, ρ _B	430-480	kg solids/m ³ bed
GAC particle density, ρ _P	0.92-1.5	kg solids/m ³ solid

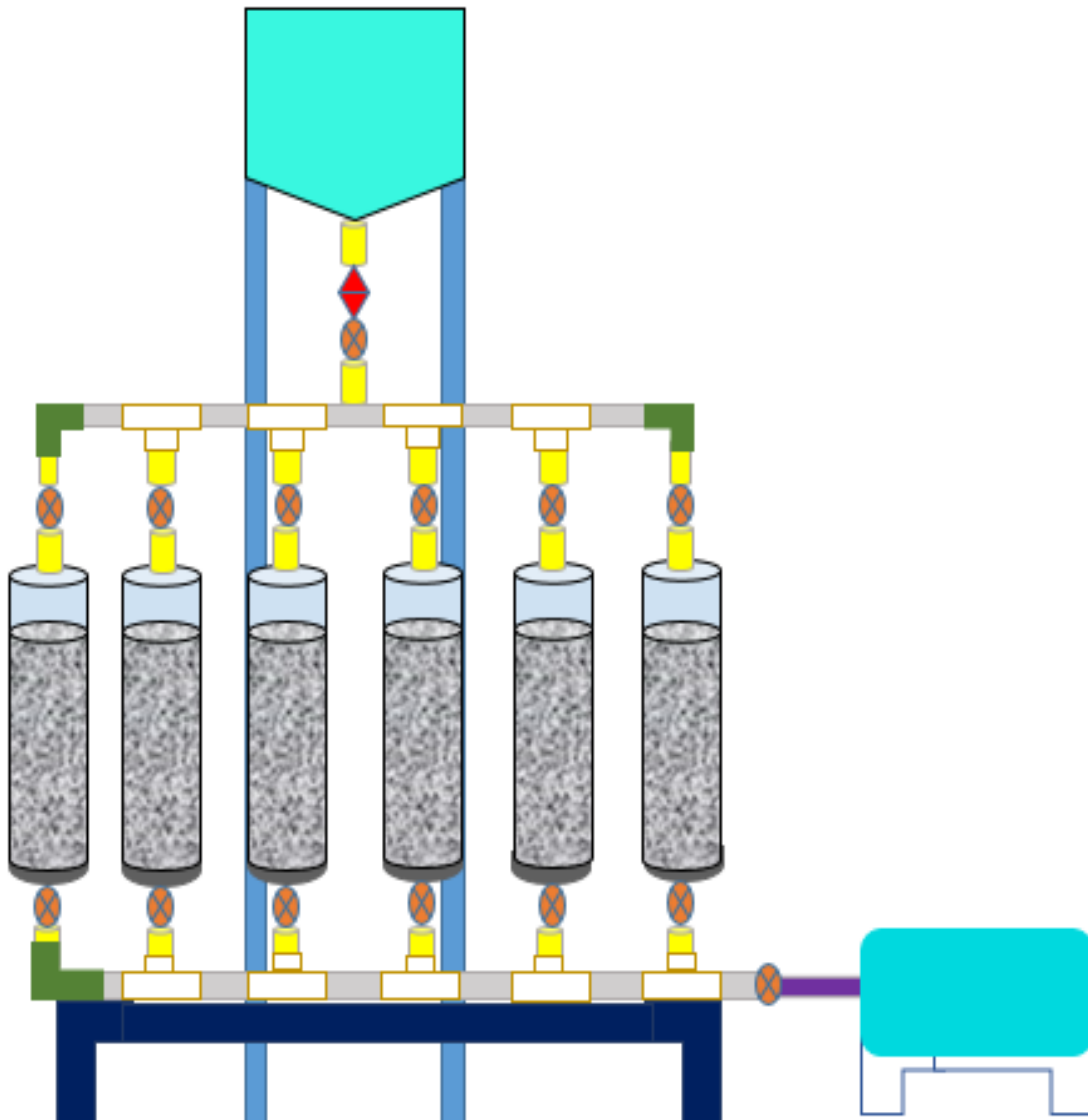
Imagen A1.2. Parámetros de carbón activado Filtrasorb 400, que es fabricado por Calgon, Corp.

El GAC utilizado en este trabajo es Filtrasorb 400, que es fabricado por Calgon, Corp. Las propiedades fisicoquímicas y de textura del GAC son: área de superficie = 925 metros²/ g, fracción vacía = 0,554, volumen de poro = 0,534 cm³/ gy densidad de partículas = 1.036 g / cm³. La concentración de piridina en la solución acuosa se determinó mediante espectroscopía UV utilizando un espectrofotómetro, Shimadzu, modelo UV-160 a una longitud de onda de 249,5 nm.

Las curvas de disminución de la concentración se obtuvieron utilizando un adsorbedor de cesta giratoria de 1 L. La solución se muestreó periódicamente hasta que se alcanzó el equilibrio. Las muestras fueron

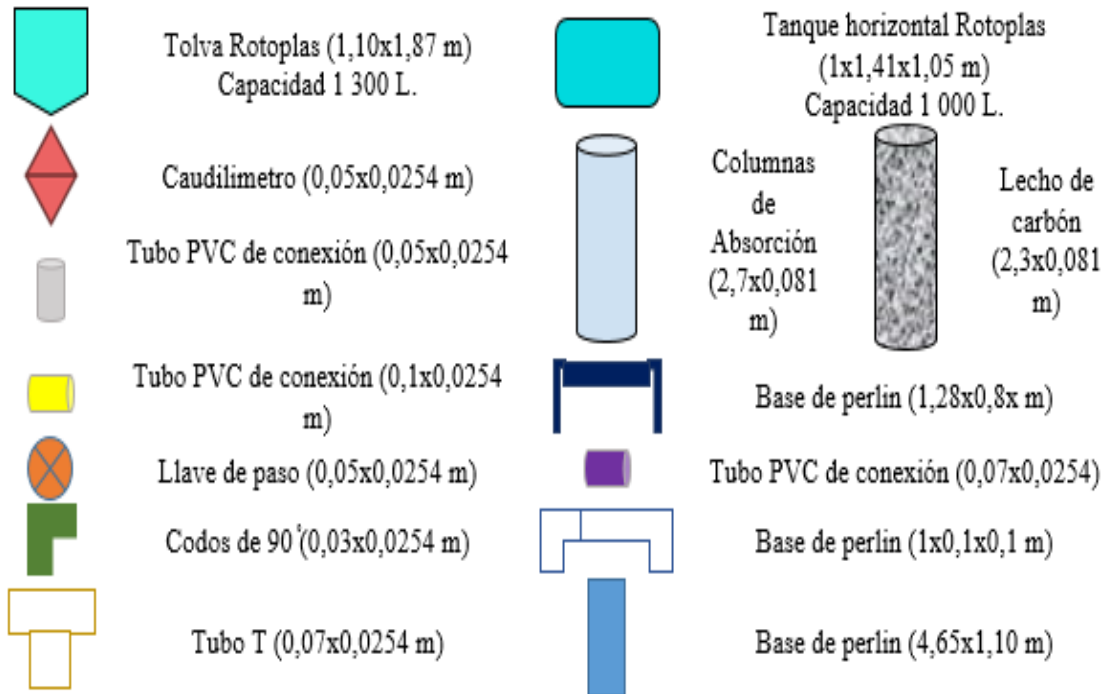
Anexo 1. Diseño del sistema de columnas en 2D.

A2.1 Plano 2D, vista frontal.



Fuente: Autores.

A2.2. Plano 2D, leyenda.



Fuente: Autores.

Anexo 4. Partes del sistema diseñado.

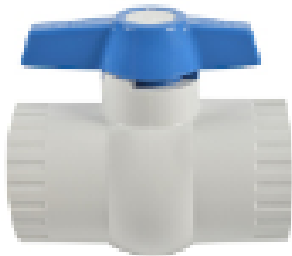
A3.1. Tolva Rotoplas, tanque 1.



A3.2. Caudalímetro.



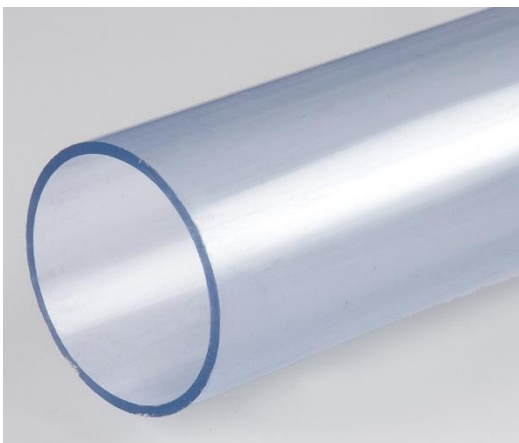
A3.3. Válvula de bola 1-1/2 pulgada blanco pcp



A3.4. Rotoplas elíptico, tanque 2.



A3.5. Tubo PVC transparente 3,19''.



A3.6. Tapa hembra de PVC 3''.



A3.71. Tubo PVC 1".



A3.82. Codo liso 1 1/2".



A3.9. Adaptador macho 1".



A3.10. Perlin.



A3.11. Malla N 10 (diámetro para la columna 3").



A3.12. Te roscada.



Nota: Las fuentes de las imágenes son de Google imágenes y de promotores de la ferretería SINSA y Jenny.

Anexo 4. Sistemas de columnas comerciales.

A4.1. Sistema de columna comercial de alta eficiencia.



Alta eficiencia industrial columna de adsorción precio

US \$2,000.00-2250.0/Unidad

4 YR CN

Contactar Proveedor

Fuente: (Alibaba, 2021)

A4.2. Columna de adsorción a bajo precio.



Columna de adsorción industrial a bajo precio

US \$1,500.00-7000.0/Set

7 YR CN

Contactar Proveedor

Fuente: (Alibaba, 2021)

A4.3. Columna de adsorción depurador.



High quality adsorption wet scrubber column price

US \$ 2,150.00-9,900.00

4 YR CN

Contactar Proveedor

Fuente: (Alibaba, 2021)