

**Diseño a escala de laboratorio de un desalinizador de agua multicapa por filtración
lenta**

Sandra Carolina Patiño Jiménez

**Universidad de pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Programa de Ingeniería Química
Pamplona
2022**

**Diseño a escala de laboratorio de un desalinizador de agua multicapa por filtración
lenta**

Sandra Carolina Patiño Jiménez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director: José Hernando Quintana Mendoza

Magíster en Química

Codirectora: Carla Stephanny Cárdenas Bustos

Magíster en ingeniería química

Línea de Investigación: Desalinización y potabilización de agua

Universidad de pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Programa de Ingeniería Química

Pamplona

2022

DEDICATORIA

La frase “Lo único imposible es aquello que no intentas.” Memo Bruma es tan real, por eso considero que este triunfo se debe a mí dedicación, constancia y entrega. Al ser más importante de mi vida, mi padre Héctor Julio Patiño QPD que ha sido mi fuerza y motor para terminar este proyecto, al apoyo incondicional de mi hermanita Jenny Milena Patiño Jiménez y al M.Sc José Hernando Quintana Mendoza por su paciencia y esfuerzo al ayudarme a cumplir mi sueño de ser profesional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y a la virgen, quienes me han regalado todo el conocimiento y sabiduría para culminar este proyecto. Durante todo mi proceso siempre recordé la frase “El éxito depende del esfuerzo.” Sófocles. Gracias a mí esfuerzo y persistencia día a día hoy culmino mi primer meta.

Infinitas gracias al ser más importante de mi vida, mi padre Héctor Julio Patiño QPD gracias por educarme, enseñarme valores, cuidarme y mandarme todo su apoyo y amor desde el cielo te amo infinitamente Padre.

A mi hermanita Jenny Milena Patiño Jiménez quien ha sido mi apoyo incondicional en este proceso gracias por sus consejos, sus frases motivadoras y por estar pendiente de mí siempre.

Inmensamente agradecida con M.Sc. José Hernando Quintana Mendoza y Carla Stephanny Cárdenas Bustos por su tiempo, su apoyo, su paciencia, guía, desvelos, motivación y todo el conocimiento que impartieron en mí para la terminación de esta tesis, porque más que sus estudiantes nos convertimos en sus hijos.

Gracias a mis docentes por compartir todos sus conocimientos y hacer de mí una mejor persona.

Durante este proceso universitario conocí muchas personas, pero solo los verdaderos amigos permanecen durante el tiempo en nuestras vidas y se convierten en familia por eso agradezco a mis más queridas amigas Milady Preciado, Angela Galindo, Estefanía Vásquez y Dilsa Flórez, por ser esa voz de aliento en los momentos más difíciles las quiero mucho niñas.

Finalmente, gracias a todas las personas que de alguna u otra forma han hecho parte de este gran proceso en especial a Edwin Gómez por el apoyo y cariño que tuvo para mí en mis primeros pasos por esta institución.

RESUMEN

Actualmente departamentos como la Guajira, Choco, Bolívar entre otros, no cuentan con acceso a agua dulce potable, sin embargo, resalta la accesibilidad a agua de mar siendo una fuente abundante y constante en esta zona, por lo cual se realizó un estudio de un desalinizador de agua multicapa por filtración lenta, como una opción sostenible y sustentable por medio de lechos filtrantes como arena de río, arcilla tipo montmorillonita, grava tipo calcita y carbón activado, clasificados como materiales microporosos. Para determinar el orden de las capas se realizaron 24 ensayos seleccionando los dos mejores de acuerdo al menor tiempo de flujo, color y control de pH en la solución de salida, para la determinación del grosor de las capas se evaluó la capacidad de retención de cada uno de los materiales por separado y en conjunto realizando un seguimiento por conductividad, pH y temperatura, las dos mejores configuraciones están dadas por el siguiente orden de abajo hacia arriba, Primera=Carbón-Arcilla-Arena-Grava; Segunda= Arcilla-Arena-Grava-Carbón obteniendo un porcentaje de desalinización de 11,22 y 53,78% respectivamente determinada por secado y por conductividad con un 43,3 y 80% respectivamente además el análisis de Fluorescencia de rayos X mostro una capacidad de extracción de iones entre 86,5 y 99,2%.

Palabras clave: Adsorción, Agua salada, Desalinizador, Filtro de columna,

LAB-SCALE DESIGN OF A MULTILAYER WATER DESALINATOR BY SLOW FILTRATION

ABSTRACT

Currently states such as Guajira, Choco, Bolivar among others, do not have access to fresh drinking water, however, the accessibility of sea water stands out as an abundant and constant source in this area, so a study of a multilayer water desalinator by slow filtration, as a sustainable and sustainable option through filter beds such as river sand, montmorillonite type clay, calcite type gravel and activated carbon classified as microporous materials was carried out. To determine the order of the layers, 24 tests were carried out selecting the two best ones according to the best flow time, color and pH control in the output solution, in determining the thickness of the layers, the retention capacity of each of the materials was evaluated separately and as a whole by monitoring conductivity, pH and temperature, the two best configurations are given by the following order from bottom to top, First=Coal-Clay-Sand-Gravel; Second= Clay-Sand-Gravel-Coal obtaining a desalination percentage of 11.22 and 53.78% respectively determined by drying and by conductivity with 43.3 and 80% respectively. In addition, the X-ray fluorescence analysis showed an ion extraction capacity between 86.5 and 99.2%.

Keywords: Adsorption, salt water, Desalinator, column filter.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. OBJETIVOS	18
1.1. Objetivo General.....	18
1.2. Objetivos Específicos.....	18
2. MARCO REFERENCIAL	19
2.1. Tipos de filtración	22
2.1.1. <i>Técnicas que utilizan un cambio de fase</i>	22
2.1.1.1. Destilación por efecto flash (MSF).....	22
2.1.1.2 Destilación por múltiple efecto (MED).	22
2.1.2. <i>Técnicas que NO utilizan un cambio de fase.</i>	22
2.1.2.1. Microfiltración.	22
2.1.2.2. Ultrafiltración.....	23
2.1.2.3. Nanofiltración.	23
2.1.2.4. Ósmosis inversa.	23
2.1.2.5. Electrodialisis.....	24
2.1.2.6. Medios granulares.....	24
2.2. Tipos de filtración en el tratamiento de aguas	24
2.2.1. <i>Filtración rápida</i>	24

2.2.2. Filtración lenta	25
3. METODOLOGÍA	26
3.1. Reactivos.....	26
3.2. Materiales y equipos	26
3.3. Procedimiento	26
3.4. FASE I. Recolección de la muestra	27
3.5. FASE II. Tratamiento de la materia prima.....	27
3.5.1. Grava	27
3.5.2. Arena de río	28
3.5.3. Arcilla	28
3.5.4. Carbón mineral	29
3.6. FASE III. Determinación del orden y el grosor de las capas.....	29
3.6.1. Grosor de las capas	29
3.6.1.1. Dispersión con cada material.	30
3.6.1.2. Dispersión de los materiales en conjunto.....	30
3.6.2. Determinación del orden	30
3.7. FASE IV. Diseño del filtro	31
3.8. FASE V. Estudio de las propiedades fisicoquímicas.....	32
3.8.1. Espectroscopia ultra violeta visible (UV-VIS).....	32

3.8.1.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	32
3.8.1.2. Nitritos.	32
3.8.1.3 Color.	32
3.8.2. <i>Técnicas de caracterización</i>	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1. FASE I. Recolección de la muestra.	34
4.2. FASE II. Tratamiento de la materia prima.....	34
4.2.1. <i>Grava</i>	34
4.2.2. <i>Arena de río</i>	38
4.2.3. <i>Arcilla</i>	44
4.2.4 <i>Carbón Mineral</i>	49
4.3. FASE III. Determinación del orden y el grosor de las capas.....	54
4.3.1. <i>Calibración conductímetro</i>	54
4.3.1.1. Dispersión con cada material.	54
4.3.1.2. Dispersión de los materiales en conjunto.....	57
4.3.2. <i>Determinación del orden</i>	58
4.4. FASE IV. Diseño del filtro	60
4.4 FASE V. Estudio de las propiedades fisicoquímicas.....	64
4.4.1. <i>Espectroscopia ultra violeta visible (UV-VIS)</i>	64

4.4.1.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	64
4.4.1.2. Nitritos.	65
4.4.1.3. Color.	65
4.4.2. <i>Análisis de fluorescencia de rayos X</i>	66
5. CONCLUSIONES	67
6. RECOMENDACIONES	68
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO A	76
ANEXO B.....	76
ANEXO C	77
ANEXO D	78
ANEXO E.....	79
ANEXO F	81
ANEXO G	83

LISTADO DE ABREVIATURAS

AIMD: Simulaciones de dinámica molecular ab-initio

ATR-FTIR: Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier y Reflexión Total Atenuada

BET: Brunauer, Emmett Teller

BJH: Barrett Joyner Halenda

DANE: Departamento administrativo nacional de estadística

DFT: Teoría funcional de la densidad

DSC-TGA: comparado con análisis realizados mediante calorimetría diferencial de barrido y análisis termo gravimétrico

DQO: Demanda Química de Oxígeno

DRX: Difracción de rayos X

FRX: Fluorescencia de rayos X

IUPAC: Unidad internacional de química pura y aplicada

MED: Destilación por múltiple efecto

MSF: Destilación por efecto flash

OMS: Organización mundial de la salud

ONU: Organización de las naciones unidas

QCM-D: Micro balanza de cristal de cuarzo con monitoreo de disipación

SDT: Solidos totales disueltos

UPC: Unidades de platino cobalto

UV-VIS: Espectroscopia ultra violeta visible

XRF: Espectroscopia de fluorescencia de rayos X

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Salinidad de la bahía de Cartagena.....	21
Figura 2. Diagrama general de la metodología experimental.	27
Figura 3. Montaje de los ensayos realizados para determinar el orden.	31
Figura 4. Porcentaje de humedad para la grava.....	35
Figura 5. Estructura de la grava tipo caliza.	36
Figura 6. Isotermas de adsorción de nitrógeno a 86 K para la grava.....	37
Figura 7. Espectro Infrarrojo para la grava.....	38
Figura 8. a) Porcentaje de humedad de la arena de río b) Porcentaje de humedad de la arena de río después del T-student.	39
Figura 9. Estructura de la arena de río.	40
Figura 10. Análisis de difracción de Rayos X (DRX) para la arena de río	42
Figura 11. Isotermas de adsorción de nitrógeno a 86 K para la arena de río.....	43
Figura 12. Espectro Infrarrojo para la arena de río.....	44
Figura 13. a) Porcentaje humedad de la arena b) Porcentaje humedad de la arena después del T- student	45
Figura 14. Estructura de la arcilla.....	46
Figura 15. Análisis de difracción de Rayos X (DRX) para la arcilla	47
Figura 16. Estructura de la Clinoptilolita.....	47
Figura 17. Isotermas de adsorción de nitrógeno a 86 K para la arcilla.....	48
Figura 18. Espectro infrarrojo para la arcilla.....	49
Figura 19. a) Porcentaje humedad del carbón b) Porcentaje humedad del carbón después del T-student.....	50

Figura 20. Estructura del carbón mineral.....	51
Figura 21. Isotermas de adsorción de nitrógeno a 86 K para el carbón activado.	52
Figura 22. Espectro Infrarrojo para el carbón.....	53
Figura 23. Curva de calibración para el Conductímetro.....	54
Figura 24. Configuración de las capas.....	59
Figura 25. Combinaciones Vs Tiempo	60
Figura 26. a) configuración 10. b) configuración 1.	61
Figura 27. a) Porcentaje de remoción mediante los dos métodos por triplicado b) Promedio de remoción mediante los dos métodos.	63
Figura 28. Secado de muestras	63
Figura 29. a) Volumen recolectado Vs Desorción para la configuración 10 b) Volumen recolectado Vs Desorción para la configuración 1	64

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Concentración de sólidos totales disueltos en el agua.	19
Tabla 2. Extensión de los océanos	20
Tabla 3. Datos de conductividad por dispersión.	56
Tabla 4. Dispersión de los materiales en conjunto después de 1 hora de sedimentación	56
Tabla 5. Dispersión de los materiales en conjunto.....	57
Tabla 6. Dispersión de los materiales en conjunto después de 1 hora de sedimentación	58
Tabla 7. Condiciones de la configuración 10.....	61
Tabla 8. Condiciones de la configuración 1.....	62
Tabla 9. Análisis fluorescencia de rayos X.....	66
Tabla 10. Datos obtenidos para el porcentaje de humedad de la Grava	76
Tabla 11. Datos estadísticos de la grava	76
Tabla 12. Datos obtenidos para el porcentaje de humedad de la arena	77
Tabla 13. Datos estadísticos de la arena	78
Tabla 14. Datos obtenidos para el porcentaje de humedad de la arcilla	78
Tabla 15. Datos estadísticos de la arcilla	79
Tabla 16. Datos obtenidos para el porcentaje de humedad del carbón	79
Tabla 17. Datos estadísticos del carbón	80
Tabla 18. Codificación de los materiales	81
Tabla 19. Combinación de las capas.....	81
Tabla 20. Datos de conductividad configuración 10.....	83
Tabla 21. Datos de conductividad configuración 1.....	83

INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso escaso en el mundo y fundamental para el desarrollo socioeconómico, producción de alimentos, energía y para la supervivencia de los seres humanos, según cifras de la OMS una persona necesita 100 litros de agua por día (Padilla Muñoz Ruth, 2022), el DANE reportó que en Colombia el suministro de agua no ha llegado a toda la población, su cobertura alcanza un 92,3% y el 7,7 % restante de la población es decir, 3,6 millones de personas no cuentan con acceso a este servicio (Delgado, 2018), sin embargo, del 2,5% del agua dulce tan solo el 1% está disponible, por otra parte, de acuerdo con la ONU, la población crecerá a 9.700 millones de personas para el año 2050 en el cual más de la mitad de la población sufrirá escasez de este líquido (ONU, 2022).

La escasez de agua potable a dado lugar a la implementación de nuevas técnicas que permitan la obtención de agua potable, entre las principales se encuentra las que incluyen membrana como la osmosis inversa, siendo la más utilizada actualmente, la cual tiene capacidad de retener partículas menores a $0,001\ \mu\text{m}$, sin embargo, es un proceso costoso y requiere de una gran cantidad de energía.

En el siglo XIX el termino adsorción empezó a tener relevancia en materiales que poseen una naturaleza adsortiva, desde entonces los sólidos porosos son de gran interés por su bajo costo y fácil acceso (Esquivel, 2011), razón por la cual esta investigación realizó un estudio con materiales como arena, grava, arcilla y carbón clasificados como microporos por medio de la determinación de isothermas de N_2 por el método BET y BJH, logrando obtener una propuesta para desalinización de agua de mar mediante un filtro multicapa por filtración lenta, proporcionando una alternativa sostenible, sustentable y asequible para todo tipo de población.

Teniendo en cuenta lo anterior, se postuló la siguiente pregunta de investigación: ¿Sera posible desalinizar agua mediante un filtro multicapa por filtración lenta, usando materiales como arcilla, grava, arena y carbón mineral?

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Diseñar a escala de laboratorio un desalinizador de agua multicapa por filtración lenta.

1.2. Objetivos Específicos

- Establecer la capacidad de remoción salina de los diferentes componentes del filtro.
- Establecer la organización de cada una de las capas dentro del filtro para lograr la mayor desalinización posible.
- Estudiar la capacidad de remoción salina mediante multicapas de diferentes materiales.

2. MARCO REFERENCIAL

La salinidad es una medida de la cantidad de SDT en el agua, los principales son cloruros, carbonatos, y sulfatos, siendo los cloruros los más abundantes constituyen aproximadamente el 80% de las sales. La salinidad está clasificada según la concentración total de sólidos disueltos como se muestra en la Tabla 1. y su valor varía considerablemente de unas regiones del planeta a otras (García, 2016), (Disco Learning Media, 2016).

Tabla 1

Concentración de sólidos totales disueltos en el agua.

Clasificación del agua	Concentración total de sólidos disueltos (mg/L)
Agua pura	<500
Agua potable	<1000
Agua de río	500-3000
Agua salobre	1500-10000
Agua salina	10000-100000
Agua de mar	35000

Fuente: (Global Water Intelligence, 2010)

El 75% del planeta está cubierto por agua con alrededor de 1386 millones de km³, de modo que el 97,5% es agua salada y el 2,5% es agua dulce, esta última equivale a 35 millones de km³ aproximadamente; que se encuentra distribuida así: 1% en lagos y ríos, 30% en aguas subterráneas y el 70% restante está en glaciares y capas polares (García, 2001). El planeta está constituido por cinco grandes océanos, cada uno posee una extensión como se reporta en la Tabla 2. (Ríos, 2022).

Tabla 2

Extensión de los océanos

Océano	Extensión (Km ²)
Océano pacifico	155.557.000
Océano Atlántico	76.762.000
Océano índico	68.556.000
Océano glacial antártico	20.237.000
Océano glacial ártico	14.056.000

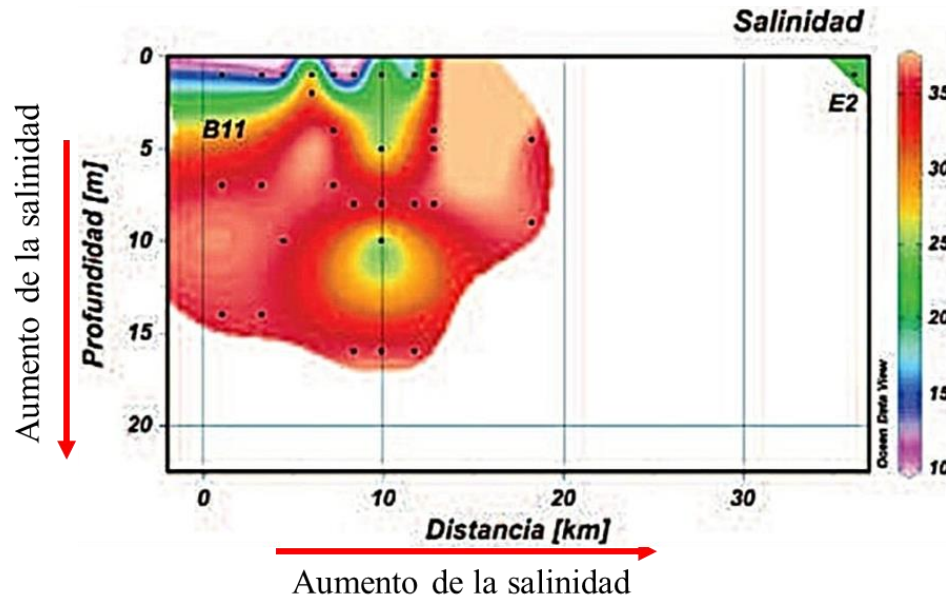
Fuente: (Ríos Bernardo, 2022)

El océano atlántico es el segundo más grande del planeta, limita al norte con el océano Glacial Ártico, al este con Europa y África, al oeste con América y al sur con el océano Glacial Antártico. Este océano incluye una serie de mares, entre los cuales se destacan el mar Caribe y el mar Mediterráneo (Terrasa, 2019) .

El mar Caribe tiene en promedio una profundidad de 2200 metros, ubicando su punto de mayor profundidad en la fosa de las islas caimán a 7686 metros por debajo del nivel del mar. En un estudio realizado por el centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas del caribe, para identificar la calidad de aguas marinas y costeras del caribe colombiano en época seca, se determinó que la salinidad varía según la profundidad y la distancia a la costa como se observa en la Figura 1., presentando una concentración en un rango entre 28,5 y 35 g/L en la bahía de Cartagena (Quintana, 2013) .

Figura 1

Salinidad de la bahía de Cartagena



Fuente: (Quintana, 2013)

Debido a que el agua es un recurso vital para los seres humanos, y la falta de este recurso hídrico en varias zonas de Colombia que poseen acceso a abundantes cantidades de agua salada, se ha planteado como solución la implementación de nuevas tecnologías de desalinización que se pueden dividir en procesos en el cual el agua realiza un cambio de fase y procesos en los que no hay cambio de fase que llevan a la obtención de agua dulce, entre las principales técnicas que implican un cambio de fase se encuentra: Destilación solar, MED, MSF, congelación, compresión de vapor. Las técnicas que no utilizan cambio de fase son las se llevan a cabo mediante una membrana que es usada como medio filtrante entre las principales técnicas se encuentra: Osmosis Inversa, Electrodialisis, nanofiltración entre otras. A continuación, se describen algunos conceptos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

2.1. Tipos de filtración

2.1.1. Técnicas que utilizan un cambio de fase

2.1.1.1. Destilación por efecto flash (MSF).

Este proceso consiste en la evaporación del agua salina obteniendo vapor que no contiene sales, este vapor se condensa en el interior o exterior de los tubos, quedando las sales en el fondo del depósito, es una técnica poco utilizada debido al alto consumo de energía eléctrica y se usa especialmente cuando la calidad del agua de ingreso presenta altos niveles de contaminación (Delgado, 2007).

2.1.1.2 Destilación por múltiple efecto (MED).

Esta técnica usa como medio de calentamiento vapor residual y es un proceso de evaporación-condensación en múltiples etapas a condiciones de presión bajas, y utiliza menor energía eléctrica que el anterior (Zarza, 2000).

2.1.2. Técnicas que NO utilizan un cambio de fase.

2.1.2.1. Microfiltración.

La microfiltración es una técnica similar a la ultrafiltración la cual consiste en separar partículas de tamaño inferior a 10 μm de un fluido, emplea presiones menores a 2 bares, el mecanismo utilizado es la retención en superficie esta se lleva a cabo en la parte superior de los filtros de membrana y retiene partículas como esporas, bacterias, hongos, levaduras y otros. Para que la microfiltración se realice de manera óptima se tienen en cuenta varios aspectos como el volumen de la muestra y el poro de membrana (Hernandez & Tejerina, 1990).

2.1.2.2. Ultrafiltración.

La ultrafiltración es un proceso de separación de pequeñas partículas de menos de 0,3 μm de diámetro como virus, bacterias y otros agentes patógenos, se emplean diferencias de presión de 2 a 10 bar y temperaturas entre 40-50°C, el tamaño de poro es lo suficientemente grande que permite el paso de algunos componentes además del agua (Hernandez & Tejerina, 1990).

2.1.2.3. Nanofiltración.

La nanofiltración es una técnica de separación por membrana que opera bajo presión, creada principalmente para la eliminación de iones como el calcio, magnesio, sulfatos entre otros, las membranas de nanofiltración ofrecen una excelente barrera y permiten la reducción de iones de gran tamaño no mayor a 10 nm además ofrecen una recuperación hasta de 85% (Mourato, 1998).

2.1.2.4. Ósmosis inversa.

En este proceso no se lleva a cabo cambio de fase y consiste en la separación mediante membranas que son permeables al agua, pero impermeables a solutos aplicando una presión sobre el agua salada, y la separación se lleva a cabo en dos corrientes una de agua potable con baja concentración de sales disueltas y otra de salmuera concentrada. Esta técnica es quizá la más utilizada según lo reporta la asociación española de desalación y reutilización ([AEDyR], 2019), pero debido al alto costo de las membranas empleadas es una técnica poco asequible para la población (Mercado, 2015).

2.1.2.5. Electrodialisis.

Esta técnica al igual que la anterior se llevan a cabo sin cambio de fase y consiste en el paso del agua salina a través de una serie de membranas permeables catiónicas y aniónicas en la cual los aniones cargados negativamente se desplazan hacia el electrodo positivo ánodo y los cationes cargados positivamente se desplazan hacia el electrodo negativo cátodo (Delgado, 2007).

2.1.2.6. Medios granulares.

La filtración mediante medios granulares es la capacidad que tiene de separar sólidos suspendidos que no son removidos mediante sedimentación, es una técnica económica y eficiente, el filtro más utilizado para remover los sólidos suspendidos es el que posee un lecho filtrante de grava y arena tiene la capacidad de separar partículas con tamaño mayor a 10 μm (Rocha, 2010).

Este tipo de filtración es la que se llevó a cabo en esta investigación con medios filtrantes como arcilla, arena, grava y carbón activado los cuales se implementaron como lecho filtrante para desalinizar, en el tratamiento de aguas existen dos tipos de filtración: lenta y rápida que se describen a continuación sin embargo la utilizada para esta investigación fue la filtración lenta.

2.2. Tipos de filtración en el tratamiento de aguas

2.2.1. Filtración rápida

En la filtración rápida, el agua atraviesa un material poroso a una velocidad de 4 a 50 m^3/h , a estas velocidades se forma una biopelícula y los procesos biológicos van a ser escasos, este tipo de filtración busca hacer funcionar todo el lecho filtrante debido a que los poros del filtro serán relativamente grandes. Una de las ventajas de este sistema es que permite la

eliminación de partículas coloidales, de difícil separación en filtraciones superficiales (Rocha, 2010).

2.2.2. Filtración lenta

La filtración lenta es una tecnología utilizada para potabilización de agua consiste en hacer pasar el agua mediante una capa ya sea mineral o cualquier otro tipo de material, sus principales ventajas son la no necesidad de mano de obra calificada y su bajo costo, una de las desventajas que presenta el sistema es la baja capacidad para la remoción de altos picos de turbiedad y tiempos largos para hacer pasar el agua (Blacio & Palacios, 2011).

Como se mencionó anteriormente es una tecnología utilizada para potabilización, pero debido a la necesidad de buscar una método sostenible y sustentable esta investigación se enfoca en estudiar las propiedades y la capacidad de retención salina mediante una filtración granular lenta.

3. METODOLOGÍA

3.1. Reactivos

Agua destilada, Hidróxido de sodio (NaOH) marca Laboratorios LEON, Peróxido de hidrogeno (H_2O_2) con concentración del 30% marca Vittaly.

3.2. Materiales y equipos

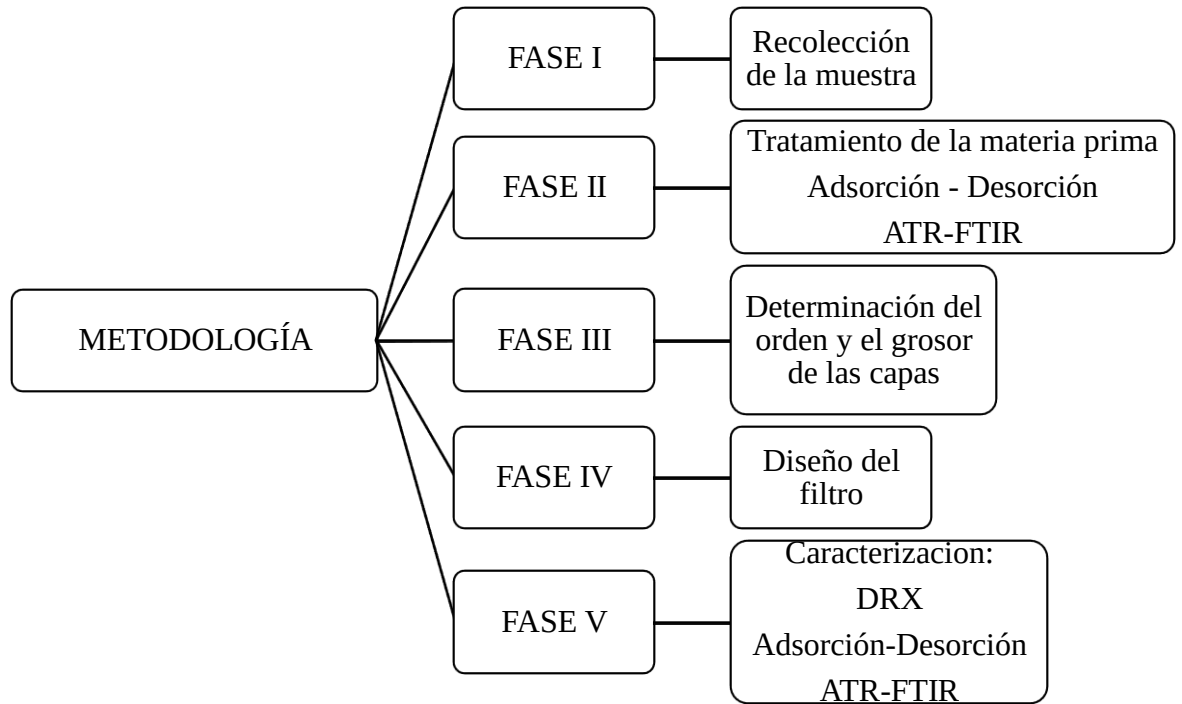
Balanza analítica de precisión 0,0001 g marca ADAM d= 0,0001g, Horno mufla marca Ney VULCAN D-550 con rampa de 10°C/min, pH metro marca SCHOTT CG 842, Manta de agitación marca DLAB MS7-H550-Pro, Espectrofotómetro HACH DR 3800, Espectrofotómetro UV-Vis Marca SHIMADZU, modelo UV-2401PC , Carbón, Grava, Arcilla y Arena comercial, los espectros de infrarrojo se realizaron en un espectrofotómetro FTIR marca SHIMADZU modelo IR Prestige-21, provisto de un detector DLATGS (Deuterated L- Alanine Doped Triglycene Sulphate) y equipado con un accesorio ATR modelo MIRacle, marca Pike Technologies, con cristal de diamante, en el rango de 4000 – 400 cm^{-1} con 24 escaneos por muestra, para graficar y analizar los diferentes espectros se usó el software OriginPro 2022

3.3. Procedimiento

La metodología desarrollada en el presente proyecto estuvo constituida por cinco fases como se muestra en la Figura 2. que tienen como fin dar cumplimiento a los objetivos planteados.

Figura 2

Diagrama general de la metodología experimental



Cada una de las etapas se realizó por triplicado y se describe a continuación:

3.4. FASE I. Recolección de la muestra

La muestra se recolectó en la ciudad de Cartagena en la playa el laguito, a una distancia de 100m de la playa y 1m de profundidad, con un volumen de muestra total de 5L, registrando las condiciones ambientales, posteriormente se trasladó a la ciudad de Pamplona en un termo frío a -4°C, y se conservó durante el estudio a esta temperatura.

3.5. FASE II. Tratamiento de la materia prima

3.5.1. Grava

Inicialmente se midió la humedad de la grava por medio de análisis gravimétrico y al

mismo tiempo se realizó la activación. Para ello se pesó un vaso de precipitado anterior y posterior al tratamiento térmico. Se pesaron 10,0000 g de grava aproximadamente que se depositaron en el vaso previamente pesado, luego se llevó a 300°C por 24 h en una mufla (Ney Vulcan D-550), la cual inicialmente se programó a una rampa de 10°C/min para llegar a la temperatura deseada, la misma rampa se utilizó para disminuir la temperatura luego del tiempo estipulado. Posteriormente el vaso de precipitado se llevó a un desecador por 12 h y se pesó para determinar el contenido de humedad. La grava utilizada presentaba un tamaño de partícula irregular de tonalidad blanca.

3.5.2. Arena de río

Inicialmente se midió la humedad de la arena de río por medio de análisis gravimétrico, al mismo tiempo se realizó la activación. Para ello se pesó un vaso de precipitado anterior y posterior al tratamiento térmico. Se pesaron 10,0000 g de arena de río aproximadamente que se depositaron en el vaso previamente pesado, luego se llevó a 300°C por 24 h en una mufla (Ney Vulcan D-550), la cual se programó a una rampa de 10°C/min para llegar a la temperatura deseada, la misma rampa se utilizó para disminuir la temperatura luego del tiempo estipulado. Posteriormente el vaso de precipitado se llevó a un desecador por 12 h y se pesó para determinar el contenido de humedad. La arena de río presentaba algunas características como tamaño de partícula granular, bastante humedad, color gris y algunas piedras blancas y negras.

3.5.3. Arcilla

Para la arcilla inicialmente se realizó el mismo procedimiento descrito en la grava. Posteriormente se realizó un lavado con solución de peróxido de hidrogeno H_2O_2 4% v/v usando

10 mL de solución por cada gramo de arcilla, agitando durante 10 minutos. Seguido se dejó sedimentar durante algunos minutos y se filtró. Luego se realizó un lavado con agua potable, por último, se volvió a filtrar y se secó a una temperatura entre 50-60 °C durante 4 horas aproximadamente. La arcilla utilizada presentaba algunas características como tamaño de partícula regular de color durazno.

3.5.4. Carbón mineral

La activación del carbón se desarrolló realizando el mismo procedimiento descrito en la grava. Posteriormente se realizó un lavado con una solución de hidróxido de sodio NaOH a una concentración de 1 M usando 10 mL de solución por cada gramo de carbón, agitando durante 20 min. Posteriormente se dejó sedimentar durante algunos minutos y se filtró. En seguida se lavó con agua potable y sometió a una Temperatura de 300°C durante 1 hora. El carbón utilizado presentaba un tamaño de partícula irregular, color negro y algunas partículas color beige.

3.6. FASE III. Determinación del orden y el grosor de las capas

3.6.1. Grosor de las capas

Para determinar el grosor de las capas se evaluó la capacidad de retención de cada uno de los materiales por separado y en conjunto, posteriormente se realizó una comparación con los filtrados de cada ensayo. A todos los filtrados se les realizó un seguimiento por conductividad, pH y temperatura con un pH- metro marca SCHOTT CG 842 el cual se verificó realizando una curva de calibración con KCl.

3.6.1.1. Dispersión con cada material.

Se pesó aproximadamente 1 g de carbón mineral y se mezcló con 10 mL de agua de mar agitando durante 10 min. a 330 rpm en una manta de agitación (DLAB MS7-H550-Pro), posteriormente se dejó sedimentar durante aproximadamente 5 min., se filtró y se midió la conductividad, pH y Temperatura. El procedimiento se repitió, pero dejando sedimentar la mezcla durante 1 hora.

Siguiendo el mismo procedimiento se repitió para cada uno de los materiales (carbón mineral, arcilla, grava y arena de río). De lo anterior se logró establecer la necesidad de disminuir la cantidad de carbón mineral tratado a 0,5000 g, para evitar problemas en el pH.

3.6.1.2. Dispersión de los materiales en conjunto.

Para determinar la capacidad de remoción de todos los materiales en conjunto se realizó un ensayo de dispersión, en el cual se pesó 0,25 g de cada material mezclados con 10 mL de agua de mar, agitando durante 10 min. a 340 rpm en una manta de agitación (DLAB MS7-H550-Pro), posteriormente se filtró y se midió la conductividad, pH y Temperatura. Así mismo el procedimiento se realizó dejando sedimentar por 1 horas.

3.6.2. Determinación del orden

Para determinar el orden de las capas inicialmente se estudió el total de combinaciones posibles las cuales fueron 24, se pesó 2 gramos de cada material registrando el tiempo que tardó el agua en travesar la columna, para este ensayo el tiempo fue largo debido a la cantidad de arcilla por lo que se decidió disminuirla a 1 g. Posteriormente se realizaron los 24 ensayos por triplicado como se muestra en la Figura 3., pesando 1 g de arcilla y 4 g de arena, 4 g de carbón y

4 g grava, se registró el tiempo que tardó el agua en atravesar cada columna y el nivel de coloración que aportó cada combinación al agua.

Figura 3

Montaje de los ensayos realizados para determinar el orden



3.7. FASE IV. Diseño del filtro

Para el diseño del filtro se tuvieron en cuenta las 2 mejores combinaciones, estas se seleccionaron de acuerdo al mejor tiempo, color, flujo y control de pH en la solución de salida. Lo anterior llevó al diseño de una columna con 16 g de arena, 16 de grava, 2 g de carbón activado y 8 g de arcilla (Bajo los dos siguientes ordenes de abajo hacia arriba, Primera=Carbón-Arcilla-Arena-Grava; Segunda= Arcilla-Arena-Grava-Carbón). Para cada una de las dos combinaciones se le agregó 40 mL de agua de mar inicialmente, recolectando viales de 4mL a la salida, posteriormente para evitar que se secará la columna se agregaron dos porciones más de 10mL de agua de mar, una cada 30 min, lo anterior con el objeto de completar 12 viales.

3.8. FASE V. Estudio de las propiedades fisicoquímicas

3.8.1. Espectroscopia ultra violeta visible (UV-VIS)

3.8.1.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Inicialmente se tomó 1 mL de cada muestra y se diluyó a 25 mL, se programó la longitud de onda para el caso de la DQO 435 nm. Posteriormente se purgaron las celdas con agua destilada, luego se adicionó el blanco dejando 1 cm abajo del borde, se secó y se introdujo en el compartimiento del espectrofotómetro marca SHIMADZU, modelo UV-2401PC una vez ubicada la celda se cerró el compartimiento del equipo para realizar la medición. Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras a evaluar.

3.8.1.2. Nitritos.

Inicialmente se tomó 1 mL de cada muestra y se diluyó a 25 mL, luego se tomaron 10 mL de esta disolución agregando 3 gotas de indicador, posteriormente se programó la longitud de onda para el caso de los nitritos 371 nm. Seguidamente se purgaron las celdas con agua destilada, luego se adicionó el blanco dejando 1 cm abajo del borde, se secó y se introdujo en el compartimiento del espectrofotómetro (HACH DR 3800) una vez ubicada la celda se cerró el compartimiento del equipo para realizar la medición. Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras a evaluar.

3.8.1.3 Color.

Inicialmente se programó la longitud de onda para el caso del color 120 nm. Posteriormente se purgaron las celdas con agua destilada, luego se adicionó el blanco dejando 1

cm abajo del borde, se secó y se introdujo en el compartimiento del espectrofotómetro (HACH DR 3800) una vez ubicada la celda se cerró el compartimiento del equipo para realizar la medición. Este procedimiento se repitió para cada una de las muestras a evaluar.

3.8.2. Técnicas de caracterización

Para los análisis por ATR-FTIR se empleó en un equipo marca Shimadzu Prestige-21, en el rango de 4000 - 400 cm^{-1} , con 24 scans. Para los análisis de DRX se empleó un difractómetro con geometría DaVinci, Bruker en el rango de 2 a 70° 2theta, con paso de 0,150° 2 theta. Para El FRX un espectrofotómetro con capacidad de análisis de sodio Na a uranio U, con lampara de rodio, geometría DaVinci, Marca Bruker. La técnica de adsorción-desorción de gases se llevó a cabo en un equipo Micromeritics Asap 2020 plus usando como gas de adsorción Nitrógeno a 77K. Para ello, con anterioridad las muestras se sometieron a desgasificación durante 10 horas hasta alcanzar 10 μmHg , durante este proceso se elevó la temperatura hasta 350°C.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. FASE I. Recolección de la muestra.

Con el fin de evaluar las condiciones reales del agua de mar se decidió tomar una muestra en la ciudad de Cartagena, playa el laguito está se encuentra ubicada al fondo de la playa boca grande. La muestra se tomó a una distancia aproximada de 100m de la playa y 1m de profundidad, registrando unas condiciones ambientales de 32°C de Temperatura, humedad del 72% y clima despejado con oleaje alto. El volumen de muestra recolectada fue de 5L los cuales se transportaron a la ciudad de Pamplona para un estudio posterior, conservados a una temperatura de - 4°C.

4.2. FASE II. Tratamiento de la materia prima

La norma ASTM D2216 describe la determinación de humedad en laboratorios para rocas, suelos y mezclas de suelo, en la cual se exige que los tiempos de secado estén entre 8 y 24 horas aproximadamente a una temperatura estándar de 110°C, pero debido a que para este análisis es necesario que el material se encuentre completamente vacío fue necesario someterlo a una temperatura de 300°C durante 24 horas ([ASTM], 2019).

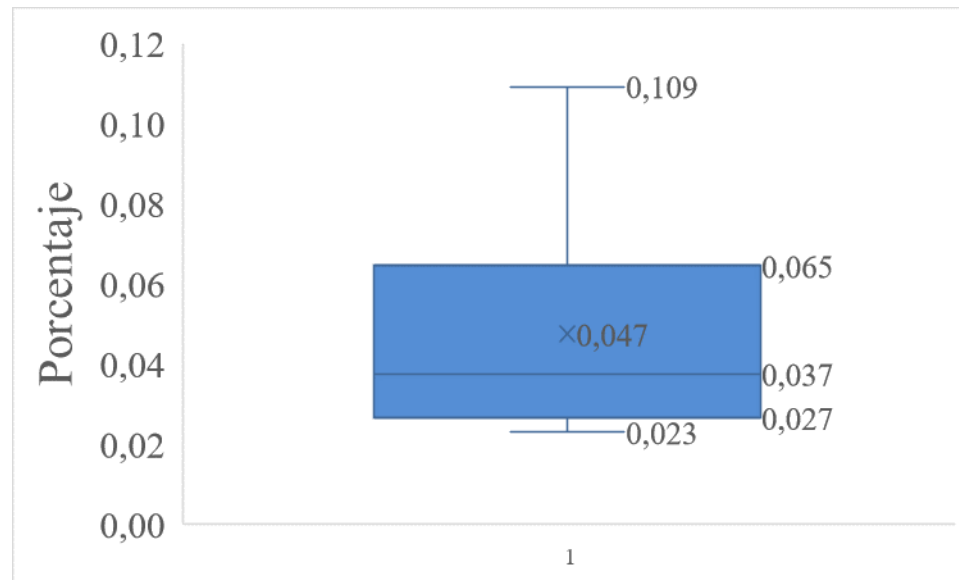
4.2.1. Grava

Al realizar el proceso de activación para los 12 ensayos que se muestran en la Tabla 10. (Anexo B) se obtuvo un porcentaje de humedad promedio de $0,047 \pm 0,003\%$ registrado en la Tabla 11. (Anexo B), dando una fiabilidad al porcentaje de humedad obtenido. La grava utilizada fue tipo caliza-calcita, compuesta en su mayoría por carbonato de calcio, esta presentaba tamaño no homogéneo por tal razón se obtuvo un diagrama de caja ancho, con datos en un rango entre

0,023 y 0,109 % de humedad como se muestra en la Figura 4., los cuales se hallaron usando la ecuación 1. (Ver Anexo A).

Figura 4

Porcentaje de humedad para la grava

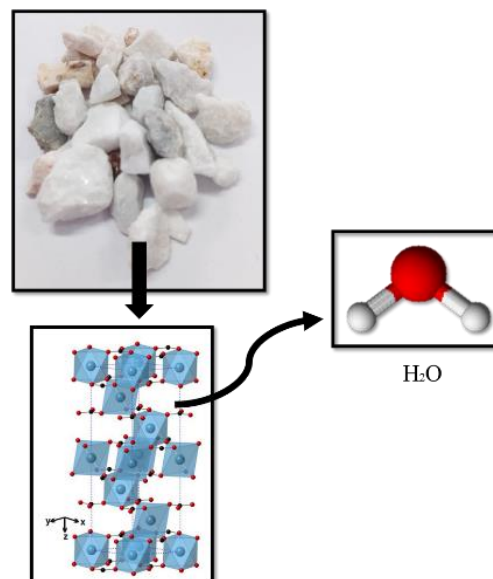


Según el análisis presentado por Rodriguez, (2006) donde se estudia la porosidad de las rocas carbonatadas, las cuales se encuentran entre 4 y 32%, permitiendo la preservación de espacios vacíos. Los vugs o cavidades se pueden presentar por disolución simple, fracturamiento o disolución a lo largo de las roturas de las rocas. Adicionalmente en la producción de cemento, se ha detectado que la caliza afecta la estructura de dichos poros, es decir cuando se utiliza un máximo del 35% de piedra caliza esta tiende a aumentar linealmente el tamaño capilar de 20 a 40 nm (Bracho et al., 2013). La Figura 5. muestra la estructura que posee la grava tipo caliza, de tal forma que los poros tienen la capacidad de retener moléculas de agua. Para este caso, el porcentaje de humedad fue de 0,042% que, comparado con análisis realizados mediante DSC-

TGA practicados para estudiar la afectación que sufre la caliza por exposición a la humedad, el resultado difiere significativamente ya que dicho promedio debería encontrarse en alrededor del 0,82% (Subramani et al., 2019), lo anterior puede deberse al pretratamiento realizado antes de la compra de la grava tipo caliza, que se suele vender como absorbente, por lo que se ha calcinado previamente.

Figura 5

Estructura de la grava tipo caliza



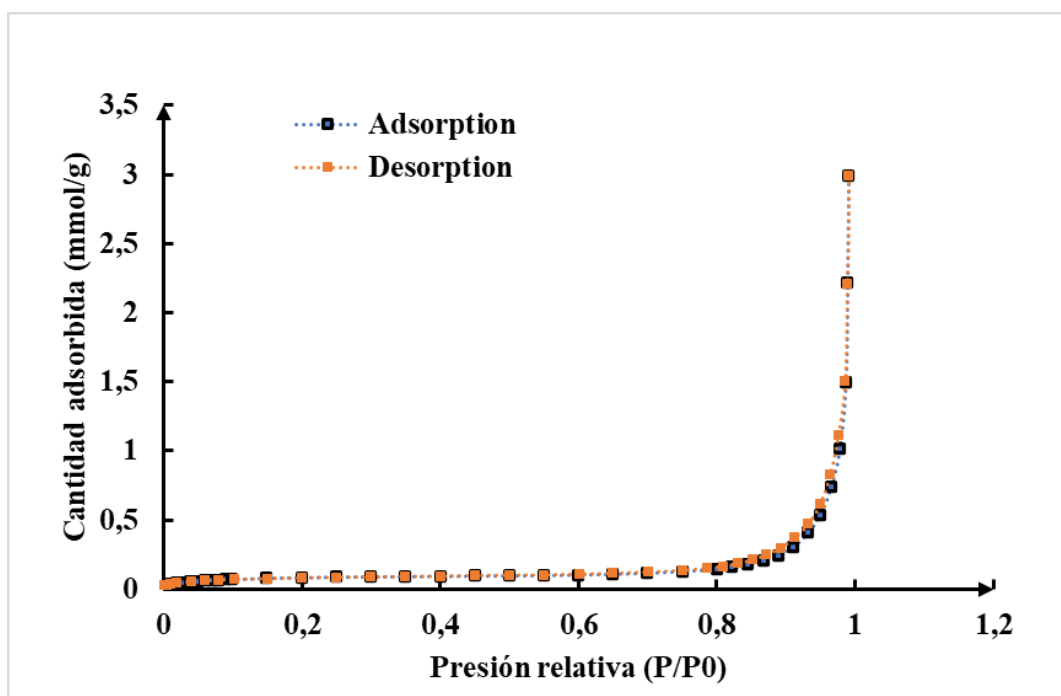
Fuente: Adaptación Propia

Se realizó un análisis de porosidad de gas obteniendo una isoterma de adsorción de nitrógeno (presión relativa, p/p_0 Vs cantidad adsorbida mmol/g) ver Figura 6, donde se describe una isoterma de adsorción tipo IIb estimada por el método de BET y BJH a una temperatura de activación de 350°C, este tipo de isoterma es común en materiales no rígidos, en la cual la curva de adsorción es diferente a la de desorción formando un ciclo de histéresis tipo 3, obteniendo un tamaño de poro 11,4 Å, que según la IUPAC se considera microporo, lo anterior indica que

podrían albergar las esferas de hidratación de los iones Na^+ y Cl^- que miden 2,3 y 3,2 Å respectivamente (Tsouris & Ridge, 2016).

Figura 6

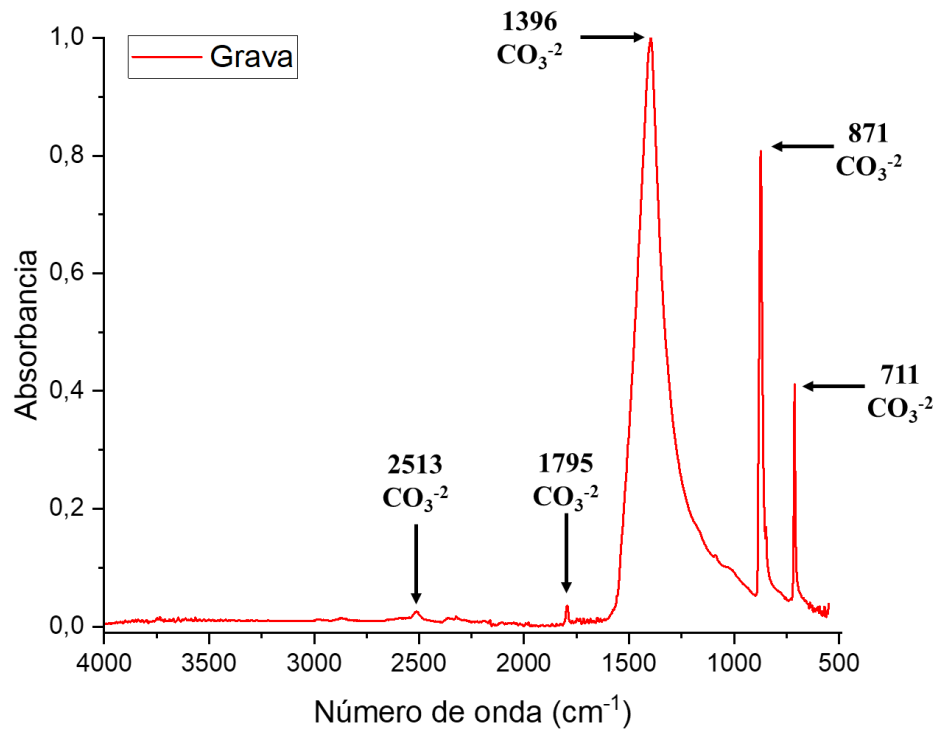
Isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K para la grava.



La Figura 7. muestra el espectro ATR-FTIR tomado para la grava el cual presenta un estiramiento solapado en 2513 cm^{-1} , una flexión solapada en el plano en 1795 cm^{-1} , una vibración de estiramiento en 1396 cm^{-1} , una flexión fuera del plano en 871 cm^{-1} y una flexión en el plano a 711 cm^{-1} todas las bandas corresponden a carbonato de calcio (Pesce et al., 2019; Poliszuk & Ybarra, 2019).

Figura 7

Espectro Infrarrojo para la grava



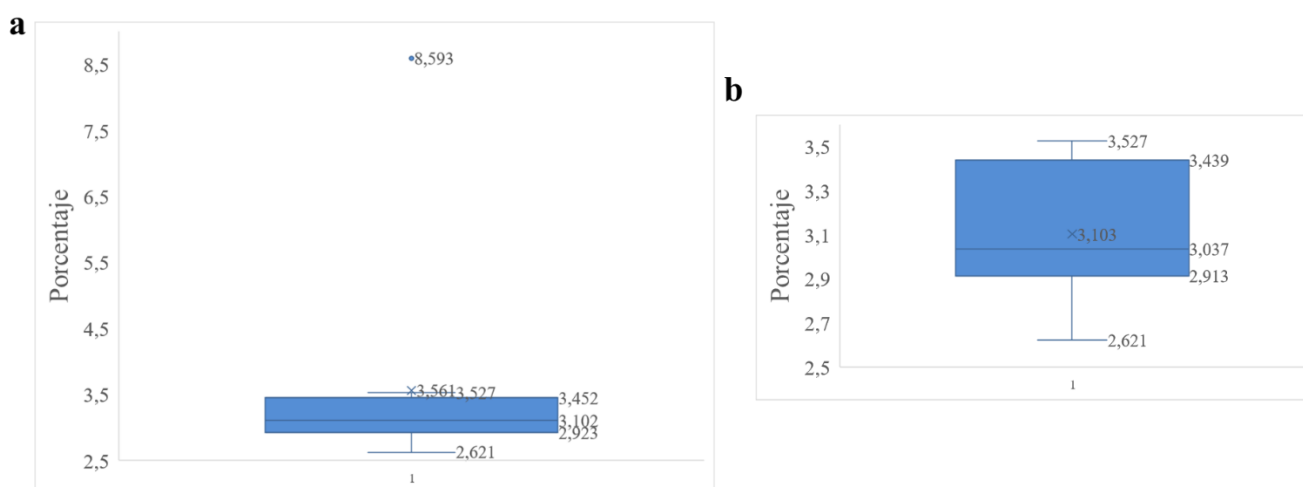
4.2.2. Arena de río

La Tabla 12. (Anexo C) muestra los datos tomados y el porcentaje de humedad obtenido para cada uno de los 12 ensayos, en la Tabla 13. (Anexo C), se presentan los datos estadísticos de la arena en donde se obtuvo un porcentaje de humedad promedio de $3,56 \pm 1,6\%$ lo cual nos indica una variación del 45% dado que en la Figura 8a. se observa un valor atípico de 8,593% de humedad por lo que fue necesario realizar una prueba T-student, usando la ecuación 2 (Ver Anexo A). obteniendo un valor de 0,8483, que comparado con 0,259 correspondiente al valor de la distribución T, utilizando una significancia de 0,4 para un total de 12 muestras, el valor calculado es mayor lo cual confirma que es un dato errado y es necesario excluirlo del conjunto

de datos obteniendo un promedio de humedad y una desviación estándar de $3,103 \% \pm 0,283$ ver Figura 8b. con datos en un rango entre 2,621 y 3,527 % de humedad.

Figura 8

a) Porcentaje de humedad de la arena de río b) Porcentaje de humedad de la arena de río después del T-student.

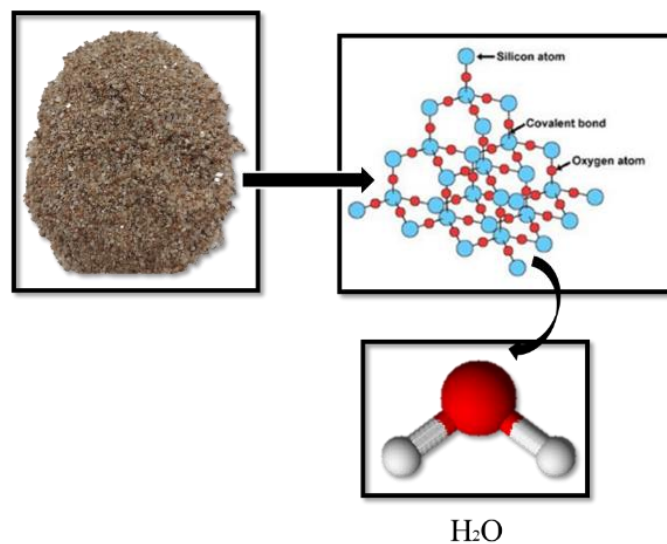


La arena está compuesta principalmente por oxido de silicio SiO_2 y oxido de aluminio Al_2O_3 , con porcentajes de 97 y 2%, respectivamente. De acuerdo con un análisis comparativo entre la porosidad y permeabilidad de la arena de río, dunas y playas se reportó que la porosidad crece a medida que aumenta el tamaño y dependiendo de la procedencia oscila entre 40 y 58%, en el caso de las arenas de playa contienen un 5,5 % de poros, las arenas de río suelen contener un 3,8% de poros y las arenas de dunas eólicas un 4% de poros (McBride, 1992), el porcentaje de humedad característico de la arena se encuentra entre 2 y 8 % esto se debe a la estructura como se muestra en la Figura 9. y su naturaleza hidrofílica, que comparado con el obtenido 3,103% se localiza dentro del rango (Garavito, 2022), un estudio realizado por el Centro

Nacional de Laboratorios de Investigación en Geociencias, Kaduna, Nigeria reportó que el contenido de humedad para arena de playa es de 8,64% para un tamaño de grano entre 0,18 y 0,25 mm los cuales se obtuvieron mediante la técnica de (Bala & Khan, 2014), en el caso particular de la arena de río, la organización de investigación científica 06100 ankara Turquía, realizó un estudio acerca de la posible influencia de las características de la arena en la anidación de la tortuga verde tomando un total de 1056 muestras en la playa Samandag y en la desembocadura del río Así, a las cuales se les realizó un análisis gravimétrico arrojando que 738 muestras tuvieron un tamaño entre 150 y 425 μm con un porcentaje de humedad entre 0,19 y 4,9 % (Beach & Go, 2007).

Figura 9

Estructura de la arena de río



Fuente: Adaptación propia

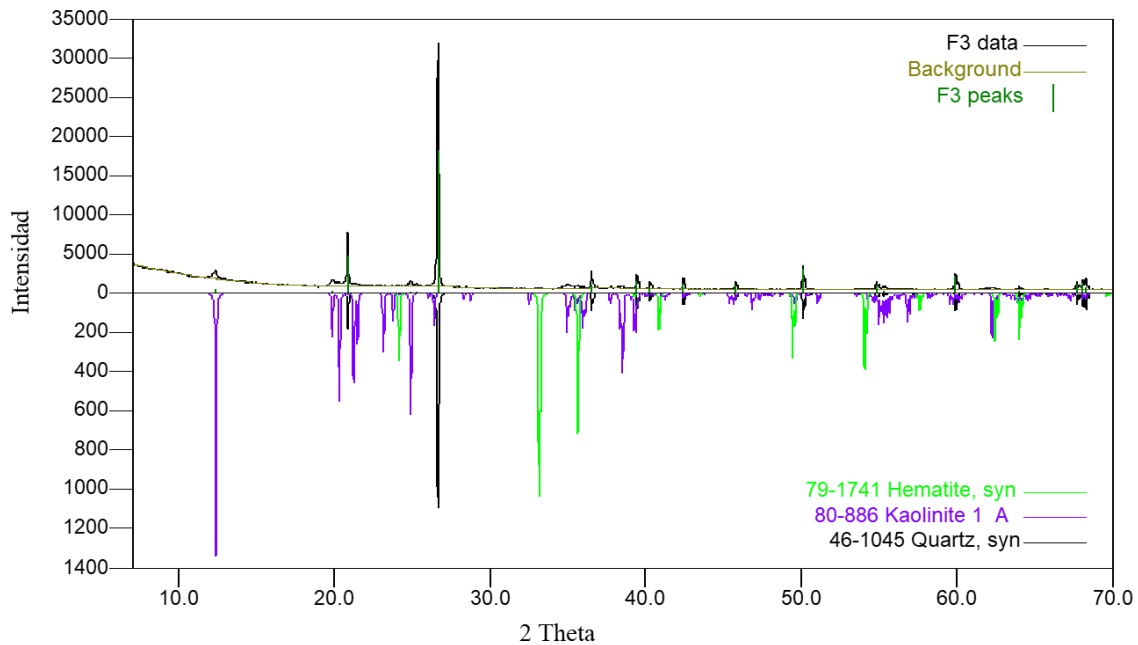
Sin embargo, debido a la necesidad de establecer qué tipo de arena de río y arcilla fueron utilizadas y a la coloración que estaba aportando la arcilla, se hizo necesario realizar un análisis de DRX el cual permitió identificar sus principales componentes.

La figura 10. muestra el análisis de DRX realizado a la arena, en el cual se muestra presencia de Hematita u óxido férrico Fe_2O_3 el cual posee una apariencia muy variable de color pardo rojizo usado como pigmento de la pintura roja algunas de sus propiedades son: estabilidad química en ambientes acuosos y baja conductividad. Por otro lado, la Caolinita es un mineral arcilloso de tipo 1:1 que adsorbe eficientemente iones metálicos hidratados (Chang et al., 2023).

Zhang et al., (2021) investigaron los mecanismos de adsorción de Mg^{2+} y K^+ en superficie de caolinita utilizando cálculos de teoría DFT y AIMD obteniendo que el Mg^{2+} se adsorbe más fácilmente en la superficie de la caolinita que el K^+ . Por otro lado Chang et al., (2023) midió el calor de hidratación y el comportamiento de adsorción entre la caolinita y diferentes concentraciones de NaCl y MgCl mediante QCM-D en el cual el calor generado por la mezcla de caolinita con diferentes soluciones iónicas aumenta al aumentar la valencia del catión metálico y la concentración de iones. El aumento de la concentración de iones conduce a un aumento de la adsorción de iones metálicos en la superficie de la caolinita y se clasificaron de mayor a menor de la siguiente manera $\text{Al}^{3+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}$.

Figura 10

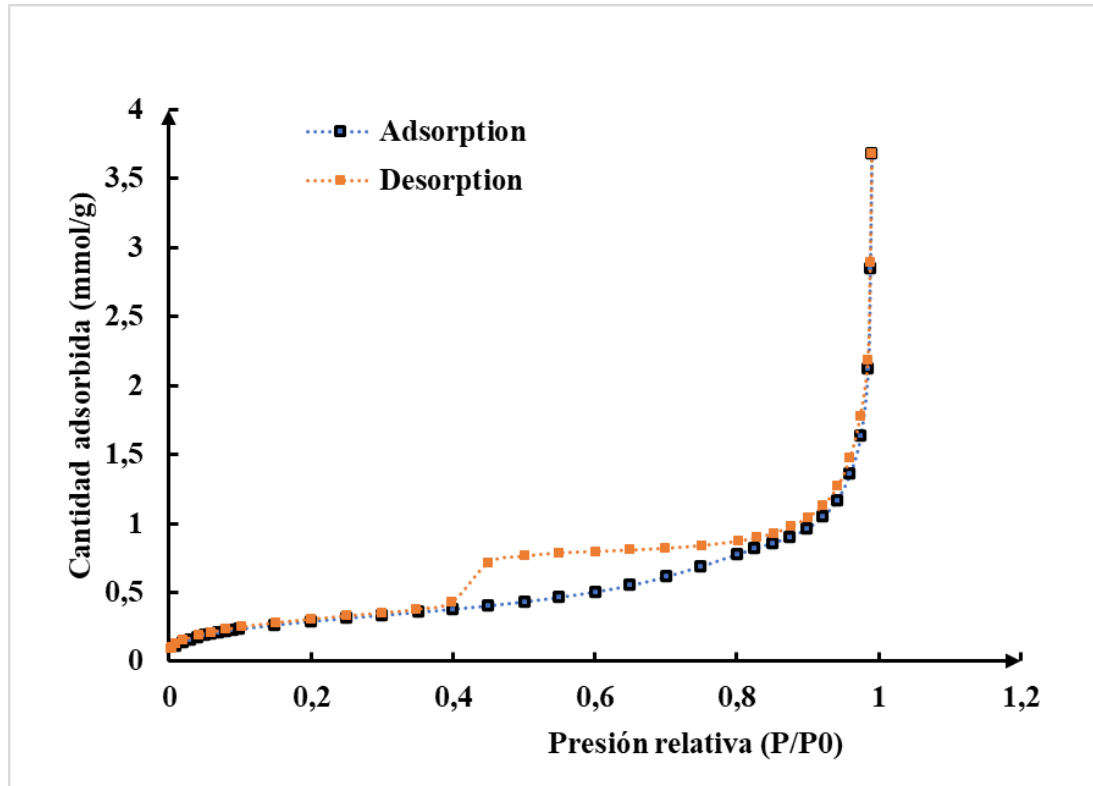
Análisis de difracción de Rayos X (DRX) para la arena de río



Para determinar la isoterma de N₂ para la arena de río, se realizó mediante el mismo método especificado en la grava, obteniendo una isoterma tipo IVa ver Figura 11., con un tamaño de poro de 11,46 Å y un ciclo de histéresis tipo 4, la cual proporciona una mayor contribución en la adsorción de microporos. Villajos, (2017) realizó un estudio en donde la esfera de hidratación del ion Li⁺, Na⁺ y K⁺ fue de 7,6, 7,2 y 6,6 Å respectivamente que comparado con el tamaño de poro de la arena tiene la capacidad de retener los iones que se encuentran presentes en el adsorbato.

Figura 11

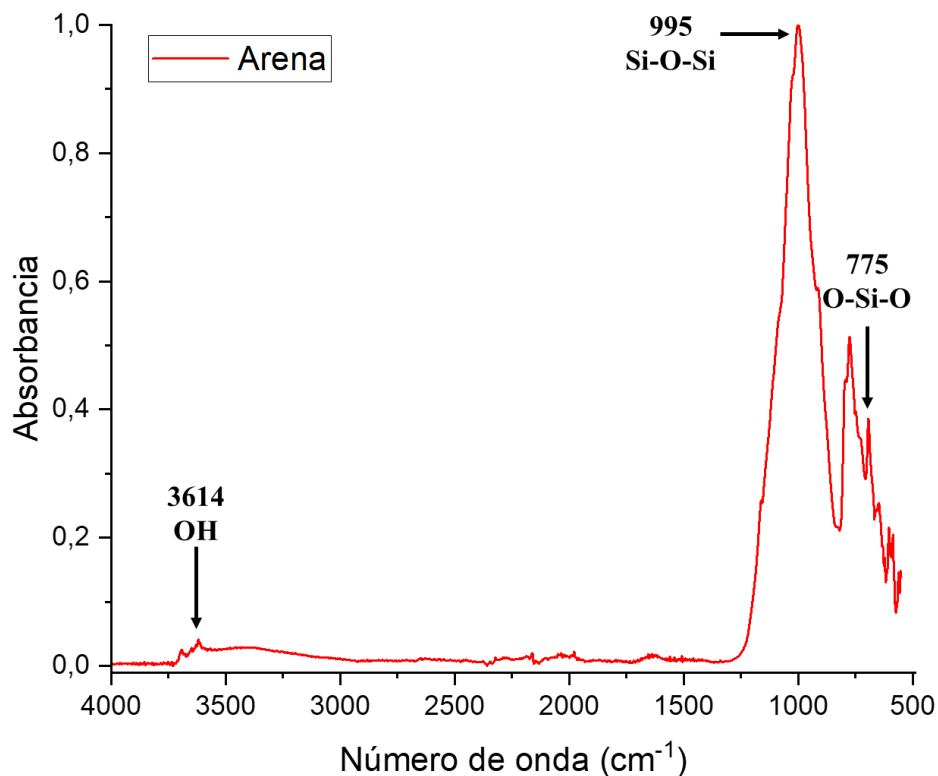
Isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K para la arena de río



Para la arena de río se obtuvo el espectro ATR-FTIR mostrado en la Figura 12. El cual presenta una banda en 3614 cm^{-1} correspondiente a una vibración de estiramiento del grupo hidroxilo, una banda más intensa en 995 cm^{-1} la cual corresponde a un estiramiento de los enlaces Si-O-Si y una banda en 775 cm^{-1} correspondiente a vibraciones de O-Si-O (Mouhri et al., 2020; Sabiha et al., 2016; Syazwan et al., 2019).

Figura 12

Espectro Infrarrojo para la arena de río



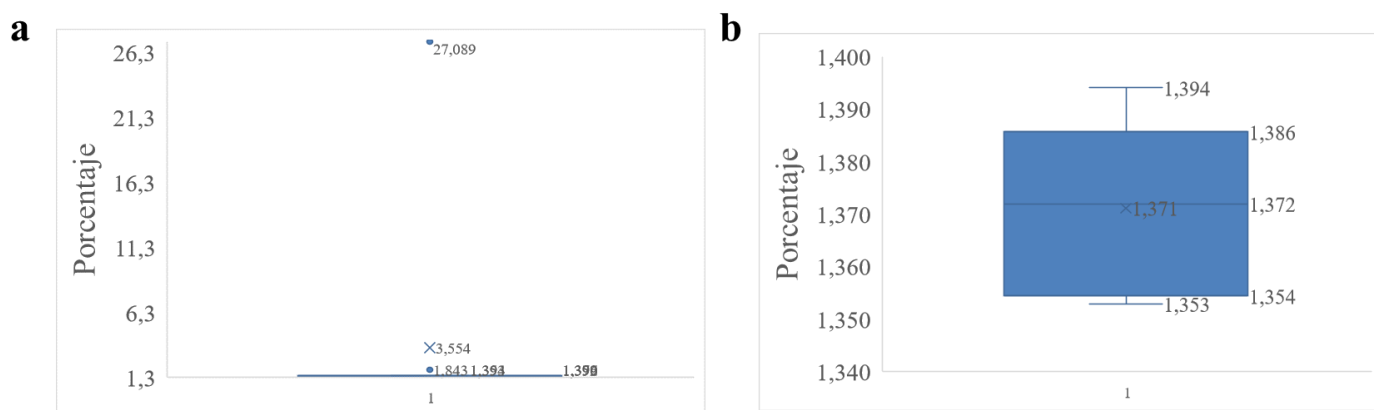
4.2.3. Arcilla

La Tabla 14. (Anexo D) muestra el porcentaje de humedad obtenido para cada uno de los 12 ensayos, a los que se les realizó un análisis estadístico que se muestra en la Tabla 15. (Anexo D) obteniendo un porcentaje de humedad promedio de $3,55\% \pm 7,4$ de desviación estándar la cual es bastante alta y observando la Figura 13a. se muestran dos datos atípicos 27,08 y 1,84 a los cuales se les realizó una prueba T-student usando la ecuación 2. (Ver Anexo A) de la cual se obtuvo los valores de 0,98 y 0,91 respectivamente que comparado con el 0,259 correspondiente al valor de la distribución T, utilizando una significancia de 0,4 para un total de 12 muestras, los

dos valores calculados son mayores por lo que es necesario excluirlos del conjunto de datos. Obteniendo así un porcentaje de humedad de $1,37 \pm 0,015$ de desviación estándar como se muestra en la Figura 13b.

Figura 13

a) *Porcentaje humedad de la arena* b) *Porcentaje humedad de la arena después del T-student*

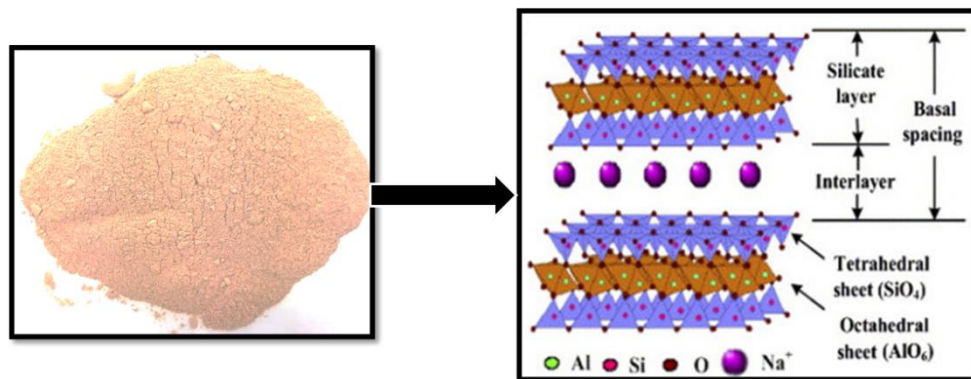


La arcilla usada fue de tipo montmorillonita, es un mineral arcilloso muy común y la más estudiada, pertenece a la familia de arcillas de esméctica, posee una estructura de capa 2:1, es decir consta de dos capas de sílice tetraédrica separadas por una capa de alúmina octaédrica como se muestra en la Figura 14. además, posee una carga residual negativa que es compensada por cationes en los espacios entre capas. La porosidad de la montmorillonita depende del pH de la solución es decir que a medida que este aumenta, se crea una estructura más porosa, debido a que las fuerzas de repulsión entre capas se vuelven dominantes, con pH de 2,5 a 4 la estructura se considera microporosa menos de 20 Angstroms, para pH de 4 a 5 posee mesoporos entre 20 y 500 Å y para pH de 9 la estructura se considera macroporosa mayor a 500 Å, en el caso de las

arcillas a las cuales no se les realiza ningún tipo de activación poseen porosidad entre 60 y 1000 Å (Dogu & Altin, 1999). Las arcillas poseen características hidrofílicas lo que provoca una expansión por lo cual fue necesario disminuir la capa de arcilla para evitar un taponamiento en la columna.

Figura 14

Estructura de la arcilla



Fuente: Adaptación propia

A partir del análisis de DRX ver Figura 15., se pudo identificar que los principales componentes de la arcilla estudiada fueron: la Clinoptilolita con una presencia de 43,8%, la cual posee un tamaño de poro entre 1,5 a 5 nm, su estructura presenta tres canales huecos: un canal formado por anillos contiguos y dos canales paralelos como se muestra en la Figura 16. (Hernández, 2010). De igual forma contenía Cuarzo en un 25,2% este mineral es el más común, constituido por oxígeno O y Silicio Si, también presento un 2,8% de albita, 0,3% de calcita y 4,8 % de monmorillonita, el cual es un porcentaje bajo debido a la estructura amorfa que presentan estas arcillas.

Figura 15

Análisis de difracción de Rayos X (DRX) para la arcilla

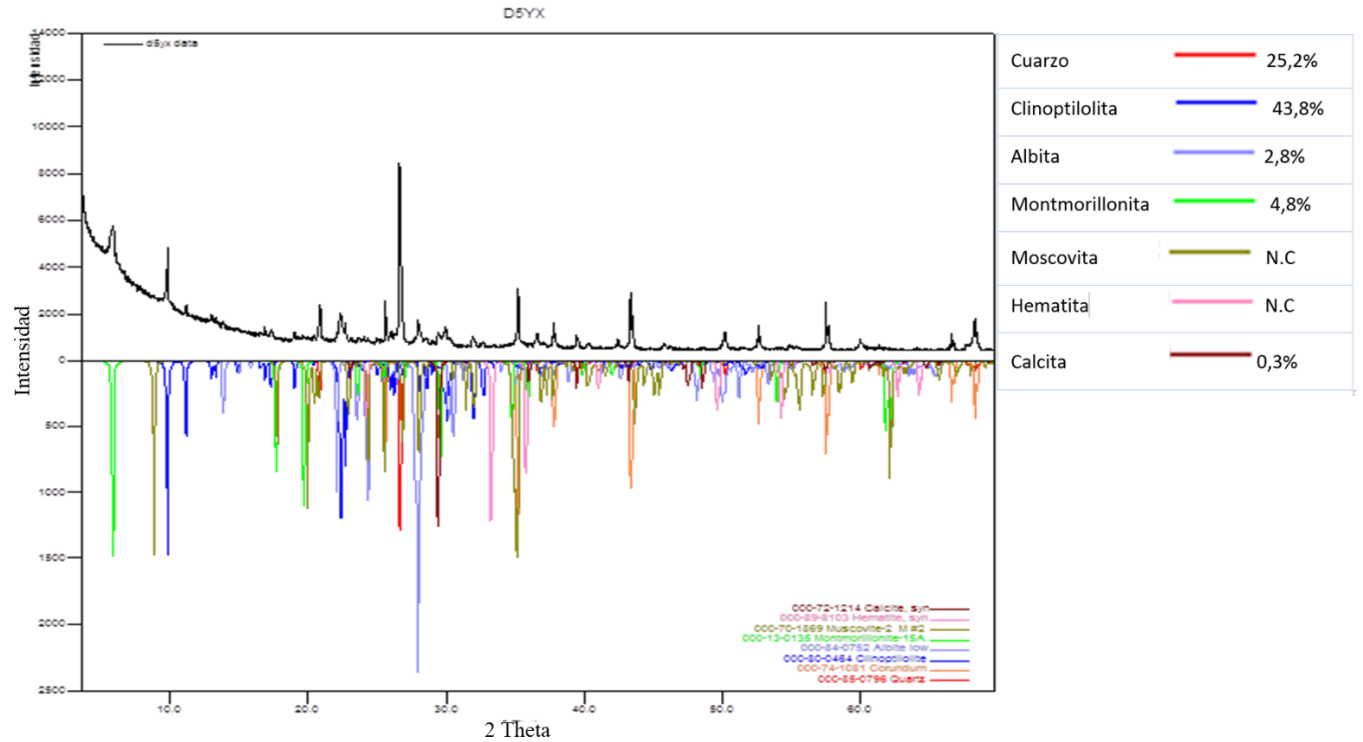
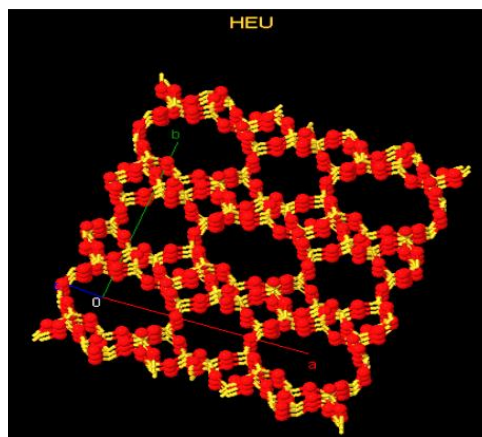


Figura 16

Estructura de la Clinoptilolita

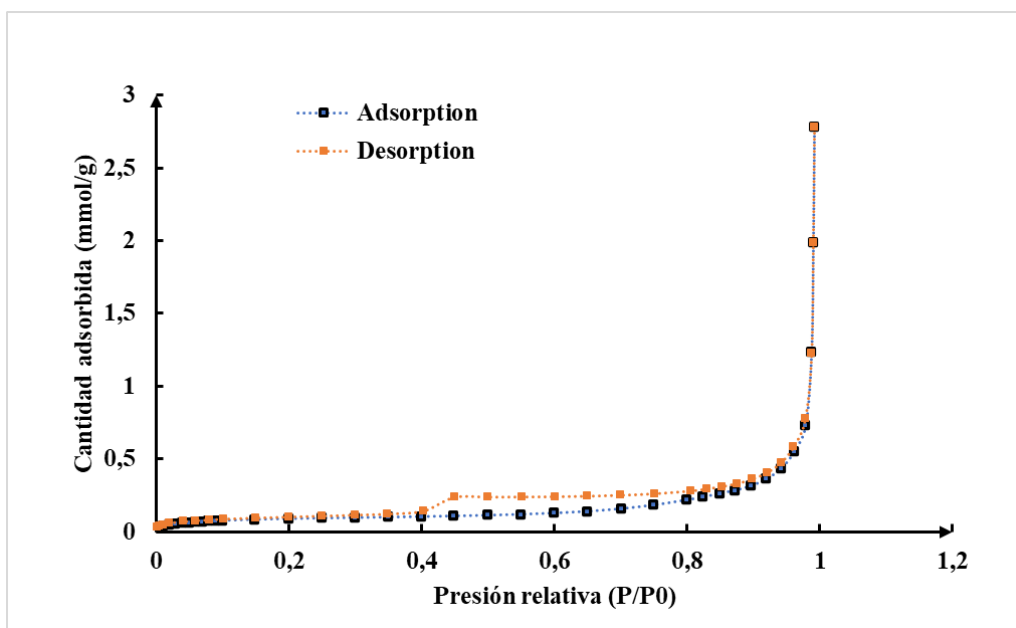


Fuente: (Hernández, 2010)

Para la arcilla se obtuvo una isoterma de N₂ tipo IVa ver Figura 17. la cual es muy frecuente en este tipo de material que por lo general se debe a la presencia de cuarzo dentro de los adsorbentes microporosos (Hernández, Rojas, 2010), obteniendo un tamaño de poro de 11,22 Å y un ciclo de histéresis tipo 4, Sáenz, (2014) evaluó la primera esfera de hidratación del ion Ca⁺² conteniendo 6 moléculas de agua a 2,45 Å simulado mediante el método de Hartree-Fock restringido con el conjunto de funciones base 6-31G* que comparado con los resultados obtenidos en el método de Møller-Plesset con perturbación de segundo orden con el conjunto de funciones base Def2-SVP coinciden cualitativamente, en este caso con una distancia de 2,76 Å entre Ca-O lo anterior indica que podría adsorber iones de calcio.

Figura 17

Isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K para la arcilla

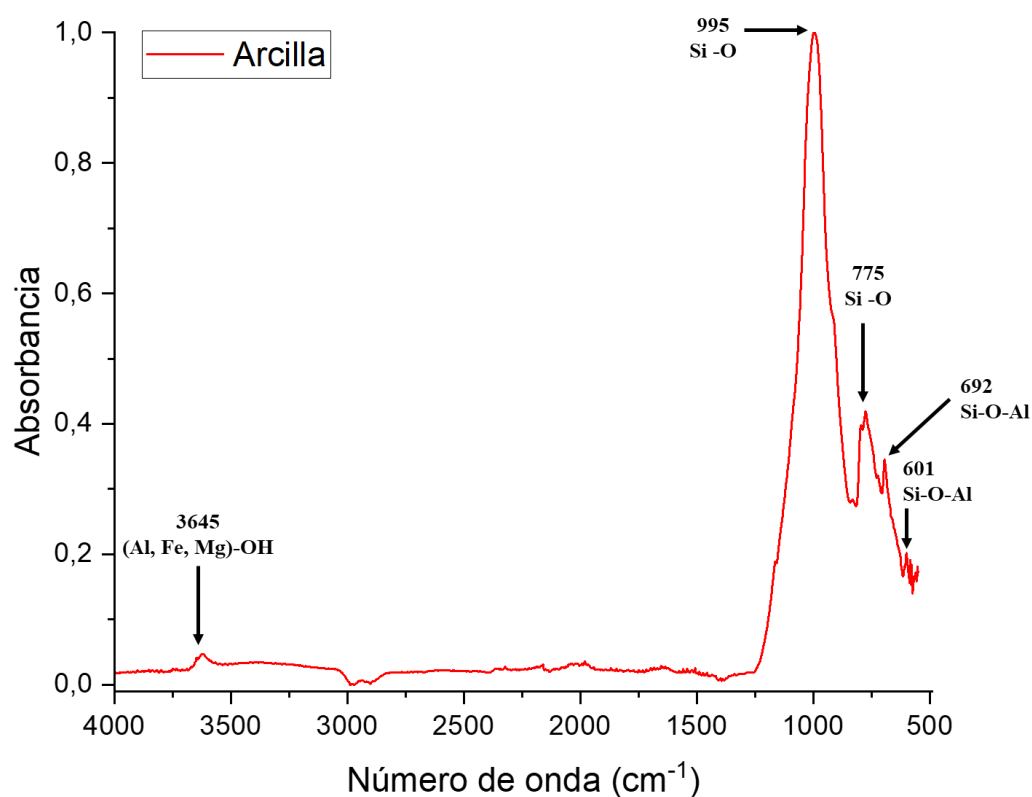


El espectro Infrarrojo por Transformada de Fourier y Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR) para la arcilla fue tomado como se mencionó en la metodología obteniendo la Figura 18.

En la cual se observa una vibración de estiramiento en 3465 cm^{-1} correspondiente a los enlaces de Al, Fe, Mg con el grupo hidroxilo, una banda más intensa en 995 y 775 cm^{-1} correspondiente al estiramiento de Si-O la cual puede corresponder a la presencia de caolinita o cuarzo y dos bandas en 692 y 601 cm^{-1} correspondiente a vibraciones de Si-O-Al (Elgamouz & Tijani, 2018; Formation et al., 2018; District, 2020; Larbi et al., 2015).

Figura 18

Espectro infrarrojo para la arcilla



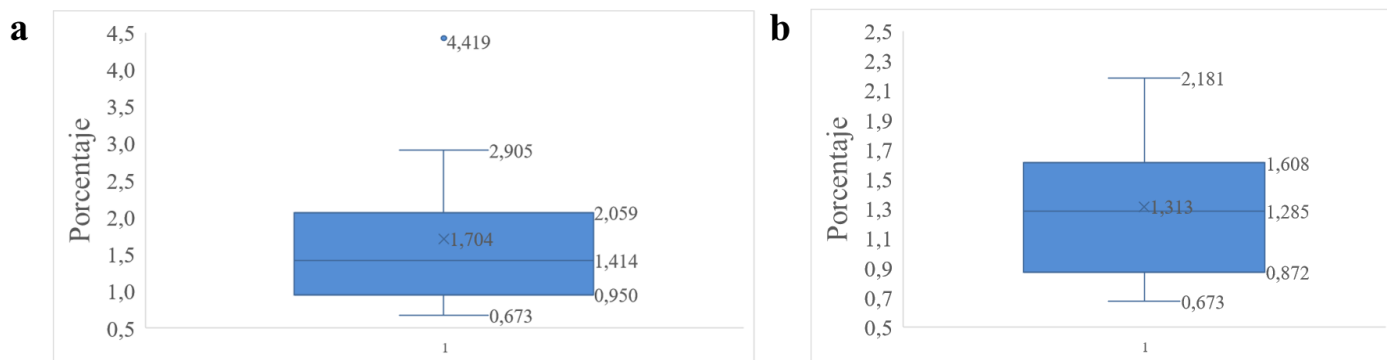
4.2.4 Carbón Mineral

La Tabla 16. (Anexo E) muestra los porcentajes de humedad obtenido para los 12 ensayos a los que se les realizó un análisis estadístico como se muestra en la Tabla 17. (Anexo E)

obteniendo un porcentaje de humedad promedio de $1,7\% \pm 1,05$ de desviación estándar la cual es bastante alta y observando la Figura 19a. se muestran dos datos atípicos 4,419 y 2,905 a los cuales se les realizó una prueba T-student usando la ecuación 2 (Ver Anexo A) de la cual se obtuvo los valores de 0,40 y 0,54 respectivamente que comparado con el 0,259 correspondiente al valor de la distribución T, utilizando una significancia de 0,4 para un total de 12 muestras, los dos valores calculados son mayores por lo que es necesario excluirlas del conjunto de datos. Obteniendo así un porcentaje de humedad de $1,31 \pm 0,64$ de desviación estándar como se muestra en la Figura 19b.

Figura 19

a) Porcentaje humedad del carbón b) Porcentaje humedad del carbón después del T-student.

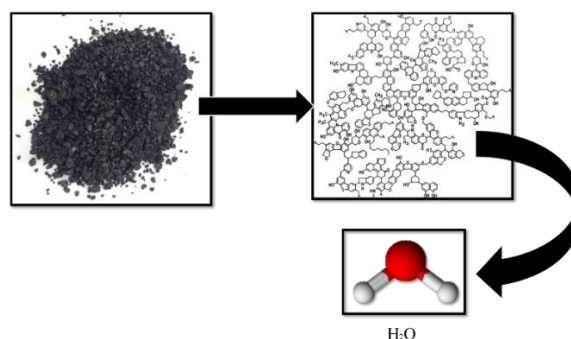


El carbón mineral es una mezcla de masa orgánica de alto peso molecular se caracteriza por una porosidad dual, que consiste en un sistema de microporos con diámetros de poro menores a 50 nm y macroporos diámetros mayores a 50 nm (Furmann et al., 2013) ver Figura 20. El centro analítico Mark Wainwright de la Universidad de Nueva Gales del Sur, realizó un estudio mediante gravimetría y porosidad de gas (helio), la cual se midió usando un porosímetro

automatizado para compararlo con imágenes micro – CT, que se llevaron a cabo utilizando un instrumento de escaneo helicoidal de campo grande y alta resolución, dando como resultado una porosidad de 8,0%, 12,8% y 9,4% respectivamente (Lamei et al., 2016; Sheppard et al., 2014). De forma similar Rodrigues & Sousa, (2002) uso 4 gases Helio (He), Nitrógeno (N₂), Metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), que consistió en traspasar cada uno de los gases a través de la estructura del carbón pero no tuvo en cuenta la afinidad de cada uno con el material. El porcentaje de humedad para el carbón mineral fue de 1,31% que comprado con un estudio realizado por la universidad de Atatürk, Erzurum Turquía en el cual se realizó un secado mediante un sistema que consta de un horno programable, dos reactores de acero inoxidable equipado con tres termopares de cromo-alumel y un registrador grafico multicanal para el monitoreo se obtuvo un porcentaje de humedad de 1,20% con un tamaño de partícula entre 250-850 um, por lo que se puede decir que el porcentaje de humedad obtenido en este caso es similar al reportado en la literatura (Ku, 2003).

Figura 20

Estructura del carbón mineral



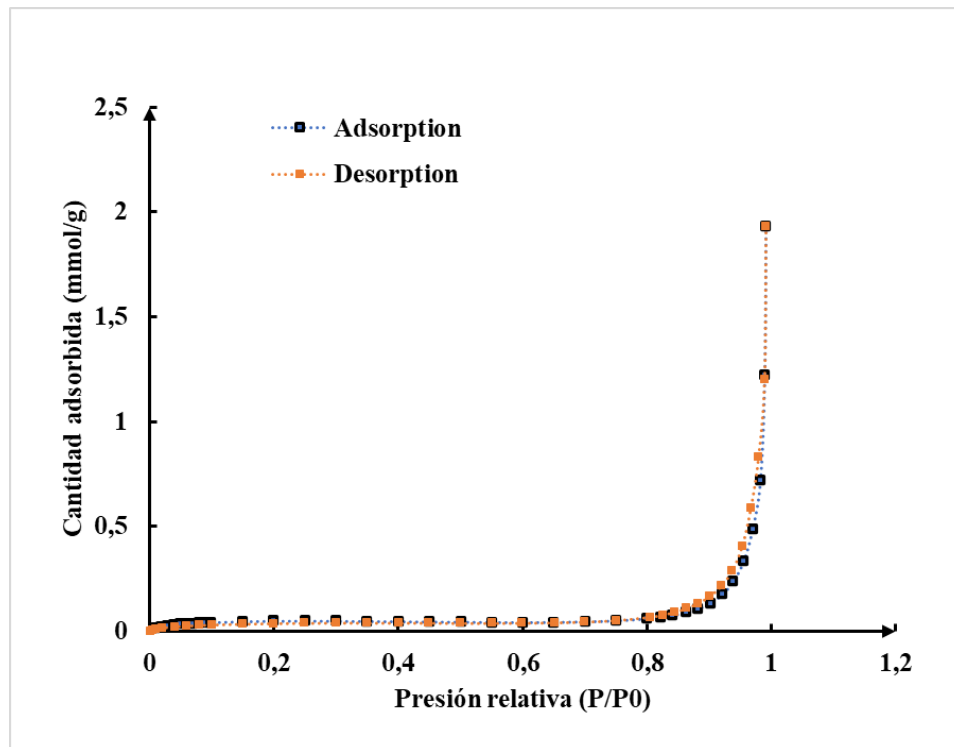
Fuente: Adaptación propia.

La Figura 21. muestra la isoterma de N₂ obtenida para el carbón activado la cual fue de tipo IIb característica de agregados no rígidos con un ciclo de histéresis tipo 3, obteniendo un tamaño de poro de 11,81 Å lo anterior indica que puede adsorber iones de Mg⁺² los cuales presentan un radio hidratado entre 4,92 y 7,32 máximo (Chandrasekaran & Barnard, 2019).

Finalmente, las isotermas de N₂ para los cuatro materiales (arcilla, grava, arena y carbón activado) clasifican la porosidad como microporos, que analizado con la esfera de hidratación de iones como Mg⁺², Li⁺, Na⁺, K⁺, Ca⁺² y Cl⁻ estos materiales poseen la capacidad de adsorber estos iones.

Figura 21

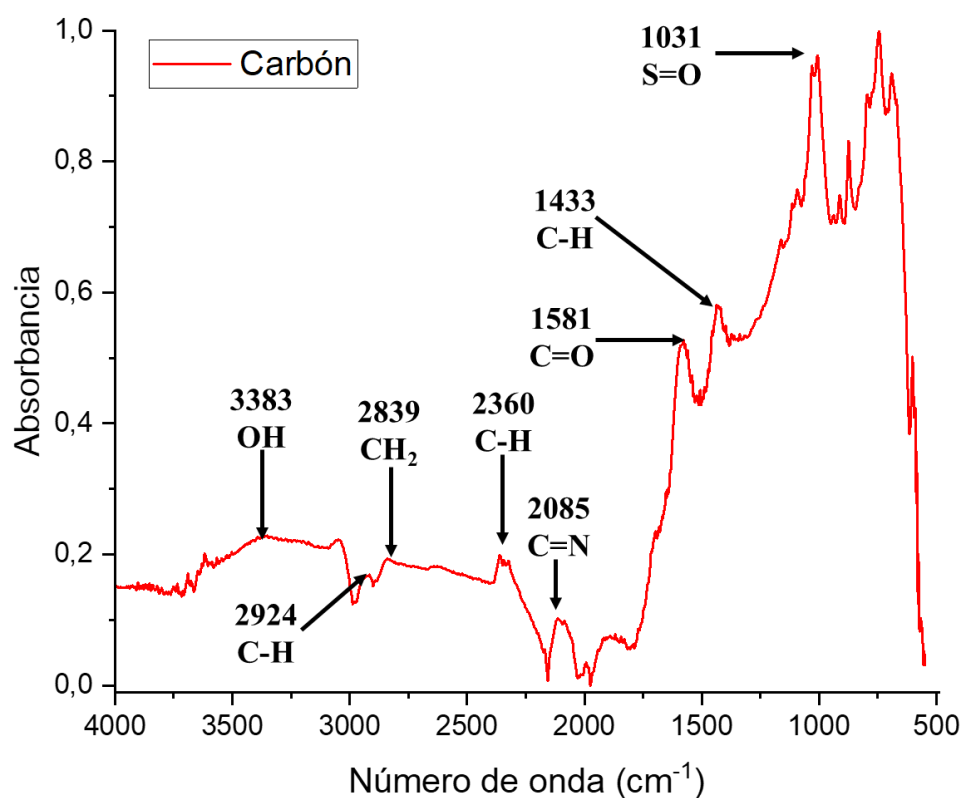
Isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K para el carbón activado



En la figura 22. Se muestra el espectro tomado para el carbón el cual presenta una banda en 2924, 2360 y 1433 cm^{-1} correspondientes a la vibración y estiramiento de los enlaces C-H, una banda en 3383 cm^{-1} debido a la presencia de grupos hidroxilos, carbonilos y fenólicos, una banda en 2839 cm^{-1} debido a un estiramiento simétrico del CH_2 , un pico en 2085 cm^{-1} debido a las vibraciones y estiramiento de $\text{C}\equiv\text{N}$, un estiramiento en 1581 cm^{-1} debido a la presencia de ácidos carboxílicos y un pico pequeño en 1031 cm^{-1} correspondiente a $\text{S}=\text{O}$ (Mojoudi et al., 2019; Nagalakshmi, 2019; Moyo et al., 2014).

Figura 22

Espectro Infrarrojo para el carbón



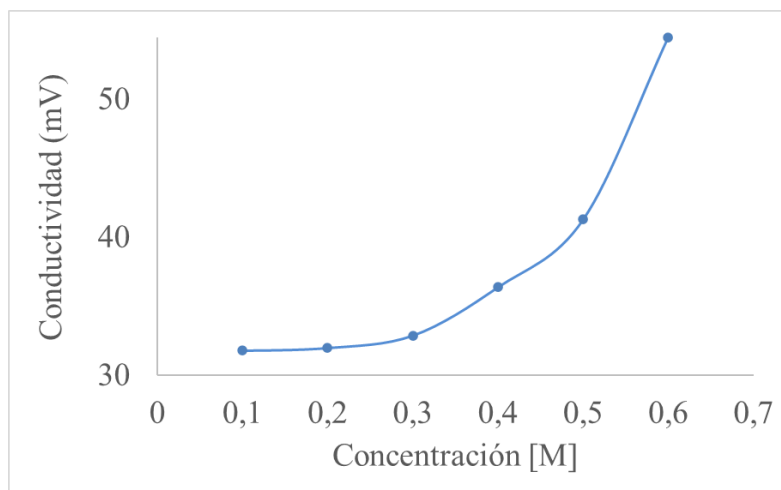
4.3. FASE III. Determinación del orden y el grosor de las capas

4.3.1. Calibración conductímetro

A partir de los ensayos realizados en el laboratorio, se estableció una curva de calibración con una solución de KCl (Figura 23.), lo cual permite una medición más exacta de la conductividad. Mediante este proceso se logró establecer que, al superar valores con concentraciones de 0,7M el conductímetro presenta saturación y arroja valores negativos para la conductividad, debido a que las interacciones asociativas entre los iones dificultan la conducción de la corriente, además la interacción entre los iones es disociativa a concentraciones bajas y asociativa a concentraciones altas.

Figura 23

Curva de calibración para el Conductímetro



4.3.1.1. Dispersión con cada material.

Para determinar el grosor de cada capa se realizó un análisis de dispersión obteniendo los datos que se muestran en la Tabla 3. La capacidad de adsorción de cada uno de estos materiales

depende de su estructura y del método de activación, para el caso del carbón, se realizaron dos activaciones, la primera térmicamente y la segunda mediante un lavado de NaOH a una concentración 1M, debido a la presencia de grupos funcionales aromáticos, hidrocarburos alifáticos y grupos estructurales que contienen oxígeno. A este último grupo pertenece el grupo funcional carboxilo, el cual se comporta como ácido debido a que el hidrogeno se puede disociar de la molécula generando un protón libre, lo que ocasiona un cambio brusco en el pH volviendo la solución más ácida. Después de realizar el lavado se volvió a medir la conductividad y pH (ver Tabla 3.) observando que este se torna básico y la conductividad muestra una disminución, por lo que se procedió a disminuir la capa de carbón activado hasta lograr que se mantenga un pH neutro.

Por otro lado, la porosidad de las arcillas depende del pH de la solución, es decir, al aumentar la basicidad se obtiene una mayor porosidad. Además, las arcillas poseen características hidrofílicas lo que genera un taponamiento en la columna debido a la expansión de la arcilla por su afinidad con el agua y su carácter básico. Por lo anterior, se decidió disminuir la capa de arcilla hasta tal punto que el flujo circulara con facilidad a lo largo de la columna, teniendo en cuenta la disminución de la conductividad la cual vario desde 313,7 a 13,7.

La arena presentó la mejor disminución de conductividad desde 313,7 a 12,2, con un pH de 7,52, por esta razón se aumentó su capa hasta obtener la mejor retención de aniones y cationes, por otro lado, la grava no mostro una disminución en la conductividad significativa, sin embargo, presenta una porosidad adecuada por tal razón se decidió incrementar su capa.

Tabla 3*Datos de conductividad por dispersión*

Material	Peso (g)	Conductividad (mV)	pH	T(°C)
Agua de Mar	-	313,7	8,21	19,4
Carbón activación térmica	1,0054	223,0	3,26	19,9
Carbón activación térmica y lavado	1,1742	135,6	9,35	18,4
Arena de río	1,0168	12,2	7,52	19,6
Arcilla	1,0163	13,7	7,55	18,8
Grava	1,0772	44,6	8,19	18,6

Adicionalmente, se realizó un ensayo que permitiera el seguimiento de los materiales actuar durante 1 hora con el agua de mar, obteniendo los datos reportados en la Tabla 4. en los cuales se observa que hay una disminución en el pH, pero la conductividad no muestra un cambio significativo a diferencia del anterior, por lo que se puede decir que los materiales después de un tiempo en reposo se saturan y presentan una desorción de la cantidad de aniones y cationes retenidos caso contrario a lo experimentado cuando los materiales se encuentran en columna.

Tabla 4*Dispersión de los materiales en conjunto después de 1 hora de sedimentación*

Material	Peso (g)	Conductividad (mV)	pH	T(°C)
Agua de Mar	-	311,6	7,96	20,0
Carbón después de lavado	1,0054	41,6	7,62	20,4
Arena de río	1,0168	31,2	7,43	20,5
Arcilla	1,0163	40,7	7,59	20,1
Grava	1,0772	59,9	7,94	20,0

4.3.1.2. Dispersión de los materiales en conjunto.

Con el fin de evaluar la capacidad de retención de los materiales en conjunto y determinar el grosor de cada una de las capas se realizó un ensayo de dispersión, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 5. Lo cual muestra una disminución en el pH y la conductividad, con las características observadas en estos dos ensayos, se buscó el mejor ajuste para la cantidad de cada uno de los materiales que genere la mejor retención de aniones y cationes.

Tabla 5

Dispersión de los materiales en conjunto

N	Material	Peso (g)	Conductividad (mV)	pH	T(°C)
	Agua de Mar	-	308,3	8,09	18,9
1	Carbón	0,2500	33,8	6,47	18,9
	Arena de río	0,2739			
	Arcilla	0,2546			
	Grava	0,2589			
2	Carbón	0,266	34,0	6,46	19,0
	Arena de río	0,2499			
	Arcilla	0,2930			
	Grava	0,2593			
3	Carbón	0,2544	35,7	6,43	19,1
	Arena de río	0,2653			
	Arcilla	0,2496			
	Grava	0,2685			

Evaluando la capacidad de retención de los materiales en conjunto se dejaron actuar durante una 1 hora con el agua de mar obteniendo los datos reportados en la Tabla 6. observando

que no hay una retención significativa y tampoco una variación en el pH, que al igual a los ensayos de los materiales por separado puede deberse a que los materiales se saturan y posteriormente presentan una desorción de lo retenido, como también al sistema de reposo al que están expuestos.

Tabla 6

Dispersión de los materiales en conjunto después de 1 hora de sedimentación

N	Material	Peso (g)	Conductividad (mV)	pH	T(°C)
	Agua de Mar	-	311,6	7,96	20
1	Carbón	0,2765	43,8	7,65	20,3
	Arena de río	0,2922			
	Arcilla	0,2514			
	Grava	0,2665			
2	Carbón	0,2563	50,4	7,76	19,8
	Arena de río	0,2901			
	Arcilla	0,2557			
	Grava	0,2577			
3	Carbón	0,2611	52,3	7,80	20,1
	Arena de río	0,2507			
	Arcilla	0,2585			
	Grava	0,2606			

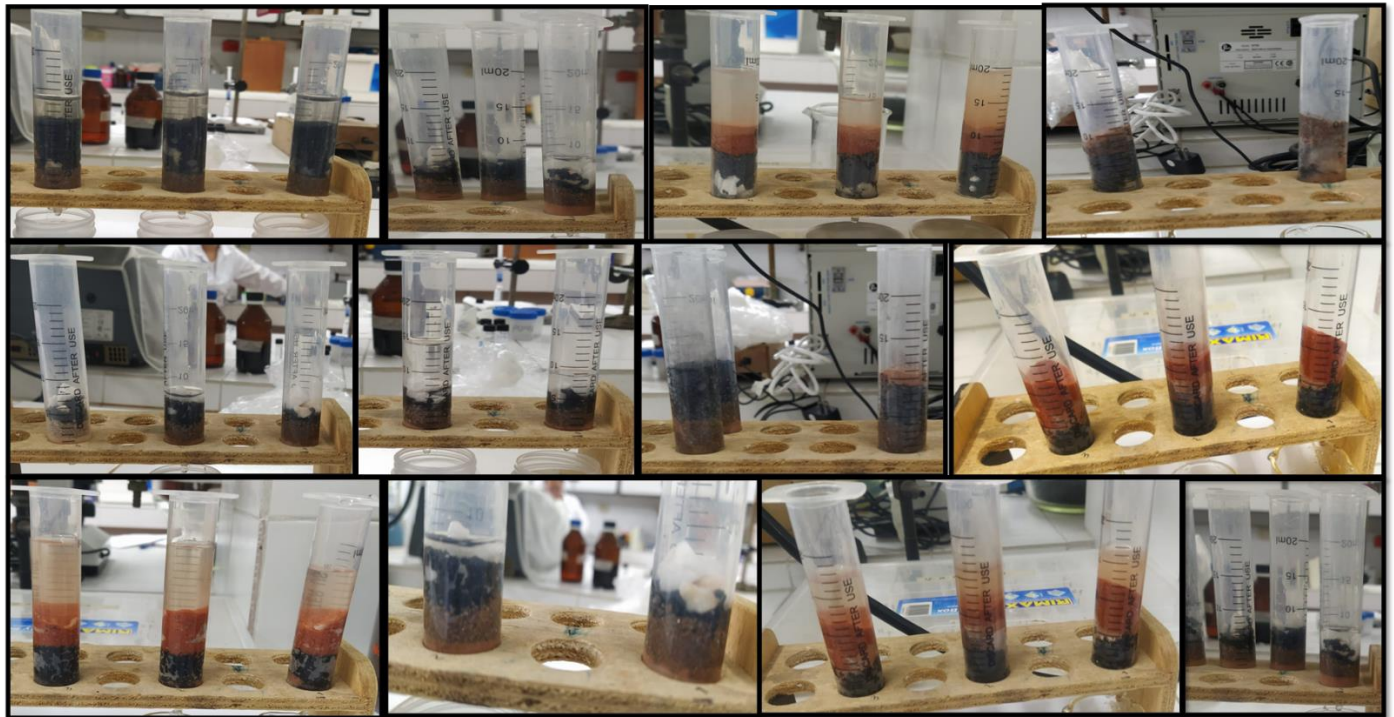
4.3.2. Determinación del orden

Para determinar el orden de la columna se evaluaron las 24 configuraciones dando una codificación a cada uno de los materiales como se muestra en la Tabla 18. (Anexo F). De manera

que se registró el tiempo necesario para cada configuración en atravesar la columna como se muestra en la Figura 24. y se registró en la Tabla 19. (Anexo F).

Figura 24

Configuración de las capas

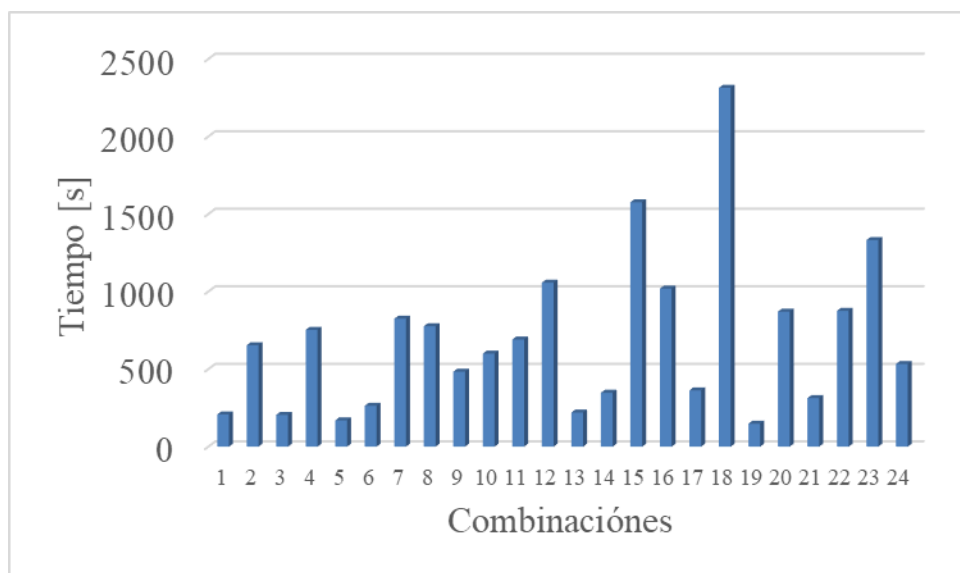


La coloración de cada uno de los ensayos se vio afectada por la forma en que se colocó el papel filtro, para evitar esto fue necesario humedecer con agua destilada y presionar evitando dejar espacios descubiertos, además se evidenció que dependiendo de la velocidad con que se agregue el agua se mostrara coloración o no, a mayor velocidad, mayor posibilidad de coloración. La velocidad también influyó en el tiempo que tarda en atravesar la columna, debido a que se genera un desnivel en la primera capa que tiene contacto con el agua provocando una filtración más rápida.

De las 24 configuraciones evaluadas, se realizó una selección primaria según el tiempo, tomando la 1, 3, 5 y 19 debido a que presentaron los menores tiempos como se muestra en la Figura 25., posteriormente se evaluó con cuál de estas configuraciones se muestra la mejor retención de aniones y cationes.

Figura 25

Combinaciones Vs Tiempo



4.4. FASE IV. Diseño del filtro

Evaluando las 4 configuraciones mencionadas anteriormente se obtuvo una retención de aniones y cationes en la muestra de agua de mar proveniente de la ciudad de Cartagena, playa el laguito. Observando que las mejores configuraciones son la 1 y 10 (debido al control de pH en la solución) ver Tabla 7 y 8 respectivamente, con un espesor de capa de 16 g de arena, 16 g de grava, 2 g de carbón activado y 8 g de arcilla aproximadamente, para un volumen de muestra de 40 mL recolectando un total de muestra de 30,1 mL como se muestra en la Figura 26a. y b.

Figura 26

a) configuración 10. b) configuración 1

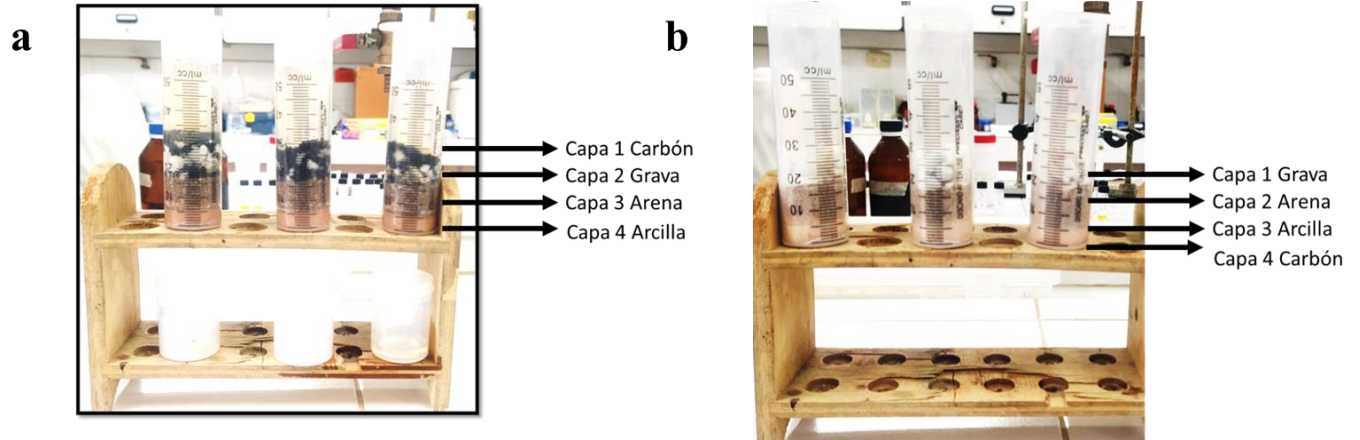


Tabla 7

Condiciones de la configuración 10

N	Material	Peso (g)	Conductividad (mV)	pH	T(°C)
	Agua de Mar	-	300,4	7,99	19,9
1	Arcilla	8,0192	15,2	6,64	21,6
	Arena de río	16,0048			
	Grava	16,0840			
	Carbón	2,0073			
2	Arcilla	8,0134	9,5	6,75	20,4
	Arena de río	16,0301			
	Grava	16,0624			
	Carbón	2,0041			
3	Arcilla	8,0013	6,1	6,81	20,8
	Arena de río	16,0224			
	Grava	16,0344			
	Carbón	2,0018			

Tabla 8*Condiciones de la configuración 1*

N	Material	Peso (g)	Conductividad (mV)	pH	T(°C)
	Agua de Mar	-	315,6	8,08	19,4
1	Arcilla	8,0017	36,1	7,33	19,3
	Arena de río	16,0127			
	Grava	15,9055			
	Carbón	2,0079			
2	Arcilla	8,0100	41,3	7,04	19,4
	Arena de río	16,0078			
	Grava	15,9127			
	Carbón	2,0088			
3	Arcilla	8,0173	54,5	7,09	19,7
	Arena de río	16,0036			
	Grava	16,1917			
	Carbón	2,0130			

Finalmente se evaluó el porcentaje de remoción salina de las dos configuraciones, teniendo en cuenta la calibración del conductímetro y mediante evaporación para cada una de las réplicas obteniendo los datos reportados en la Figura 27a-b. con un porcentaje promedio de remoción mediante el método de calibración para la configuración 10 de 80% y para la configuración 1 de 43%, igualmente se evaluó el porcentaje de retención de aniones y cationes tomando 1 mL de cada uno de los flujos y sometiénolos a una temperatura de 60°C durante 2 horas como se muestra en la Figura 28. obtenido un promedio de remoción para la configuración 10 de 53,78% y para la configuración 1 de 11,22%, además se mostró una variación en el pH entre las dos configuraciones lo cual se debió a la ubicación de la capa de arcilla y carbón.

Los resultados obtenidos son favorables mostrando una metodología novedosa y económica para la retención de aniones y cationes. Para mejorar el porcentaje de retención es recomendable realizar el filtrado en serie lo cual mostrara una mejor remoción.

Figura 27

a) Porcentaje de remoción mediante los dos métodos por triplicado b) Promedio de remoción mediante los dos métodos

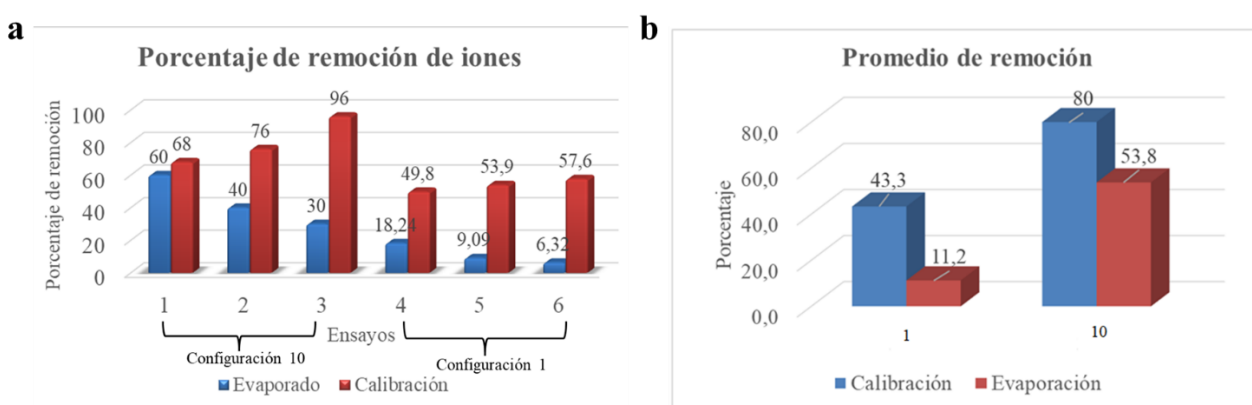


Figura 28

Secado de muestras

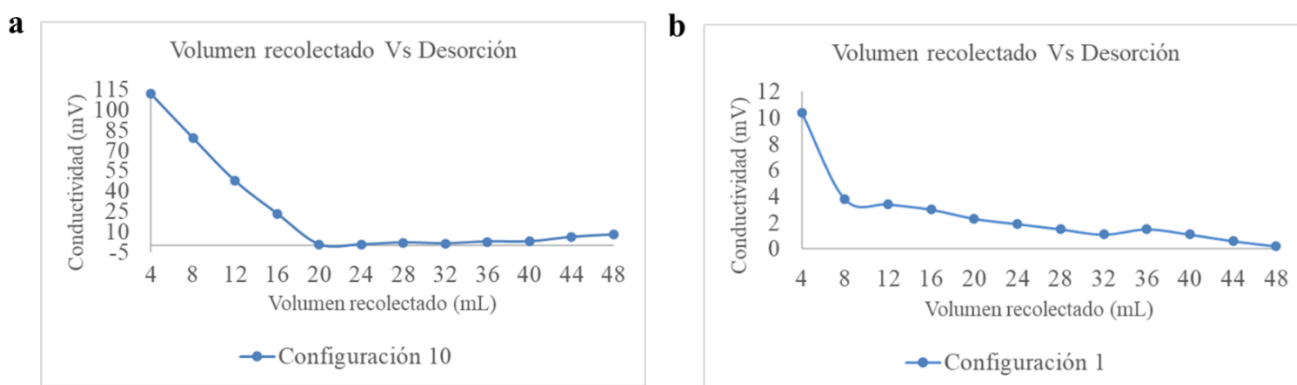


Basado en los resultados anteriores se realizó un estudio para determinar el rango de volumen en donde el material extrae la mayor cantidad de iones, para el caso de la configuración 1 se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 29a (ver datos en la Tabla 20. Anexo G)

Reportando que en un volumen entre 20 y 40 mL el material tiene la capacidad de absorber la mayor cantidad de iones, y posteriormente entran en un estado de equilibrio es decir el material se satura lo cual genera una menor retención. Por otro lado, la configuración 1 mostrada en la Figura 29b. (ver datos en la tabla 21. Anexo G) presenta una mejor retención ya que desde la primera muestra recolectada se logra una reducción en la conductividad y su saturación ocurre de manera lenta, además se muestra una mejor neutralización del pH con respecto a la configuración 10.

Figura 29

a) *Volumen recolectado Vs Desorción para la configuración 10* **b)** *Volumen recolectado Vs Desorción para la configuración*



4.4 FASE V. Estudio de las propiedades fisicoquímicas.

4.4.1. Espectroscopia ultra violeta visible (UV-VIS)

4.4.1.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La DQO es una medición indirecta de la cantidad de materia orgánica presente en una muestra, la cual fue analizada por medio de UV-Vis, donde se obtuvo un valor de 0,025mg/L

para la muestra patrón y valores alrededor de 0,4 mg/L para las muestras pasadas por la columna, que comparado con un estudio realizado por el centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas realizado en la bahía de Cartagena donde se reportaron valores máximos de 7,5 mg/L en la superficie y menores a 5 mg/L en el resto del agua, debido a la alta presencia de materia orgánica. La muestra recolectada para este estudio se hizo en el mes de septiembre, época seca lo cual muestra que las condiciones del agua son buenas (Saavedra et al., 2022; Quintana, 2013), sin embargo luego de realizar el proceso de desalinización los materiales usados aportan materia orgánica por lo que se hace necesario implementar un tratamiento que permita su eliminación.

4.4.1.2. Nitritos.

los nitratos y nitritos se encuentran relacionados, aunque los nitratos son añadidos por medio de fertilizantes que ocasionan su aumento de nivel, mientras, los nitritos se utilizan como un indicador de contaminación fecal en el agua, este fue medido mediante un espectrofotómetro con una longitud de onda especificada en la metodología obteniendo valores alrededor de 0,075 mg/L, que en relación a los valores máximos permisibles en la resolución 2115 de 2007 en la cual se establece que el valor máximo aceptable para este parámetro es de 0,1 mg/L, se puede decir que este cumple con lo exigido en la norma (Ambiente & Territorial, 2007).

4.4.1.3. Color.

Es uno de los parámetros organolépticos que indican la calidad del agua, está relacionado a la cantidad de partículas en suspensión y a las sustancias disueltas en una muestra de agua. Este parámetro fue medido con las especificaciones dadas en la metodología obteniendo 0 UPC para

la muestra patrón y las muestras pasadas por la columna de desalinización variaron debido a la acomodación del papel filtro y a la velocidad con que se ponga la muestra en la columna obteniendo valores entre 5 y 15 UPC, lo cual cumple con la resolución 2115 de 2007 para agua potable debido a que el valor máximo permisible es 15 UPC (Ambiente & Territorial, 2007).

4.4.2. Análisis de fluorescencia de rayos X

Finalmente, se realizó un análisis FRX para determinar la presencia de aniones y cationes presentes en la muestra de agua antes y después de la filtración en las dos columnas que proporcionaron la mejor desalinización, obteniendo los porcentajes de retención que se muestran en la Tabla 9. En donde para el caso específico del Magnesio Mg la mejor retención se obtuvo en la columna 10, por otro lado, los demás iones se encuentran en un porcentaje de adsorción similar para las dos columnas.

Tabla 9

Análisis fluorescencia de rayos X

Elemento	Muestra FRX agua de mar	Muestra FRX agua Columna 1	Muestra FRX agua Columna 10	% Retención Columna 1	% Retención Columna 10
Cl	49	4	3	91,8	93,9
Na	23,4	2,1	1,9	91,0	91,9
Mg	3,7	0,5	0,3	86,5	91,9
S	3,2	0,04	0,1	98,8	96,9
Ca	1,2	0,01	0,02	99,2	98,3
K	1,1	0,01	0,01	99,1	99,1
N	0,05	ND	ND	ND	ND
P	0,04	ND	ND	ND	ND
Otros metales	0,9	0,01	0,01	98,9	98,9

5. CONCLUSIONES

Los materiales empleados para este estudio se constituyeron principalmente: arena de río compuesta por cuarzo, grava constituida principalmente por carbonato de calcio, arcilla tipo montmorillonita y el carbón por la combinación de carbonos aromáticos que forman planos en dos dimensiones, los cuales son materiales microporos con isothermas de N₂ tipo IIb para la grava y el carbón, con histéresis tipo 3 y para la arena y la arcilla con una histéresis tipo 4 e isoterma tipo IVa, logrando la elaboración de un filtro prometedor para la desalinización de agua de mar.

Las configuraciones 1=Carbón-Arcilla-Arena-Grava y 10=Arcilla-Arena-Grava-Carbón puestas de abajo hacia arriba en la columna presenta la mejor capacidad de desalinización con un 11,22 y 53,78 % respectivamente determinada por secado y por conductividad con un 43,3 y 80% respectivamente además el análisis de Fluorescencia de rayos X mostro una capacidad de extracción de iones entre 86,5 y 99,1%.

El orden en el cual se ubiquen las capas (arena, grava, arcilla y carbón) inciden en el tiempo que gasta la muestra de agua en atravesar la columna y en la capacidad de remoción salina.

6. RECOMENDACIONES

Realizar un escalamiento del estudio verificando la viabilidad de los resultados.

Generar un registro que muestre la interacción química de cada uno de los materiales con la muestra de agua de mar.

Para mejorar la capacidad de retención se puede implementar un filtrado en serie lo cual puede proporcionar una mejor retención de aniones y cationes.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ASTM]. (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass 1. March*, 1-7. <https://doi.org/10.1520/D2216-19>.
- Ambiente, M. D. E., & Territorial, V. Y. D. (2007). *LOS MINISTROS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE , VIVIENDA RESUELVE : CAPÍTULO I*.
- Asociación española de desalación y reutilización [AEDyR]. (2019). *Principales técnicas de desalación*. AEDyR. <https://aedyr.com/principales-tecnicas-desalacion-cuales/#:~:text=La> técnica más utilizada actualmente, último la Electrodiálisis (2%25).
- Bala, K. C., & Khan, R. H. (2014). *Characterization of Beach / River Sand for Foundry Application Characterization of Beach / River Sand for Foundry Application*. July 2013.
- Beach, W. P., & Go, H. (2007). *Possible Influence of Beach Sand Characteristics on Green Turtle Nesting Possible Influence of Beach Sand Characteristics on Green Turtle Nesting Activity on Samandag ~ Beach , Turkey*. November. <https://doi.org/10.2112/06-0630.1>
- Blacio, D., & Palacios, J. (2011). Filtros Biologicos para la Potabilizacion del Agua, Posibilidades de Uso de Fla (Filtros Lentos de Arena) con Agua Superficial de Nuestra Region. *Filtros lentos en arena*, 9.
- Chandrasekaran, N. C., & Barnard, R. T. (2019). *Correct estimates of hydrated ionic radius should be used when discussing the permeation of topically applied magnesium ions*. 32(1), 37-38. <https://doi.org/10.1684/mrh.2019.0451>
- Chang, M., Ma, X., Fan, Y., Dong, X., Chen, R., & Zhu, B. (2023). Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects Adsorption of different valence metal cations on kaolinite : Results from experiments and molecular dynamics simulations. *Colloids and*

- Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 656(PA), 130330.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130330>
- Delgado. (2018). *Lo que falta en suministro de agua y alcantarillado en Colombia*. DANE.
<https://www.elespectador.com/economia/lo-que-falta-en-suministro-de-agua-y-alcantarillado-en-colombia-article-802501/>
- Delgado Diana. (2007). “ Análisis Comparativo De Los Procesos De Desalinización Del Agua : Destilación Súbita Por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo La Metodología De Evaluación De Ciclo De Vida ” TESIS DE GRADO Previo a la obtención del Título de : INGEN. *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción*.
- Disco Learning Media, A. R. R. (2016). *Salinidad*. resourcefulness-recursohabilidad.
<https://stem.guide/topic/salinidad/?lang=es>
- District, K. (2020). <https://doi.org/10.24297/jac.v17i.8537>. 17, 1-30.
- Dogu, T., & Altin, O. (1999). *Effect of pH in an Aqueous Medium on the Surface Area, Pore Size Distribution, Density, and Porosity of Montmorillonite*. 27, 19-27.
- Elgamouz, A., & Tijani, N. (2018). Data in Brief Dataset in the production of composite clay-zeolite membranes made from naturally occurring clay minerals. *Data in Brief*, 19, 2267-2278. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.06.117>
- Esquivel. (2011). *APLICACIONES DE MATERIALES PERIÓDICOS*.
- Formation, G., Socorro, N. S., & State, S. E. (2018). *Removal of Cr (VI) from Aqueous Solutions Using Clay from Calumbi Removal of Cr (VI) from Aqueous Solutions Using Clay from Calumbi Geological Formation , N . Sra . Socorro , SE State , Brazil. January*.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.912.1>

Furmann, A., Mastalerz, M., Brassell, S. C., Schimmelmann, A., & Picardal, F. (2013).

International Journal of Coal Geology Extractability of biomarkers from high- and low-vitrinite coals and its effect on the porosity of coal. *International Journal of Coal Geology*, 107, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.09.010>

GARAVITO ISAZA EDUARDO. (2022). *HUMEDAD EN AGREGADOS Y CONTROL DE INVENTARIOS*. EDUARDO

García. (2016). PROCESO DE DESALACION DE AGUA DE MAR MEDIANTE UN SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA DE MUY ALTA CONVERSION EN TRES ETAPAS CON RECIRCULACION DE PERMEADO Y DOBLE SISTEMA DE RECUPERACION DE ENERGIA. *Proceso de desalación de agua de mar*, 2015(c).

García M., S. F. . . . (2001). *El agua*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18771>

Global Water Intelligence. (2010). *Global Water Intelligence, desalination Markets*. Global forecast and Analysis.

Hernandez A., Tejerina F., A. I. (1990). *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa - A. Hernández - Google Libros*. <https://books.google.com.gt/books?id=jZ0Z9-G8YdoC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Hernández M., Rojas F., L. V. (2010). *Redalyc.Estructura porosa y propiedades estructurales de mordenita y clinoptilolita*.

Ku, A. (2003). *A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite : particle size , moisture of coal , humidity of air*. 133, 255-261. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00553-9](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00553-9)

Lamei, H., Mostaghimi, P., Armstrong, R. T., Saadatfar, M., & Pinczewski, W. V. (2016).

International Journal of Coal Geology Porosity and permeability characterization of coal : a

- micro-computed tomography study. *International Journal of Coal Geology*, 154-155, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.10.001>
- Larbi, F., Hamou, A., Bendraoua, A., Ramdani, N., Bella, A. Ben, & El, M. (2015). *Characterization of Two Natural Clays and Their Application as Adsorbents for Treatment Process of Dye Effluents*. 3, 10-16. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.s.2015030501.12>
- McBride, J. E. A. ; E. F. (1992). *Porosidad y empaquetamiento de arenas de río, dunas y playas del Holoceno*. <https://doi.org/10.1306/BDFF87F4-1718-11D7-8645000102C1865D>
- Mercado C., L. E. (2015). CONCENTRADOR CILÍNDRICO PARABÓLICO DE AGUA DE MAR EVALUATION OF A SOLAR DESALINATION SYSTEM , TYPE CYLINDRICAL PARABOLIC. *Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ingeniería Química*.
- Mojoudi, N., Mirgha, N., Soleimani, M., Shariatmadari, H., Belver, C., & Bedia, J. (2019). *Phenol adsorption on high microporous activated carbons prepared from oily sludge : equilibrium , kinetic and thermodynamic studies*. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4>
- Mouhri, G. El, Merzouki, M., Belhassan, H., Miyah, Y., Amakdoun, H., Elmountassir, R., & Lahrichi, A. (2020). *Continuous Adsorption Modeling and Fixed Bed Column Studies : Adsorption of Tannery Wastewater Pollutants Using Beach Sand*. 2020.
- Mourato, D. (1998). *MICROFILTRACIÓN Y NANOFILTRACIÓN EN EL ÁREA DE AGUA POTABLE*. D. Mourato, Ph.D. ZENON Environmental Inc. Burlington, Ontario, Canadá.
- Moyo, M., Nyamhere, G., Dube, E., & Guyo, U. (2014). *Desalination and Water Treatment Kinetic and equilibrium modelling of lead sorption from aqueous solution by activated carbon from goat dung*. October 2004. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.968217>

- Organizacion de las naciones unidas [ONU]. (2022). *Población*. Naciones unidas.
<https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Está previsto que la población,cuanto a estos últimos datos.>
- Padilla Muñoz Ruth. (2022). *Una persona necesita 100 litros de agua al día: OMS*. Organización de la salud [OMS]- Gaceta UdeG. <http://www.gaceta.udg.mx/una-persona-necesita-100-litros-de-agua-al-dia-oms/>
- Pesce, C., Moretto, L. M., Orsega, E. F., & Pesce, G. L. (2019). *Sustainable Method for Stone Consolidation Based Calcium-Based Nanomaterials*. September.
<https://doi.org/10.3390/ma12183025>
- Poliszuk, A., & Ybarra, G. (2019). *Analysis of Cultural Heritage Materials by Infrared Spectroscopy*. January.
- Quintana D., S. A. (2013). *Calidad de aguas marino-costeras del caribe colombiano en epoca seca*. 29-48.
- Ríos Bernardo. (2022). *Los cinco océanos del planeta*. Geografía Infinita.
<https://www.geografiainfinita.com/2020/06/los-cinco-oceanos-del-planeta/>
- Rocha Castro, E. (2010). Filtros en medios granulares. *Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas*, 4.1-4.8.
- Rodrigues, C. F., & Sousa, M. J. L. De. (2002). *The measurement of coal porosity with different gases*. 48, 245-251.
- Rodriguez Javier. (2006). *La porosidad de las rocas carbonatadas 1*. 1-18.
- Saavedra, Q., María, D., & Ríos, S. (2022). *del Caribe colombiano en época seca* . Download date Link to Item.
- Sabiha, A. B., Kheloufi, A., & Boumediene, T. H. (2016). *Valorization of Algerian Sand for*

Photovoltaic Application Valorization of Algerian Sand for Photovoltaic Application. July.

<https://doi.org/10.12693/APhysPolA.130.133>

Sáenz Isabel del Carmen. (2014). *Estimación de la solubilidad intrínseca y la constante de producto de solubilidad de compuestos inorgánicos de calcio poco solubles en agua con base en parámetros termodinámicos determinados por vía teórica.*

Sheppard, A., Latham, S., Middleton, J., Kingston, A., Myers, G., Varslot, T., Fogden, A., Sawkins, T., Cruikshank, R., Saadatfar, M., Francois, N., Arns, C., & Senden, T. (2014). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B Techniques in helical scanning , dynamic imaging and image segmentation for improved quantitative analysis with X-ray micro-CT. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, 324, 49-56.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.08.072>

Subramani, S., Fernández, F., Santos, A. J. Dos, Río, M., & López, O. (2019). *Efectos de la humedad en piedras calizas para Effects of moisture on building limestones . 5*, 66-71.

<https://doi.org/10.20868/ade.2019.3915>

Syazwan, M., Musa, M., Rosli, W., Sulaiman, W., Abdul, Z., Zulkifli, M., Majid, A., Kamal, A., & Kourosh, I. (2019). Application of henna extract in minimizing surfactant adsorption on quartz sand in saline condition : A sacrificial agent approach. *SN Applied Sciences*, 1(8), 1-

11. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0870-0>

T. V. Nagalakshmi, K. A. E. (2019). *1 WASTE AND DEVELOPMENT OF DIFFERENT SURFACE FUNCTIONAL PREPARATION OF MESOPOROUS ACTIVATED CARBON FROM JACKFRUIT PPI-1 WASTE AND DEVELOPMENT OF DIFFERENT SURFACE FUNCTIONAL GROUPS. July.* <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ILCPA.54.189>

Terrasa Daniel. (2019). *Mar Caribe. Geografía la guía.*

<https://geografia.laguia2000.com/hidrografia/mar-caribe>

Tsouris, C., & Ridge, O. (2016). *Monte Carlo simulations of electrical double-layer formation in nanopores Monte Carlo simulations of electrical double-layer formation in nanopores.*

March. <https://doi.org/10.1063/1.1511726>

Villajos José A. (2017). *ADSORCIÓN DE HIDRÓGENO EN MATERIALES MOF:*

ESTRATEGIAS PARA LA INCLUSIÓN DE CENTROS DE ADSORCIÓN PREFERENTE.

Zarza Moya Eduardo. (2000). *Desalinización de agua del mar mediante energías renovables.* 199-225.

Zhang, Z., Zhou, Q., Yuan, Z., Zhao, L., & Dong, J. (2021). Applied Surface Science Adsorption of Mg^{2+} and K^{+} on the kaolinite (001) surface in aqueous system : A combined DFT and AIMD study with an experimental verification. *Applied Surface Science*, 538(September 2020), 148158. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148158>

ANEXO A

$$\%H = \frac{\text{inicial} - \text{final}}{\text{inicial}} * 100$$

Ecuación 1. *Determinación el porcentaje de humedad*

$$x = \frac{\text{dato sospechoso} - \text{dato mas cercano al sospechoso}}{\text{dato maximo} - \text{dato minimo}}$$

Ecuación 2. *Prueba T-student*

ANEXO B

Tabla 10

Datos obtenidos para el porcentaje de humedad de la Grava

N°	Peso Vaso (g)	Grava Blanca (g)	Vaso+ Grava blanca (g)	Grava blanca (g)	% HUMEDAD
HG01	47,8389	10,2569	58,0919	10,2530	0,038
HG02	47,9543	10,2305	58,1780	10,2237	0,066
HG03	43,4521	10,1397	53,5892	10,1371	0,026
HG04	53,7451	10,1768	63,9192	10,1741	0,027
HG05	44,1116	10,1191	54,2256	10,1140	0,050
HG06	41,4410	10,1135	51,5510	10,1100	0,035
HG07	46,1077	10,0196	56,1250	10,0173	0,023
HG08	41,4781	10,0785	51,5456	10,0675	0,109
HG09	45,9182	10,1195	56,0350	10,1168	0,027
HG10	47,8404	59,8611	107,6794	59,8390	0,037
HG11	48,4876	59,9876	108,4400	59,9524	0,059
HG12	43,4532	59,9939	103,4033	59,9501	0,073

Tabla 11

Datos estadísticos de la grava

Columna1

Media	0,04742126
Error típico	0,00741873
Mediana	0,03747099
Moda	#N/D
Desviación estándar	0,02569923
Varianza de la muestra	0,00066045
Curtosis	1,78103336
Coefficiente de asimetría	1,36992382
Rango	0,08618822
Mínimo	0,02295501
Máximo	0,10914323
Suma	0,56905517
Cuenta	12

ANEXO C

Tabla 12

Datos obtenidos para el porcentaje de humedad de la arena

Nº	Peso Vaso (g)	Arena Río (g)	Vaso + Arena Río (g)	Arena Río Secada (g)	% HUMEDAD
HA01	44,1112	10,0862	53,8778	9,7666	3,169
HA02	43,4522	10,0207	53,1555	9,7033	3,167
HA03	46,1075	10,0559	55,8595	9,752	3,022
HA04	32,2215	10,0674	41,9956	9,7741	2,913
HA05	31,7724	10,094	41,5193	9,7469	3,439
HA06	27,2789	10,0511	36,9755	9,6966	3,527
HA07	47,8389	10,0075	57,5425	9,7036	3,037
HA08	47,9517	10,0166	57,6221	9,6704	3,456
HA09	45,0087	10,0341	54,7465	9,7378	2,953
HA10	31,8294	10,0846	41,6283	9,7989	2,833
HA11	31,0919	10,0141	40,8435	9,7516	2,621
HA12	31,3762	10,6639	41,1238	9,7476	8,593

Tabla 13*Datos estadísticos de la arena*

<i>Columna1</i>	
Media	3,56083721
Error típico	0,464005237
Mediana	3,102082925
Moda	#N/D
Desviación estándar	1,607361293
Varianza de la muestra	2,583610325
Curtosis	11,13593733
Coeficiente de asimetría	3,290421649
Rango	5,971237229
Mínimo	2,621303961
Máximo	8,59254119
Suma	42,73004653
Cuenta	12
Nivel de confianza(95,0%)	1,021268642

ANEXO D**Tabla 14***Datos obtenidos para el porcentaje de humedad de la arcilla*

N°	Peso Vaso (g)	Arcilla (g)	Vaso + Arcilla (g)	Arcilla Secada (g)	% HUMEDAD
HA01	41,4410	10,0212	51,3234	9,8824	1,385
HA02	47,8067	10,055	57,7255	9,9188	1,355
HA03	45,0081	10,0589	54,9308	9,9227	1,354
HA04	32,0817	10,0063	41,9500	9,8683	1,379
HA05	33,6749	10,0071	40,9712	7,2963	27,089
HA06	31,3287	10,0056	41,1955	9,8668	1,387
HA07	44,1120	10,0872	54,0620	9,9500	1,360
HA08	47,8069	10,0236	57,6949	9,888	1,353

HA09	53,7451	10,0543	63,6622	9,9171	1,365
HA10	33,2725	10,0063	43,1408	9,8683	1,379
HA11	31,4997	10,0175	41,3326	9,8329	1,843
HA12	31,7720	10,0354	41,6675	9,8955	1,394

Tabla 15

Datos estadísticos de la arcilla

<i>Columna1</i>	
Media	3,553522354
Error típico	2,139929619
Mediana	1,379131147
Moda	#N/D
Desviación estándar	7,412933649
Varianza de la muestra	54,95158528
Curtosis	11,98941596
Coefficiente de asimetría	3,462013656
Rango	25,7359596
Mínimo	1,352807375
Máximo	27,08876698
Suma	42,64226824
Cuenta	12
Nivel de confianza(95,0%)	4,709953335

ANEXO E

Tabla 16

Datos obtenidos para el porcentaje de humedad del carbón

N°	Peso Vaso (g)	Carbón (g)	Vaso+ Carbón (g)	Carbón Seco (g)	% HUMEDAD
HC01	27,28	10,0519	37,1617	9,8817	1,693
HC02	31,3408	10,0071	41,2305	9,8897	1,173
HC03	31,776	10,0275	41,6513	9,8753	1,518
HC04	31,4542	10,0152	41,1785	9,7243	2,905

HC05	34,9869	10,0096	44,5542	9,5673	4,419
HC06	31,3227	10,0117	41,2033	9,8806	1,309
HC07	31,092	10,0339	40,9995	9,9075	1,260
HC08	33,2716	10,0213	43,0743	9,8027	2,181
HC09	32,0818	10,0069	41,9306	9,8488	1,580
HC10	33,393	10,0150	43,3406	9,9476	0,673
HC11	31,8297	10,0334	41,7753	9,9456	0,875
HC12	32,2211	10,0133	42,1480	9,9269	0,863

Tabla 17

Datos estadísticos del carbón

<i>Columna1</i>	
Media	1,70407746
Error típico	0,30378665
Mediana	1,41364695
Moda	#N/D
Desviación estándar	1,05234783
Varianza de la muestra	1,10743596
Curtosis	3,5069148
Coeficiente de asimetría	1,80440691
Rango	3,74576748
Mínimo	0,67299051
Máximo	4,41875799
Suma	20,4489295
Cuenta	12
Nivel de confianza(95,0%)	0,66862991

ANEXO F

Tabla 18

Codificación de los materiales

Material	Código
Carbón	1
Arcilla	2
Arena	3
Grava	4

Tabla 19

Combinación de las capas

Número	Combinación	Carbón	Arcilla	Arena	Grava	Tiempo [s]	Promedio
1	1234	4,0100	1,0038	4,0150	4,0674	212	207,3
	1234	4,0122	1,0188	4,0037	4,0163	158	
	1234	4,0744	1,0003	4,0453	4,0421	252	
2	1324	4,0112	1,0117	4,0110	4,0840	461	654,0
	1324	4,0555	1,0324	4,0250	4,0425	868	
	1324	4,0109	1,0159	4,0033	4,1214	633	
3	1243	4,0309	1,0594	4,0148	3,9920	173	205,0
	1243	4,0337	1,0141	4,0479	3,9924	320	
	1243	4,0543	1,0043	4,0304	4,0166	237	
4	1342	4,0321	1,0156	4,0600	4,2071	703	753,3
	1342	4,0536	1,0338	4,0430	4,2077	703	
	1342	4,0545	1,0390	4,0569	4,1204	854	
5	1423	4,0323	1,0072	4,0655	3,9465	181	170,0
	1423	4,0387	1,0233	4,0600	4,0440	159	
	1423	4,0238	1,0457	4,0296	4,2664	370	
6	1432	4,0527	1,0101	4,0344	4,1538	281	263,7
	1432	4,0259	1,0064	4,0061	4,1391	260	
	1432	4,0634	1,0332	4,0429	4,0188	250	
7	2134	4,0053	1,0246	4,0123	4,3440	582	825,0
	2134	4,0485	1,0083	4,0677	4,2083	1438	
	2134	4,0083	1,0298	4,0584	4,1255	1068	
8	2143	4,0453	1,0011	4,0510	3,8898	151	776,5
	2143	4,0141	1,0320	4,0202	3,8791	1011	

	2143	4,024	1,0176	4,0282	3,7298	542	
9	2314	4,0346	1,0093	4,0877	4,0007	1962	483,5
	2314	4,0450	1,0177	4,0558	3,9681	602	
	2314	4,0491	1,0120	4,0803	3,9493	365	
	2314	4,0491	1,0120	4,0803	3,9493	365	
10	2341	4,0255	1,0016	4,0835	4,2688	505	600,0
	2341	4,0587	1,0670	4,0780	4,2832	695	
	2341	4,0296	1,0247	4,0636	4,1474	1832	
11	2413	4,0143	1,0417	4,0930	3,9777	101	691,0
	2413	4,0588	1,0116	4,0672	4,0927	857	
	2413	4,0291	1,0028	4,0589	3,7233	525	
12	2431	4,0424	1,0323	4,0815	3,811	1058	1058,0
	2431	4,0224	1,0104	4,0276	4,0134	1058	
	2431	4,0336	1,0255	4,0356	4,0247	1058	
13	3124	4,0944	1,0070	4,0340	4,2804	311	220
	3124	4,0602	1,0088	4,0370	4,2926	216	
	3124	4,089	1,0158	4,0881	4,0652	133	
14	3142	4,0279	1,0164	4,0992	3,9668	322	347,7
	3142	4,0337	1,0246	4,0043	4,1650	449	
	3142	4,0592	1,0139	4,0679	4,1479	272	
15	3214	4,0944	1,0523	4,0077	4,0387	1440	1576,0
	3214	4,0514	1,0673	4,0874	3,9033	642	
	3214	4,0649	1,0184	4,0646	3,9631	2646	
16	3241	4,0728	1,0353	4,0219	4,0644	1842	1019,0
	3241	4,0511	1,0348	4,0996	4,0834	1146	
	3241	4,0914	1,0325	4,0083	4,2696	892	
17	3412	4,0207	1,0313	4,0323	4,0921	294	363,0
	3412	4,0566	1,0252	4,0182	3,8977	162	
	3412	4,0871	1,0825	4,0633	3,9752	432	
18	3421	4,0397	1,0699	4,0886	4,1398	865	2314,0
	3421	4,0701	1,0267	4,0639	4,1251	2228	
	3421	4,0397	1,0168	4,0245	4,1889	2400	
19	4123	4,0979	1,0843	4,0440	3,9435	93	148,0
	4123	4,0706	1,0644	4,0377	3,9824	199	
	4123	5,0449	1,0585	4,0124	4,0408	152	
20	4132	4,0913	1,0049	4,0410	4,0507	1061	871,0
	4132	4,0349	1,0036	4,0964	4,1756	221	
	4132	4,0884	1,0388	4,0960	4,0969	681	
21	4213	4,0473	1,0142	4,0097	4,0983	347	313,0
	4213	4,0842	1,0408	4,0339	4,1568	227	
	4213	4,0865	1,0244	4,0291	4,2391	365	

22	4231	4,0063	1,0376	4,0077	3,9730	940	876,0
	4231	4,0160	1,0596	4,0153	3,8936	812	
	4231	4,0372	1,0125	4,0648	3,9478	421	
23	4321	4,0082	1,0258	4,0171	4,0694	1272	1332,3
	4321	4,0320	1,0152	4,0509	4,0234	1272	
	4321	4,0566	1,0593	4,0910	4,0220	1453	
24	4312	4,0477	1,0527	4,0643	3,9186	255	533,0
	4312	4,0391	1,0023	4,0236	4,0842	533	
	4312	4,0388	1,0002	4,0535	4,0343	533	

ANEXO G

Tabla 20

Datos de conductividad configuración 10

Muestra	Volumen(mL)	Conductividad (mV)	pH
A1	4	111,4	5,50
A2	8	78,9	4,91
A3	12	47,4	6,08
A4	16	23,4	6,50
A5	20	0,8	6,92
A6	24	0,8	6,90
A7	28	2,2	6,95
A8	32	1,5	6,89
A9	36	2,9	6,39
A10	40	3,0	6,81
A11	44	6,3	6,87
A12	48	8,0	7,07

Tabla 21

Datos de conductividad configuración 1

Muestra	Volumen(mL)	Conductividad (mV)	pH
---------	-------------	-----------------------	----

B1	4	10,4	7,09
B2	8	3,8	6,98
B3	12	3,4	6,86
B4	16	3,0	6,90
B5	20	2,3	6,90
B6	24	1,9	6,97
B7	28	1,5	6,96
B8	32	1,1	6,95
B9	36	1,5	6,93
B10	40	1,1	6,90
B11	44	0,6	6,91
B12	48	0,2	6,91
