



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES PARA EL DISEÑO DE
UNA PLANTA PILOTO FILTRO DESINFECTANTE ALIMENTADO CON
EFLUENTES DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

JOSÉ LUIS CASTRO TAPIA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Manuel Luna Pabello

Ciudad Universitaria, Cd. Mx 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor:** LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL
VOCAL: **Profesor:** GUTIERREZ LARA MARIA RAFAELA
SECRETARIO: **Profesor:** GARCIA GONZALEZ SERGIO ADRIAN
1er. SUPLENTE: **Profesor:** LAZCANO ARRIOLA LUZ MARIA
2º SUPLENTE: **Profesor:** RODRIGUEZ ESTRADA MONICA LUCIA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA EXPERIMENTAL

DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

SUPERVISOR TÉCNICO:

M EN I. MÓNICA L. RODRÍGUEZ ESTRADA

SUSTENTANTE:

CASTRO TAPIA JOSÉ LUIS

RECONOCIMIENTOS ACADÉMICOS

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) en el proyecto No. PAPIIT IT101922 por el apoyo económico, en forma de beca, otorgado para la realización de esta tesis.

A la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) por el análisis para la determinación de la composición de los materiales pétreos.

Al personal que labora en el Humedal Artificial de Doble espiral por el apoyo al acceso y la toma de muestras.

ÍNDICE

ÍNDICE	4
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO	3
2.1. OBJETIVO GENERAL	3
2.2. OBJETIVOS PARTICULARES	3
2.3. ESTRATEGIA DE TRABAJO	4
3. MARCO TEÓRICO	5
3.1. METALES COMO MATERIAL DESINFECTANTE	5
3.1.1. PLATA	5
3.1.2. COBRE	6
3.1.3. ZINC	6
3.2. FILTRACIÓN	7
3.2.1. PROCESO DE FILTRACIÓN	9
3.2.2. OPERACIONES DE FILTRACIÓN SEMICONTINUAS	9
3.2.3. OPERACIONES DE FILTRACIÓN CONTINUAS	10
3.3. TIPOS DE FILTROS	10
3.3.1. FILTRO DE GRAVEDAD	10
3.3.2. FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	11
3.3.3. FILTRO DE ARENA	11
3.3.4. FILTRO DE ZEOLITA	12
3.4. AGREGADO MINERAL COMO AGENTE DESINFECTANTE	12
3.5. FILTRO DESINFECTANTE	13
3.5.1. AMN COMO MATERIAL DE EMPAQUE	14
3.5.2. CONFIGURACIÓN DE FILTRO DESINFECTANTE	14
3.5.3. PPFD ACOPLADAS A HUMEDALES ARTIFICIALES	15
4. METODOLOGÍA	15
4.1. ETAPA 1A	16
4.1.1. MATERIAL DE EMPAQUE	16
4.1.2. OBTENCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL MATERIAL FILTRANTE	16
4.1.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AGREGADOS MINERALES	17
4.1.4. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL AMN	18
4.2. ETAPA 1B	19
4.2.1. ARREGLO DE LOS HORIZONTES DE AMN	19
4.2.2. DISEÑO DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS	21

4.2.3.	CONFIGURACIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS.....	21
4.2.4.	CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS.....	22
4.2.5.	OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS	23
4.2.6.	RECOLECCIÓN DEL AGUA EXPERIMENTAL FILTRADA... 23	
4.3.	ETAPA 2A.....	24
4.3.1.	OBTENCIÓN DE LOTES DE AGUA.....	24
4.3.2.	CARACTERIZACIÓN DEL LOTE DE AGUA	24
4.3.3.	TÉCNICAS PARA CARACTERIZAR LOTE DE AGUA.....	25
4.4.	ETAPA 2B	26
4.4.1.	CONSERVACIÓN DEL AGUA.....	26
4.4.2.	ESTERILIZACIÓN	26
4.4.3.	AGUA EXPERIMENTAL	26
4.4.4.	CUANTIFICACIÓN DE Escherichia coli.....	27
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
5.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AMN	28
5.2.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AMNM Y AMNZ	29
5.2.1.	ESPECTROSCOPIA ATÓMICA	30
5.2.2.	MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.....	31
5.3.	CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL LOTE DE AGUA DEL EFLUENTE DEL SHADE	41
5.3.1.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	41
5.3.2.	FOSFATOS	42
5.3.3.	NITRATOS.....	42
5.3.4.	COLIFORMES TOTALES Y FECALES	43
5.3.5.	POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y TEMPERATURA	43
5.4.	PORCENTAJE DE ELIMINACIÓN DE ESCHERICHIA COLI EN COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS CON AMN.	44
5.4.1.	DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES ÚTILES PARA EL DISEÑO DE LA PPF.	46
6.	CONCLUSIONES.....	47
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
8.	ANEXO I TÉCNICAS PARA DETERMINACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DETERMINACIÓN DE MICROORGANISMOS.....	57
9.	ANEXO II CURVAS DE CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estrategia de trabajo	4
Figura 2. Arreglo de la columna empacada con AMN	20

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de calibración DQO.	64
Gráfica 2. Curva de calibración Fosfatos	65
Gráfica 3. Curva de calibración Nitratos.	66

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Densidad Real.	17
Ecuación 2. Densidad aparente	17
Ecuación 3. Espacio poroso	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas de los filtros de medio granular de uso común (Metcalf & Eddy, 2014)	7
Tabla 2. Características físicas de los filtros de medio granular de uso común (Metcalf & Eddy, 2014)	8
Tabla 3. Clasificación de filtros (Hernández Cruz & Tautiva Villalobos, 2020)	9
Tabla 4. Cantidad disponible de AMN	21
Tabla 5. Propiedades físicas del AMNM.	28
Tabla 6. Propiedades físicas del AMNZ.	29
Tabla 7. Resultados de análisis por EA para AMNM.....	30
Tabla 8. Resultados de análisis EA para AMNZ.....	31
Tabla 9. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNM ..	35
Tabla 10. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNM	35
Tabla 11. Porcentaje promedio en masa de elementos identificados por MEB para AMNM	36
Tabla 12. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNZ .	39
Tabla 13. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNZ .	40
Tabla 14. Porcentaje promedio en masa de elementos identificados por MEB para AMNZ.....	41
Tabla 15. Cuantificación de materia orgánica	42
Tabla 16. Cuantificación de fosfatos	42
Tabla 17. Cuantificación de nitratos	42
Tabla 18. Cuantificación de CT y CF.....	43
Tabla 19. Medición de pH y temperatura	43
Tabla 20. Eliminación de E. coli Columna 1	44
Tabla 21. Eliminación de E. coli Columna 2	44
Tabla 22. Eliminación de E. coli Columna 1	45
Tabla 23. Eliminación de E. coli Columna 2	45

Tabla 24. Curva de calibración DQO.....	59
Tabla 25. Curva de calibración Fosfatos	61
Tabla 26. Curva de calibración Nitratos	63
Tabla 27. Datos para construcción de curva de calibración	64
Tabla 28. Resultados DQO	64
Tabla 29. Datos para construcción de curva de calibración	65
Tabla 30. Resultados Fosfatos.....	65
Tabla 31. Datos para construcción de curva de calibración.	66
Tabla 32. Resultados Nitratos	66

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Espectros emitidos por MEB para AMNM	32
imagen 2. Espectro 2 emitido por MEB para AMNM	32
imagen 3. Espectro 3 emitido por MEB para AMNM	32
Imagen 4. Espectro 5 emitido por MEB para AMNM.....	33
Imagen 5. Espectro 4 emitido por MEB para AMNM.....	33
imagen 6. Espectro 6 emitido por MEB para AMNM	33
imagen 7. Espectro 7 emitido por MEB para AMNM	33
imagen 8. Espectro 8 emitido por MEB para AMNM.....	33
imagen 9. Espectro 9 emitido por MEB para AMNM	33
imagen 10. Espectro 10 emitido por MEB para AMNM	34
imagen 11. Espectro 11 emitido por MEB para AMNM	34
imagen 12. Espectro 13 emitido por MEB para AMNM	34
imagen 13. Espectro 12 emitido por MEB para AMNM	34
imagen 14. Espectro 14 emitido por MEB para AMNM	34
imagen 15. Espectro 15 emitido por MEB para AMNM	34
imagen 16. Espectros emitidos por MEB para AMNZ	37
imagen 17. Espectro 59 emitido por MEB para AMNZ.....	37
imagen 18. Espectro 60 emitido por MEB para AMNZ.....	37
imagen 19. Espectro 61 emitido por MEB para AMNZ.....	38
imagen 20. Espectro 62 emitido por MEB para AMNZ.....	38
imagen 21. Espectro 64 emitido por MEB para AMNZ.....	38
imagen 22. Espectro 63 emitido por MEB para AMNZ.....	38
imagen 23. Espectro 65 emitido por MEB para AMNZ.....	38
imagen 24. Espectro 66 emitido por MEB para AMNZ.....	38
imagen 25. Espectro 67 emitido por MEB para AMNZ.....	39
imagen 26. Espectro 68 emitido por MEB para AMNZ.....	39
imagen 27. Espectro 70 emitido por MEB para AMNZ.....	39
imagen 28. Espectro 69 emitido por MEB para AMNZ.....	39

GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

- Agregado Mineral Natural (AMN):

Es un material procedente de desechos de minas, por lo que no presenta un valor agregado para la industria.
- AMNM:

Es un material de desecho proveniente de una mina de plata ubicada en el estado de Michoacán.
- AMNZ:

Es un material de desecho proveniente de una mina de plata ubicada en el estado de Zacatecas.
- Agua experimental:

Agua proveniente de un efluente de tratamiento biológico inoculada con *Escherichia coli* a razón de 10^4 UFC/100mL.
- Aguas residuales:

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-001-SEMARNAT-2021).
- Aguas residuales tratadas:

Son aquellas que, mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos, entre otros se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público (NOM-003-SEMARNAT-1997).
- ATCC:

American Type Culture Collection es una organización sin fines de lucro que recolecta, almacena y distribuye microorganismos de referencia estándar, líneas celulares y otros materiales para investigación y desarrollo.
- Caracterización mineralógica:

Se basa en técnicas como la difracción de rayos X, que complementada con la petrografía (microscopía óptica y electrónica) permite además el estudio textural de los materiales (Rodriguez, 2019).
- Demanda Química de Oxígeno (DQO):

Se define como la concentración de oxígeno en [mgO₂/L] necesario para oxidar la materia en una prueba específica.

➤ **Desinfectante:**

Desinfección, al proceso físico y/o químico utilizado para la eliminación, inactivación o destrucción de microorganismos patógenos en el agua (NOM-127-SEMARNAT-2021).

➤ **Metales:**

Es la suma de las concentraciones de cada uno de los elementos en sus diferentes formas (en solución o disueltos y en suspensión). Para fines de esta norma se consideran los siguientes: Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc (NOM-001-SEMARNAT-2021).

➤ **Microbicida:**

Cualquier sustancia que destruye bacterias, virus u otros microbios que pueden causar riesgos a la salud.

➤ **Microorganismos patógenos:**

Son los microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna (NOM-003-SEMARNAT-1997).

➤ **Planta piloto filtro desinfectante (PPFD):**

Es un sistema que ejerce una doble función, como filtro al retener partículas suspendidas y como desinfectante debido a los metales contenidos en el medio de empaque.

➤ **Plantas piloto:**

Se define como el proceso que consiste en partes específicas ensambladas que operan como un todo armónico con el propósito de reproducir, a escala, procesos productivos (Anaya, 2008).

➤ **SHADE:**

Sistema de Humedal Artificial de Doble Espiral ubicado en el Bosque de San Juan de Aragón.

➤ Trazas de metales:

Los metales traza son elementos que se encuentran en bajas concentraciones en el ambiente.

➤ Unidades formadoras de colonias (UFC):

Es un indicador de la cantidad de microorganismos vivos en un líquido. Este valor, determinado por el número de colonias individuales, describe el número de células de un organismo en el agua.

RESUMEN

Los tratamientos biológicos de aguas residuales municipales tradicionalmente implican un proceso de filtración con arena y posterior desinfección con cloro antes de su disposición. El propósito de esta tesis fue obtener datos útiles para el diseño de una planta piloto filtro desinfectante (PPFD), de manera que realice una doble función: como filtro, retenga los microorganismos contenidos en el agua; y como agente desinfectante, induzca la pérdida de viabilidad de los microorganismos retenidos. Para la obtención de los datos, se emplearon columnas a escala de laboratorio empacadas con dos tipos de agregados minerales naturales (AMN) provenientes de minas de plata, uno de Michoacán (AMNM) y otro de Zacatecas (AMNZ), además se realizó la caracterización mineralógica de los AMN. Se construyeron las columnas experimentales empacadas con las siguientes características: largo 90cm; diámetro 5.08cm; tamaños de partícula de 5, 10 y 15mm; acomodo de horizonte superior de 20 cm con partículas de 15mm; horizonte medio de 50 cm con partículas de 10mm; horizonte inferior de 20 cm con partículas de 5mm. Las columnas experimentales empacadas se operaron por gravedad, a manera de filtros lentos. La caracterización mineralógica indica la presencia en trazas de Ag, Cu y Zn considerados como metales con actividad microbicida. En este sentido, se buscó que el arreglo de las partículas permitiera tanto su retención como el mayor contacto con los microorganismos contenidos en el agua a tratar, de forma que pudieran interaccionar lo más posible con los metales contenidos en el AMN y poder así inactivarlos. El agua experimental empleada se elaboró a partir de un efluente biológico estéril inoculado con cultivos de *Escherichia coli* ATTC11229 para dar una concentración de 10^4 UFC/100mL. Se evaluó el porcentaje de eliminación en las columnas experimentales empacadas con AMN, mediante inoculación controlada en lotes de agua estériles procedentes del Sistema de Humedales Artificiales de Doble Espiral ubicado en el Bosque de San Juan de Aragón. La alimentación del agua a tratar fue semicontinua, con un tiempo de contacto de 4 horas, logrando el 22% (10.5×10^3 UFC/100mL) con AMNM y de 73% (4.86×10^4 UFC/100mL eliminadas) con AMNZ.

1. INTRODUCCIÓN

La desinfección del agua tiene como objetivo la eliminación y desactivación de microorganismos patógenos. Los métodos convencionales de desinfección como el cloro reaccionan con la materia orgánica (MO) presente en el agua a tratar, lo que genera subproductos de cloración, específicamente compuestos orgánicos sintéticos como los trihalometanos, estos se conforman por los siguientes compuestos: cloroformo (CHCl_3), bromodiclorometano (CHBrCl_2), dibromoclorometano (CHBr_2Cl) y bromoformo (CHBr_3). Sin embargo, mediante el tratamiento de efluentes biológicos como los provenientes de humedales artificiales (HA) haciendo uso de sistemas de filtración con AMN resulta ser una tecnología nueva que aprovecha la característica microbicida de los metales contenidos en el AMN induciendo la eliminación de microorganismos. Para ello, el diseño de PPFD empacadas con AMN permite el desarrollo de un tren de tratamiento que complemente los sistemas de HA y se obtenga agua libre de microorganismos de interés sanitario. La complejidad del diseño de PPFD va a depender de las características iniciales del agua que se va a tratar, de manera que es necesario saber la calidad del efluente, por ello, se realiza la medición de parámetros como Coliformes totales (CT) y fecales (CF), fosfatos, nitratos, la demanda química de oxígeno (DQO), temperatura, pH, entre otros. Los sistemas de tratamiento serán tan complejos de acuerdo con el uso que se le dará los efluentes tratados. El diseño de las PPFD se obtiene a partir de los datos proporcionados a partir del uso de columnas experimentales empacadas ya que proporciona datos útiles de las características físicas y químicas de los AMN; del arreglo de los horizontes; del tipo de alimentación de agua a tratar. Las condiciones de filtración y desinfección que ejercen los filtros desinfectantes se debe, como material desinfectante, al efecto que ocasionará la interacción de metales contenidos en el AMN con la proteína de la bacteria, alterando la membrana induciendo la pérdida de viabilidad de microorganismos y eliminación. Como material filtrante, a partir de la distribución y acomodo del AMN para maximizar la retención de microorganismos. Estas condiciones van a variar fuertemente de acuerdo con las características físicas y de composición del material, es decir, a la cantidad de metales contenidos en el AMN; de su morfología; del lugar de origen y del tiempo de exposición a condiciones ambientales.

En este contexto, y para efectos de esta tesis, se buscó explorar la relación que existe entre la concentración de microorganismos que ingresan a las columnas experimentales empacadas y la concentración que se obtiene después de la filtración, obteniéndose así el porcentaje de eliminación de microorganismos logrado en el proceso. Para esta evaluación se emplearon 2 tipos de AMN como medio filtrante provenientes de minas de plata, uno del Estado de Michoacán (AMNM) y otro del Estado de Zacatecas (AMNZ). Lo anterior, debido a que por sus características físicas y químicas resultan ser una opción factible de utilizar, dando lugar a un sistema desinfectante que no necesita energía eléctrica para operar, al filtrar por gravedad. El agua tratada es susceptible de ser reaprovechada.

2. OBJETIVOS Y ESTRATEGIA DE TRABAJO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener datos experimentales a partir del uso de columnas a escala de laboratorio empacadas con AMN alimentadas con efluentes de tratamiento biológico para el diseño de una PPFD

2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar las dimensiones, tamaño y distribución de las partículas de AMN y forma de operación de las columnas a escala laboratorio mediante el uso de bibliografía especializada sobre el tema para el diseño de una PPFD que desinfecte efluentes de tratamiento biológico.
2. Determinar las principales características físicas y de composición de los AMN procedentes de una mina en el Estado de Michoacán (AMNM) y otra del Estado de Zacatecas (AMNZ), mediante técnicas gravimétricas y de análisis mineralógico para determinar su uso como material de empaque filtrante-desinfectante.
3. Evaluar de forma preliminar la respuesta de desinfección de las columnas experimentales a escala de laboratorio empacadas por separado con AMNM y AMNZ mediante el % de eliminación de *E. coli* cepa ATCC 11229 para evidenciar su posible uso en la desinfección de efluentes de tratamiento biológico.

2.3. ESTRATEGIA DE TRABAJO

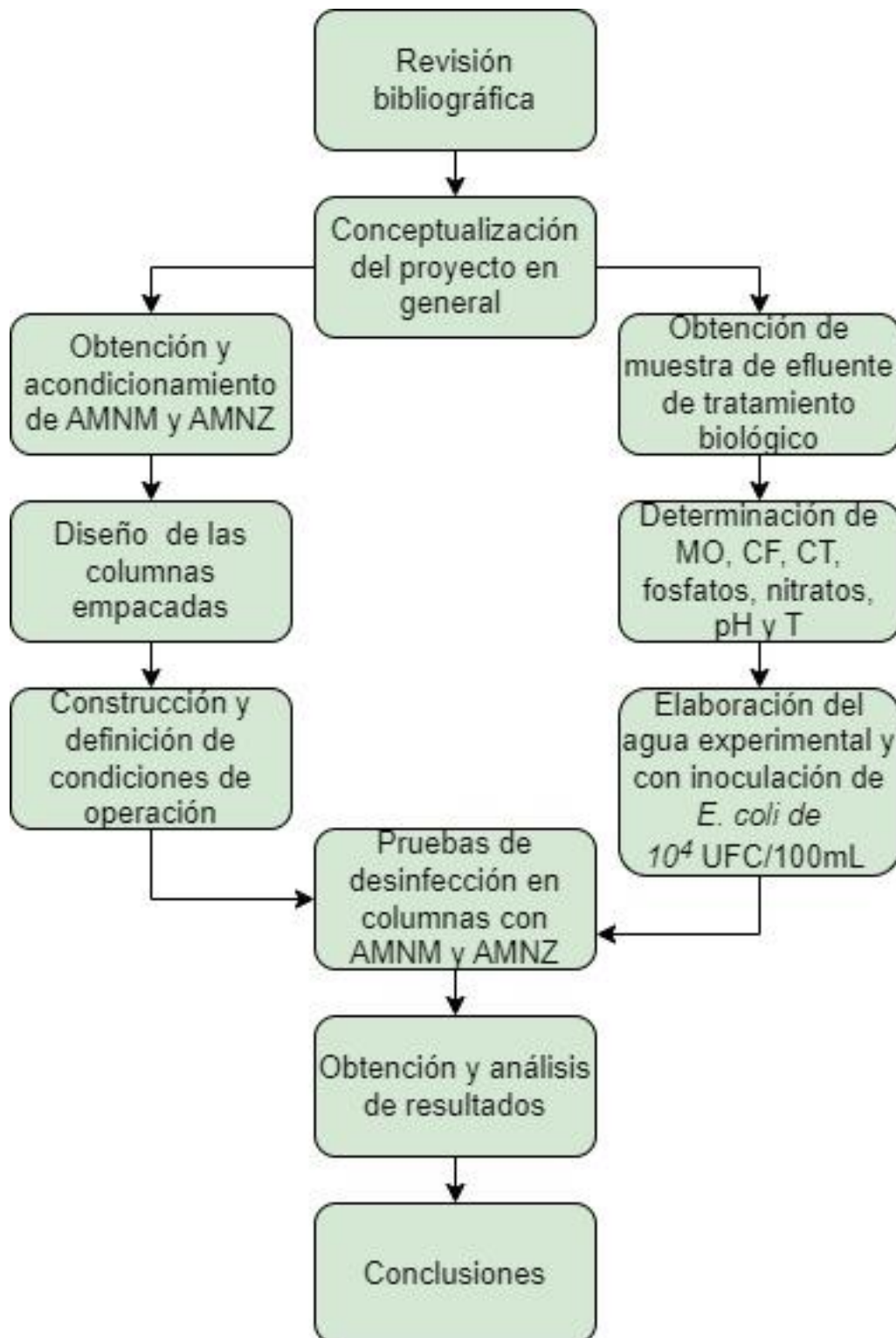


Figura 1. Estrategia de trabajo

3. MARCO TEÓRICO

Este apartado tiene como finalidad fundamentar los aspectos teóricos más relevantes del presente trabajo.

3.1. METALES COMO MATERIAL DESINFECTANTE

El uso de metales en la desinfección de agua representa un método complementario a los ya conocidos sistemas desinfectantes, con el uso de metales en un sistema de desinfección se busca proporcionar agua libre de microorganismos patógenos, evitar la producción de subproductos tóxicos como los que genera el cloro y prevenir los crecimientos bacteriológicos de los efluentes de tratamiento. De acuerdo con (Vullo, 2003) el impacto ambiental ocasionado por los contaminantes metálicos depende de la capacidad de acomplejamiento y de la respuesta a las condiciones fisicoquímicas y biológicas de su entorno. La toxicidad ocasionada por el elemento metálico se ve modificada por el tipo de compuesto, orgánico o inorgánico y sus características de hidro o liposolubilidad (Ferrer, A. 2003). No obstante, se tienen dos enfoques diferentes, el primero, en concentraciones altas los metales son contaminantes, segundo, los metales en trazas tienen capacidad microbicida y desinfectan efluentes con contenido de organismos de interés sanitario.

3.1.1. PLATA

De acuerdo con (Davies & Etris, 1997) en 1971 The Silver Institute comenzó a informar sobre desarrollos mundiales para los usos de la plata y alentó al desarrollo de sistemas con plata para purificar el agua y controlar las bacterias. Davies y Etris aseveran que la acción desinfectante de los metales se debe a la interacción que existe entre los iones a nivel enzimático, proteico y genético dentro de los organismos. La inactivación con plata se presenta de manera estable como Ag^0 y Ag^+ , debido a su alta electronegatividad ya que favorece la interacción con la superficie del organismo. El ion Ag^+ reacciona con los grupos amino, carboxilo y sulfhidrilo, alcanzando un mayor poder oxidante al combinarse con oxígeno. Esta interacción modifica los mecanismos de transporte de membrana y promueve la formación de compuestos complejos con la plata además inactiva enzimas superficiales que interfieren con la respiración del organismo. De acuerdo con (Magaña Lopez, 2018) menciona que los iones plata actúan como veneno protoplasmático que al unirse con la proteína forman enlaces R-S-S-R, que interrumpen las transferencias de

electrones, ya que el enlace S-Ag es estable. Esta interacción afecta el metabolismo en la asimilación de nutrientes provocando envenenamiento enzimático. La inhibición promueve el flujo de iones, causando variaciones en el tamaño celular, alteraciones en el contenido citoplasmático, membrana celular y en las capas exteriores. La combinación de lo anterior mencionado provoca muerte celular y posteriormente la descomposición de la membrana celular.

3.1.2. COBRE

La síntesis de nanopartículas de óxido de cobre mediante hidrólisis oxidativa ha resultado un área de interés debido a que las nanopartículas de cobre presentan propiedades antimicrobianas y antifúngicas. Un estudio realizado evaluó la actividad antimicrobiana de las nanopartículas de cobre y determinó que la concentración mínima inhibitoria para *Escherichia coli* fue de 10µg/mL, así mismo, se describe que el mecanismo de inhibición es provocado por el daño ocasionado en la membrana celular bacteriana debido a los iones liberados de Cu^{2+} ya que estos iones entran en las células y alteran su función enzimática lo que ocasiona la muerte de la bacteria. (Diaz Soria, 2021).

Los iones Cu^0 , Cu^+ y Cu^{2+} en estado acuoso poseen propiedades inhibitoras y oligodinámicas. De acuerdo con (Aguilar, Maya, Orta, & Luna Pabello, 2006) los iones tienden a formar compuestos coloidales, esto ocasiona la modificación de la permeabilidad de la pared celular y los intercambios iónico-osmóticos.

3.1.3. ZINC

El óxido de zinc resulta ser un material que presenta ciertas características como baja toxicidad para el ser humano en bajas concentraciones y efecto antimicrobiano contra bacterias como *E coli*. La desinfección de bacterias, específicamente para la inhibición de *E coli* presente en aguas residuales municipales mediante el uso de nanopartículas de óxido de zinc contribuye a evitar la formación de la biopelícula provocada por los microorganismos patógenos presentes en el agua. (Diaz Soria, 2021).

Se evaluó el efecto de la concentración y tiempo de contacto de nanopartículas de óxido de zinc frente a *E coli*. Se determinó que a mayor concentración de nanopartículas de óxido de zinc y mayor tiempo de contacto las nanopartículas de óxido de zinc tienen más

tiempo para penetrar en las células y destruir las células de la membrana de las bacterias y matar un mayor porcentaje de bacterias coliformes totales (Calderon Esquivel & Esteban Condor, 2022).

3.2. FILTRACIÓN

La filtración se emplea principalmente para conseguir la mayor eliminación de sólidos en suspensión y retención de microorganismos en los poros del lecho filtrante, de forma simultánea ocurre el proceso de desinfección de los efluentes de tratamiento biológico (Metcalf & Eddy, 2014). La filtración es uno de los procesos más frecuentemente usados para el proceso de potabilización de agua. Así mismo, este proceso se emplea como parte del tratamiento de efluentes procedentes de procesos de tratamiento de aguas residuales municipales (Comisión Nacional del Agua, 2007).

Tabla 1. Características físicas de los filtros de medio granular de uso común (Metcalf & Eddy, 2014)

Sentido del flujo	Operación de lavado a contracorriente	Flujo a través del filtro	Almacenamiento de sólidos	Comentarios	Diseño
Descendente	Discontinuo	Constante/variable	En superficie y en el estrato superior	Rápido aumento en la pérdida de carga	Individual
Descendente	Discontinuo	Constante/variable	En el interior	Medio doble diseñado para alargar la carrera del filtro	Individual
Descendente	Discontinuo	Constante/variable	En el interior	Medio múltiple diseñado para alargar la carrera del filtro	Individual
Descendente	Discontinuo	Constante/variable	En el interior		Individual
Ascendente	Discontinuo	Constante	En el interior		Patentado
Descendente	Discontinuo	Constante	En superficie y en el estrato superior	Introducción de aire para romper la película superficial y alargar la carrera del filtro	Patentado
Ascendente	Continuo	Constante	En el interior	El lecho de arena se desplaza en dirección contraria al flujo de agua	Patentado
Descendente	Semi-continuo	Constante	En superficie y en el estrato superior	Las celdas individuales se lavan a contracorriente de forma secuencial	Patentado
Descendente	Semi-continuo	Constante	En superficie y en el estrato superior	Las celdas individuales se lavan a contracorriente de forma secuencial	Patentado

Tabla 2. Características físicas de los filtros de medio granular de uso común (Metcalf & Eddy, 2014)

Tipo de funcionamiento	Tipo de filtro (nombre habitual)	Detalles del lecho filtrante		
		Tipo de lecho filtrante	Medio filtrante	Profundidad típica del lecho, cm
Semicontinuo	Convencional	Medio único (estratificado o no)	Arena o antracita	85
Semicontinuo	Convencional	Medio doble (estratificado)	Arena y antracita	90
Semicontinuo	Convencional	Medio múltiple (estratificado)	Arena, antracita y granate	90
Semicontinuo	Lecho profundo	Medio único (estratificado o no)	Arena o antracita	180
Semicontinuo	Lecho profundo	Medio único (estratificado)	Arena o antracita	180
Semicontinuo	Lecho fluidificado	Medio único (estratificado)	Arena	27,5
Continuo	Lecho profundo	Medio único (no estratificado)	Arena	180
Continuo	Puente móvil	Medio único (estratificado)	Arena	27,5
Continuo	Puente móvil	Medio doble (estratificado)	Arena y antracita	40

De acuerdo con la información especializada sobre las características físicas de filtros en medio granular (tabla 2) se tomaron criterios de diseño para la configuración de las columnas experimentales empacadas con AMN, específicamente son: tipo de funcionamiento (semicontinuo); Tipo de filtro (Convencional); Tipo de lecho (Medio Múltiple); Medio filtrante (AMN); Profundidad típica del lecho (90cm).

Para filtros lentos (tabla 3), la altura típica del medio se encuentra en un intervalo de 60 a 100cm de altura dependiendo el tipo de empaque (arena) con flujo descendente y filtración por gravedad.

Tabla 3. Clasificación de filtros (Hernández Cruz & Tautiva Villalobos, 2020)

Clasificación de filtros			
Según la velocidad de filtración	Según el medio filtrante usado	Según el sentido del flujo	Según la carga sobre el lecho
Rápidos 120 -360 m ³ /m ² /día	1. Arena (h = 60-75 cms)	Ascendentes	Por gravedad
	2. Antracita (h = 60-75 cms)	Descendentes	Por presión
	3. Mixtos: antracita (50-60 cms) y arena (15-20 cms)	-	-
	4. Mixtos: arena, antracita, granate.	Flujo mixto	-
Lentos 7-14 m ³ /m ² /día	Arena (h=60-100 cms)	Descendente Ascendente	Por gravedad

3.2.1. PROCESO DE FILTRACIÓN

La operación completa de filtración consta de dos fases: Filtración y lavado. La descripción de los fenómenos que ocurren en los sistemas de filtración son prácticamente las mismas, sin embargo, la fase de lavado es bastante diferente en función de si el filtro es de funcionamiento continuo o semicontinuo. En los filtros de funcionamiento semicontinuo la filtración y el lavado son fases que se dan a continuación de la otra, mientras que en los filtros de funcionamiento continuo ambas fases se producen de forma simultánea.

3.2.2. OPERACIONES DE FILTRACIÓN SEMICONTINUAS

El método de filtración semicontinua de acuerdo con Metcalf & Eddy (2014) es la fase de filtración en la que se elimina los sólidos en suspensión se lleva a cabo mediante la circulación del agua a través de un lecho granular, con o sin la adición de reactivos químicos. El ciclo de filtrado concluye cuando empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente hasta alcanzar un nivel máximo aceptable, o cuando la capacidad desinfectante del medio granular disminuye debido a la saturación y la

formación de la biopelícula. Una vez que se han alcanzado cualquiera de estas condiciones, se termina la fase de filtración, y se debe lavar el filtro a contracorriente para eliminar los sólidos en suspensión que se han acumulado en el seno del lecho granular filtrante.

3.2.3. OPERACIONES DE FILTRACIÓN CONTINUAS

En los filtros de funcionamiento continuo la capacidad de filtración no disminuye ya que el lecho filtrante se lava continuamente sin causar interferencia en el proceso de filtración. Este tipo de filtros es recomendado en aplicaciones de procesos de régimen permanente caracterizado por ciclos de filtrado largos debido a que el lecho filtrante se limpia constantemente disminuyendo así la formación de la biopelícula. (Metcalf & Eddy, Operaciones de filtración continua, 2014).

3.3. TIPOS DE FILTROS

Existen diversos tipos de filtros que se adecuan a las necesidades respecto a la calidad de agua a filtrar, tal como: a) filtro de gravedad b) filtros de carbón activado c) filtro de arena d) filtro de zeolita.

3.3.1. FILTRO DE GRAVEDAD

Suelen ser de forma rectangular, el agua ingresa por un canal lateral superior que actúa como vertedero por desbordamiento o bien dejando pasar el agua por orificios en sus paredes y se desplaza a través del lecho filtrante pasando a una cámara inferior separada por un falso fondo dotado de boquillas colectoras que dejan pasar el agua, pero no el material filtrante. Según lo que menciona (Pérez de la Cruz & Urrea Mallebrera, s.f) hay filtros de gravedad y cerrados a presión con el fin de evitar el contacto con el aire y la luz eludiendo el desarrollo microbiológico y disminuyendo la calidad del agua.

Los lechos filtrantes pueden estar conformados por una capa filtrante o bien en sistema multicapas. En capa única el medio más utilizado es la arena silíceo, de distintas granulometrías según la aplicación, asimismo en casos de agua con gran cantidad de sólidos, pueden colocarse sistemas de filtración en serie.

En sistemas multicapa, se han utilizado materiales como antracita, el granate como lecho filtrante con la opción de combinarse con distintas granulometrías.

3.3.2. FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado como material de empaque en filtros representa un método eficiente en la depuración de aguas residuales debido a su gran capacidad de adsorción, esto se debe a que posee algunas propiedades tales como purificante, decolorante y algunos efectos de desodoración. De acuerdo con (Metcalf & Eddy, Procesos químicos unitarios; Tratamiento fisicoquímico independiente, 2014) las columnas experimentales empacadas con carbón activado eliminan entre el 50 y 60% de la demanda bioquímica de oxígeno. Este material provee un método efectivo para remover una amplia gama de compuestos orgánicos y puede ser considerado su uso en la remoción de subproductos de la desinfección y precursores orgánicos.

En el tratamiento del agua, el carbón activado granular puede estar contenido en una columna como medio de contacto, en las columnas experimentales empacadas el agua se introduce por la parte superior y se extrae por la parte inferior.

Las propiedades de este medio filtrante hacen que las materias orgánicas y las causantes de olores y sabores, al igual que el cloro residual que se encuentra en el agua, sean absorbidas en las superficies del medio filtrante, eliminándolas así del líquido a tratar

El carbón activado en filtros funciona por el proceso de adsorción, es decir, la adsorción propicia la interacción superficial entre las especies disueltas y el carbón, la alta porosidad y gran área superficial proporciona una multitud de sitios reactivos para la unión de compuestos disueltos. En estos sitios se pueden unir los compuestos orgánicos disueltos (Chipile, 2017).

3.3.3. FILTRO DE ARENA

De acuerdo con lo que describe (Avila Bareño & Moreno Figueroa, 2016) la filtración lenta de arena como etapa principal de tratamiento, juega un papel muy importante en el mejoramiento de la calidad del agua en zonas rurales y urbanas marginadas, por su eficiencia, facilidad de diseño y de sencilla operación y mantenimiento. Este tipo de filtros reducen drásticamente el número de virus, bacterias, protozoarios o huevos de nematodos dañinos para la salud.

Una gran variedad de microorganismos (bacterias, protozoarios, algas, hongos) forman una delgada capa biológica sobre la superficie del lecho de arena (20 mm), la cual es en gran medida responsable del mejoramiento de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua.

El filtro trabaja a flujo descendente y la biocapa del lecho de arena necesita agua y alimento continuo y la arena debe mantenerse húmeda, por lo tanto, el filtro debe preferentemente funcionar sin interrupción.

3.3.4. FILTRO DE ZEOLITA

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados de metales alcalinos y alcalinotérreos con estructuras en redes cristalinas tridimensionales, tetraedros compuestos de SiO_4 y AlO_4 .

La zeolita presenta las siguientes características: tiene la capacidad de disminuir la acidez del agua, se requiere una menor cantidad de producto respecto a la arena sílice por la porosidad y densidad, posee una mayor superficie y produce una mayor claridad en el agua filtrada.

La zeolita es un material que presenta una alta durabilidad, solo requiere de un simple retro lavado de forma periódica para mantener su eficiencia y su desempeño, tiene una capacidad de flujo 4 veces superior a la de los medios filtrantes convencionales. Así mismo las zeolitas permiten llevar a cabo el tratamiento de aguas de una forma más eficiente logrando no solo la remoción de fosfatos, sulfatos y cloruros, sino también la eliminación de metales pesados (Avila Bareño & Moreno Figueroa, 2016).

3.4. AGREGADO MINERAL COMO AGENTE DESINFECTANTE

La desinfección según (Metcalf & Eddy, 2014) consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades, aunque hay ciertos organismos que no se destruyen durante el proceso, punto en el que radica la principal diferencia entre desinfección y esterilización. En el campo de las aguas residuales, las tres categorías de organismos entéricos de origen humano de mayores consecuencias en la producción de enfermedades son las bacterias, los virus y los quistes amebianos, sin embargo, para efectos de esta tesis se trabajó con la cepa de *Escherichia coli* ATCC 11229 (*Escherichia coli* (Migula) Castellani and Chalmers) ya que es una cepa con aplicaciones en la prueba

de filtros de membrana y desinfectantes (Collection, 2023). El proceso de desinfección intenta eliminar a todos los organismos presentes, a pesar de ello no todos los métodos comúnmente empleados eliminan a todos los organismos patógenos (Magaña López , 2011).

El AMN ha evidenciado el efecto microbicida mediante mecanismos de estrés mecánico y químico, asociado a la presencia de cristales de sílice y a la presencia en trazas de los metales, cuya interacción daña de manera irreparable las estructuras externas e internas de los microorganismos (Miranda Ríos, Luna Pabello, Orta de Velásquez , & Barrera Godínez, 2011). Cabe señalar que los ensayos realizados fueron practicados sin presencia de materia orgánica en solución. Es por esta razón que en el caso de los ensayos de desinfección de los efluentes de tratamiento biológico se debe considerar esta variable de manera adicional a las características del AMN como son el tipo de minerales que contienen dependiendo de la mina de donde se extraen; tiempo de intemperización; su acondicionamiento previo al uso; sus propiedades físicas y químicas promedio, dado que son materiales de composición heterogénea. (Magaña-López Rafael et al, 2016)

3.5. FILTRO DESINFECTANTE

El concepto de filtro desinfectante parte de la idea de conformar una unidad de tratamiento que realice la doble función: filtrar (retener partículas como los microorganismos suspendidos) y desinfectar (pérdida de viabilidad o estructura de los microorganismos) un determinado volumen de agua que contenga microorganismos presentes en suspensión).

Para tal efecto es necesario realizar pruebas en columnas experimentales empacadas con AMN a escala laboratorio. El uso de AMN como material filtrante actúa como medio filtrante/desinfectante. Como material filtrante, a partir de la distribución y acomodo del AMN para maximizar la retención y eliminación de microorganismos. Como material desinfectante, al efecto que ocasionará la interacción entre los iones metálicos y los microorganismos ya que la interacción propicia daño estructural y actividad bioquímica (Magaña López , 2011). Para la presente tesis, el proceso a emplear se basa

principalmente en evaluar la filtración de efluentes de tratamiento biológico como los provenientes del SHADE. Se sabe que la desinfección sucede por dos fenómenos, primero por estrés físico y segundo por estrés químico, es decir, al filtrar el agua esta se abre paso por el AMN lo que genera daño en la estructura del microorganismo, simultáneamente la acción de los iones metálicos sobre el microorganismo inactiva y posteriormente elimina a los organismos de interés sanitario (Magaña Lopez, 2018).

3.5.1. AMN COMO MATERIAL DE EMPAQUE

Existe poca información detallada sobre las principales características físicas y químicas de los AMN como material de empaque para filtros desinfectantes (Miranda Ríos et al., 2011; Magaña López, 2018). Conforme a lo evidenciado por Díaz Soria (2021) las nanopartículas de cobre, plata, hierro y óxido de zinc en el tratamiento y desinfección de aguas residuales poseen buenas propiedades bactericidas, que le permiten ser utilizadas en el tratamiento y desinfección. Es importante señalar que el AMN al provenir de una actividad relacionada con la explotación minera, es un material que no presenta un valor agregado para la industria. Sin embargo, mediante el acondicionamiento del material se puede adecuar a los filtros de acuerdo con el efluente que se quiera tratar.

3.5.2. CONFIGURACIÓN DE FILTRO DESINFECTANTE

El contenido de materia orgánica (suspendida y disuelta) así como de microorganismos suspendidos presente en el agua a tratar se toman en cuenta para la configuración del filtro desinfectante. Por este motivo, es importante como primer paso realizar la caracterización del agua que se va a tratar antes de la filtración. Asimismo, debe considerarse la concentración de los contaminantes anteriormente mencionados ya que dependiendo de la misma es el tamaño de la partícula del AMN a emplear, a efecto de prevenir efectos de taponamiento.

Como segundo paso, es importante definir la cantidad de AMN requerido para empacar, acorde a la configuración definida. Las principales variables a considerar son: a) tamaño del filtro b) diámetro del filtro c) tamaño de partícula del material de empaque d) acomodo y cantidad de lechos filtrantes e) tipo de flujo f) tiempo de contacto. Es importante mencionar que el filtro desinfectante, está previsto que forme parte del tren de tratamiento

de efluentes secundarios. De manera particular, se pretende acoplarlos a humedales artificiales a efecto de desinfectar sus efluentes sin uso de cloro.

3.5.3. PPFDA ACOPLADAS A HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son una ecotecnología que utiliza procesos de biotransformación y mineralización permitiendo la disminución de la concentración de carbono, nitrógeno y fósforo. Están compuestos por un medio de soporte, un medio vegetal y microorganismo (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014). Las PPFDA acopladas como sistemas complementarios al tratamiento de efluentes biológicos como los provenientes de humedales artificiales permiten la obtención de agua que presenta una eliminación total o parcial de microorganismos de interés sanitario debido al doble funcionamiento que ejercen las PPFDA que corresponde a la filtración/desinfección ocasionado por el AMN.

4. METODOLOGÍA

El trabajo se conformó por las etapas 1A, 1B, 2A y 2B donde:

- Etapa 1A: Correspondió a la obtención y acondicionamiento de los AMN provenientes de Michoacán y Zacatecas. Asimismo, se realizó la caracterización física y de composición mineralógica.
- Etapa 1B: En este apartado se realizó el diseño, la construcción y operación de las columnas experimentales empacadas.
- Etapa 2A: En esta etapa se describe como se realizó la obtención del lote de agua proveniente del efluente de tratamiento biológico procedente del SHADE y lo correspondiente a la caracterización para la determinación de la MO y coliformes totales y fecales (Las técnicas se encuentran descritas en el anexo I).
- Etapa 2B: Para esta etapa, se realizó la elaboración del agua experimental e inoculación controlada para la cuantificación de *E. coli* después de 4 horas de tiempo de contacto en las columnas experimentales empacadas.

4.1. ETAPA 1A

Tiene como fin obtener información de la obtención y acondicionamiento del material de empaque. Se utilizaron dos AMN provenientes de minas de plata, uno de Michoacán y otro de Zacatecas. Así mismo se realizó la caracterización física y química de ambos AMN.

4.1.1. MATERIAL DE EMPAQUE

El material de empaque proviene de dos sitios diferentes, el primero de Michoacán y el segundo de Zacatecas, ambos materiales tienen un tamaño de partícula de 5mm, 10mm y 15mm. Dichas granulometrías fueron elegidas debido a que se desea emular un filtro convencional que presente buenos porcentajes de eliminación de *Escherichia coli* y que presente buenas condiciones de filtración evitando taponamientos debido a la MO presente en el agua.

4.1.2. OBTENCIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL MATERIAL FILTRANTE

El material filtrante corresponde a AMN proveniente de dos zonas diferentes, el primero proviene de terreros en una mina en Michoacán y el segundo proveniente de una mina de plata ubicada en Zacatecas. En el lugar de obtención del AMNM se extrae principalmente plomo, zinc y plata. De acuerdo con la información mineralógica del municipio de Angangueo muestra que está constituido por galena (PbS), cuarzo (SiO_2), pirita (FeS_2), calcita ($CaCO_3$), sulfosales de plata (Ag_2S), esfalerita (ZnS) y rodocrosita ($MnCO_3$) (Servicio Geológico Mexicano, 2006). Este material se obtiene principalmente durante el proceso de extracción de metales y presentan una cantidad en trazas de minerales de interés por lo que no cuentan con un valor agregado.

Por otra parte, el AMNZ tiene características físicas y químicas similares al AMNM ya que proviene de una mina donde se extrae plata, de forma que al tener concentraciones en trazas este agregado mineral ya no cuenta con valor agregado para la industria, es decir, es un material residual que ya no tiene ningún uso.

Ambos AMN fueron triturados y tamizados en el laboratorio de beneficio de minerales en el conjunto D en la Facultad de Química hasta obtener un tamaño de partícula de 5mm, 10mm y 15mm.

4.1.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AGREGADOS MINERALES

Las características del lecho filtrante evaluadas fueron:

a) Densidad real

Corresponde a la relación masa/volumen de las partículas que conforman el suelo. Se determinó por desplazamiento de volumen; a una probeta se le agrega un volumen de agua conocido; se pesan 10g de AMN y se vierte en la probeta con agua, después de pasar unos minutos se registra el volumen desplazado. La densidad real se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_R = \frac{M_{material}}{(V_{con material} - V_{sin material})}$$

Ecuación 1. Densidad Real.

b) Densidad aparente

Se expresa como la razón entre la masa de las partículas y el volumen total del suelo. Se determinó pesando una probeta vacía; posteriormente se llena con AMN hasta la marca, se elimina el espacio que existe entre el AMN golpeando la probeta, por último, se rellena el faltante hasta la marca. La densidad aparente se calcula con la siguiente ecuación donde:

A= Probeta+AMN

B=Probeta vacía

V= Volumen

$$\rho_{AP} = \frac{A - B}{V}$$

Ecuación 2. Densidad aparente

c) Espacio poroso

Se calcula mediante los valores obtenidos de densidad, de forma que la masa de la fase sólida de un volumen unitario corresponde al valor de la densidad aparente, y el volumen ocupado por esa fase sólida lo definiría el cociente entre la densidad real de dicha fase sólida expresada con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ porosidad} = 100 \left[1 - \frac{\rho_{Ap}}{\rho_R} \right]$$

Ecuación 3. Espacio poroso

4.1.4. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL AMN

Se efectuó el análisis de composición mineralógica de las muestras de los AMN en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) para identificar y determinar la cantidad de metales presentes en el AMN.

Para la identificación se utilizaron las siguientes técnicas analíticas:

➤ Microcopia electrónica de Barrido (MEB)

La MEB aprovecha las propiedades de la incidencia de un haz de electrones en la muestra permitiendo la caracterización morfológica de la estructura, superficie, cristalinidad, degradación y textura de materiales orgánicos e inorgánicos en zonas microscópicas, obteniendo imágenes topográficas con una gran profundidad de campo. (Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación, 2023)

➤ Espectroscopia de Emisión Atómica en flama (EEA)

La EEA se encarga de la detección y determinación cuantitativa de aproximadamente el 50% de los elementos de la tabla periódica. El tipo de muestra puede ser sólida o líquida provenientes de minerales, sedimentos, aguas industriales, cerámicos, lodos y material biológico. (Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación, 2023). Esta técnica se basa en la medición de la intensidad de una línea de emisión específica del elemento que se desea determinar. La intensidad es directamente proporcional a la concentración, es decir, cuanto mayor sea la intensidad de la línea de emisión mayor será su concentración. En los instrumentos de EEA, la flama atomiza y excita los componentes de la muestra, se emite radiación electromagnética de diferentes longitudes de onda que son separadas en el monocromador y la línea de interés llega al detector, al amplificador y finalmente al sistema de lectura (Castro, 2000).

4.2. ETAPA 1B

Este apartado se enfoca principalmente en la construcción y operación de las columnas experimentales empacadas con AMN. El arreglo y la configuración se realizó primero para el AMNM y después para AMNZ respectivamente.

4.2.1. ARREGLO DE LOS HORIZONTES DE AMN

El arreglo de los horizontes en las columnas experimentales empacadas se conformó por tres capas organizadas de la siguiente forma: A) capa superior, B) capa intermedia y C) capa inferior (Véase la figura 2).

- A) Este horizonte tiene una profundidad de 20cm y el AMN tiene un tamaño de partícula de 15mm, con ello se buscó ocasionar daño mecánico mediante el estrés físico ocasionado por la forma irregular del AMN a la estructura del organismo.
- B) El horizonte en esta capa tiene una profundidad de 50cm y 10mm de tamaño de partícula, se buscó ocasionar daño químico favoreciendo la interacción entre los iones metálicos y la estructura de *E. coli*.
- C) Este horizonte cuenta con una profundidad de 20cm y 5mm de tamaño de partícula, por ello al ser el material con menor tamaño se busca potencializar el daño químico propiciando la eliminación total o parcial de *E. coli*.

Se realizó este arreglo debido a que se buscó tener buenas condiciones de filtración/desinfección. Como filtración, se buscó evitar taponamientos debido a la MO presente en el agua a tratar. Como desinfección, a maximizar la interacción entre los iones metálicos contenidos en el AMN y eliminar la mayor concentración de *E. coli* después de la filtración.

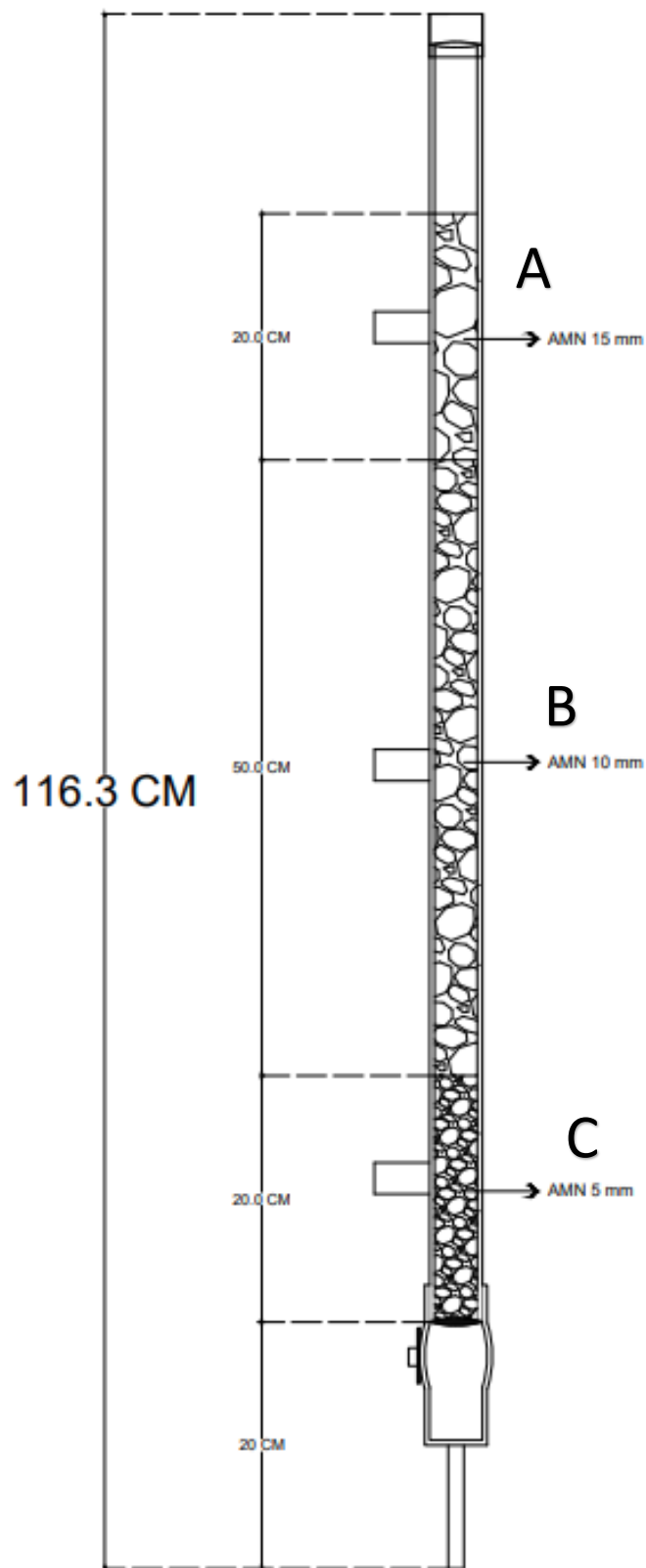


Figura 2. Arreglo de la columna empacada con AMN
 Elaboró: Nuñez Bahena Grecia Sareth

4.2.2. DISEÑO DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS.

Se pretende realizar un filtro que sea capaz de inactivar o eliminar microorganismos patógenos, que sea de bajo costo, reproducible, que no utilice energía eléctrica, que no genere compuestos tóxicos secundarios y que el efluente sea aprovechado.

De acuerdo con (Metcalf & Eddy, 2014) señala que para un filtro de operación semicontinua de medio múltiple la profundidad típica del medio es de 90cm con dirección de flujo descendente de manera que el filtro se ajuste a las condiciones del sitio de trabajo donde estarán colocadas las columnas experimentales empacadas con AMN.

4.2.3. CONFIGURACIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS

Las columnas experimentales empacadas se configuraron en base a la cantidad de material disponible ya que se contaban con 30kg de AMNM y 30Kg de AMNZ, sin embargo, en el proceso de trituración se pierde hasta 60% de AMN obteniendo las cantidades citadas en la tabla 4.

Tabla 4. Cantidad disponible de AMN

Tamaño de AMN [mm]	AMNM [kg]	AMNZ [kg]
5	1.5	5
10	7.5	8
15	6.5	1.5
Total [kg]	15.5	14.5

De acuerdo con lo anterior el sistema de filtración con columnas experimentales empacadas presenta las siguientes características:

- Horizonte de 90cm de profundidad
- Filtración por gravedad
- Alimentación de agua de operación semicontinua

- Tres lechos de AMN, siendo el tamaño más pequeño el que se encuentra en la parte inferior de la columna y el de mayor tamaño en la parte superior de la columna. Véase en la figura 2.

4.2.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS

La construcción de las columnas experimentales empacadas consta de 4 partes a) armado de columnas b) llenado de columnas c) colocación de las columnas en el lugar asignado d) recolección del agua contenida en el filtro.

- a) Se armaron las columnas lijando los extremos de cada tubo y haciendo tres perforaciones en el costado distribuidas a lo largo de la columna para colocar tubo con tapón con el fin de poder sacar AMN para su análisis, posteriormente se limpió y conectó en la parte inferior la válvula de esfera con malla de acero inoxidable de 2mm que cumple con la función de retener el AMN, se colocó una reducción de 2 pulgadas a $\frac{1}{2}$ pulgada para controlar la salida del agua de la columna, por último, se pintó el exterior del tubo con pintura color negro para evitar el paso de luz. El medio filtrante se seleccionó por el método de cuarteo el cual tiene como objetivo la obtención de una muestra representativa respecto al tamaño. Se fue agregando el AMN de acuerdo con la configuración de los horizontes.
- b) Se seleccionó el AMN de cada tamaño de partícula, de acuerdo con la figura 2, se agregó primero el AMN de 5mm, posteriormente el de 10mm y por último el de 15mm. Para el llenado se cortó tubo de PVC de 2" con una profundidad de 20 y 50cm respectivamente, se realizó un tapón para retener el AMN, se agregó a cada tubo golpeando en repetidas ocasiones para acomodar el AMN y eliminar espacios vacíos generados por el material, por último, se fue agregando a la columna en el orden mencionado y golpeando después de su adición para acomodar el AMN.
- c) Se designó el cuarto caliente para la colocación de las columnas, se utilizó la estructura de madera como base y mediante abrazaderas metálicas se sujetaron las columnas para que quedaran fijas.
- d) El producto obtenido de la filtración se recolectó en vasos de precipitados previamente esterilizados con una tapa hecha de papel aluminio y papel kraft, los vasos se colocan en la parte inferior de las columnas. Para facilitar la salida del

agua y evitar derrames se colocó una reducción en la válvula de esfera de 2 pulgadas a 1/2 pulgada. Después de la colección del filtrado se ponen las tapas de papel y se llevan inmediatamente a la mesa de trabajo donde se encuentra un mechero encendido para evitar la contaminación del filtrado.

4.2.5. OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS

Al ser un sistema de operación semicontinua se controló la entrada y la salida del agua experimental en las columnas. La alimentación se realiza quitando el tapón de PVC asegurándose de que la válvula de esfera este correctamente cerrada y llenando hasta cubrir los 90cm de la columna de AMN. Se adicionaron 1000mL de agua experimental que cuenta con una concentración de 10^4 UFC/100mL. El agua experimental se queda dentro de la columna y se descarga después de haber transcurrido el tiempo de contacto de 4 horas. Después de transcurrido el tiempo de contacto, se descarga el agua filtrada abriendo la válvula de esfera depositando el filtrado de las columnas en un vaso de precipitado previamente esterilizado que se encuentra en la parte inferior de la columna.

4.2.5.1. TIEMPO DE CONTACTO

Este parámetro corresponde al tiempo de interacción entre el microorganismo y el AMN, así mismo, corresponde al tiempo en el que ocurre el proceso de eliminación total o parcial de *E. coli*. De acuerdo con lo que menciona (Miranda Ríos, Estudio y evaluación del poder germinicida de compuestos de plata en aguas residuales parcialmente tratadas (Tesis de maestría), 2005) se necesitan solamente 30 minutos de contacto para la desinfección de *E. coli* en solución salina isotónica. Sin embargo, debido a la presencia de MO se estima un tiempo de contacto de 4 horas.

El tiempo de contacto puede verse afectado debido a la concentración de MO presente en el agua con la que se está trabajando por lo que al incrementar el tiempo de contacto promueve la eliminación de *E. coli*.

4.2.6. RECOLECCIÓN DEL AGUA EXPERIMENTAL FILTRADA

Se realizó la recolección del agua filtrada mediante el uso de vasos de precipitados estériles de 1L con tapón. Después del colectado se llevó el vaso tapado hasta la mesa de trabajo donde se encuentra un mechero encendido para generar una zona aséptica y

evitar posible contaminación, posteriormente el agua filtrada se mantuvo en agitación hasta su uso para la cuantificación de *E. coli*.

4.3. ETAPA 2A

Se obtuvo un lote de agua proveniente del efluente del SHADE. Posteriormente se almacenó hasta su uso en el cuarto frío en el laboratorio de Microbiología Experimental a una temperatura de 2-4°C.

Se caracterizó el efluente para determinar la concentración de MO y otros parámetros que indican la calidad del lote de agua. De manera más específica se midieron los siguientes parámetros: a) coliformes totales y fecales, b) DQO, c) fosfatos, d) nitratos, e) temperatura, f) pH.

Así mismo, se esterilizó el efluente del SHADE en autoclave a 115°C durante 15 minutos agregando 4.5L en un matraz de bola de 6L de capacidad con el fin de tener una inoculación controlada de *E. coli*. De acuerdo con lo que establece la (Secretaría de Gobernación SEGOB, 2021) reporta unidades de UFC/100mL, de tal manera que la concentración a inocular corresponde a 10^4 UFC/100mL y de esta forma se cumple con el rango de concentración de microorganismos en el efluente del SHADE que corresponde a 10^4 UFC/100mL

4.3.1. OBTENCIÓN DE LOTES DE AGUA

Se obtuvo un lote de agua con la capacidad suficiente para realizar los análisis por duplicado tomado del efluente del SHADE ubicado en el LBSJA. Se calculó la cantidad necesaria de agua mediante la capacidad de filtración de las columnas empacada que corresponde a 1L por cada columna.

4.3.2. CARACTERIZACIÓN DEL LOTE DE AGUA

Se determinó la materia orgánica y otros parámetros que indican la calidad del agua del efluente del SHADE empleando las técnicas descritas en el Anexo I. De esta manera con los datos obtenidos de la concentración de materia orgánica se realizó el arreglo de los horizontes en las columnas experimentales empacadas con AMN con el objetivo de obtener buenas condiciones de filtración/desinfección. Los resultados de la caracterización se muestran en el apartado de Resultados y discusión de resultados.

4.3.3. TÉCNICAS PARA CARACTERIZAR LOTE DE AGUA

Para la caracterización se realizó la cuantificación de coliformes totales (CT) y fecales (CF), materia orgánica, nitratos, fosfatos, pH y temperatura del efluente proveniente del último módulo del SHADE debido a que son los parámetros que típicamente se utilizan para la determinación de la calidad de un efluente de interés sanitario. Las técnicas se obtuvieron del libro Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

4.3.3.1. COLIFORMES TOTALES Y FECALES

Para la cuantificación de CT y CF se utilizó la técnica extensión en placa utilizando los medios ENDO y m-FC respectivamente (APHA, 2017a).

4.3.3.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Para la determinación de la materia orgánica se midió la DQO mediante el método colorimétrico de reflujo cerrado descrito en (APHA, 2017b).

4.3.3.3. FOSFATOS

Para la cuantificación de fosfatos se utilizó el método colorimétrico 4500-P descrito en (APHA, 1998a)

4.3.3.4. NITRATOS

Para la determinación de nitratos se utilizó el método de detección UV 4500-B descrito en (APHA, 1998b)

4.3.3.5. POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH)

El pH del efluente del SHADE se determinó mediante lo descrito en (NMX-AA-008-SCFI-2016)

4.3.3.6. TEMPERATURA

Para la medición de la temperatura se empleó un medidor multiparámetro de la marca Thermo ELECTRON CORPORATION previamente calibrado tomando las consideraciones del manual y se cuantificó de forma simultánea con el pH.

La determinación de estos parámetros nos brinda datos de la calidad del efluente proveniente del SHADE, así mismo son pauta para realizar la configuración del sistema de filtración.

4.4. ETAPA 2B

En esta etapa se buscó evaluar el porcentaje de eliminación de *E. coli* en las columnas experimentales empacadas. Para ello, se llevó a cabo un proceso de conservación y esterilización del agua a tratar. Así mismo se cuantificó la concentración de *E. coli* después de filtración en las columnas experimentales empacadas.

4.4.1. CONSERVACIÓN DEL AGUA

El lote de agua se colocó en el cuarto frío del laboratorio de Microbiología Experimental en garrafones de 20L cerrados a una temperatura 2-4°C. Se almacenaron hasta su uso.

4.4.2. ESTERILIZACIÓN

Se esterilizó el lote de agua en una autoclave FELISA FE-397 a 115°C y 1.5 lb/ft³ durante 15 minutos utilizando matraces de bola de 6L de capacidad previamente esterilizados. Se agregaron 4.5L por cada matraz de bola y se almacenaron a temperatura ambiente y con ausencia de luz hasta su uso.

4.4.3. AGUA EXPERIMENTAL

Se realizó la inoculación controlada con la cepa previamente activada en agar cuenta estándar incubado a 37°C ±2°C durante 24h. Se tomó del cultivo microorganismos con un asa bacteriológica en un tubo de 16x150mm con taparrosca y solución salina isotónica al 0.85% estéril hasta llegar a la turbidez correspondiente al tubo 2 de McFarland, se homogenizó con un agitador VORTEX G560, se tomó 0.1mL y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 200mL con 100mL de solución salina isotónica al 0.85% estéril. De este matraz se tomó 1mL con micropipeta Labopette Hirschmann laborgerate y se adicionó en un matraz Erlenmeyer de 2L previamente esterilizado con 999mL de agua estéril del efluente del SHADE.

4.4.3.1. CONTROL DE LA CONCENTRACIÓN DE MICROORGANISMOS

Para el control al tiempo cero, se tomó un alícuota del matraz Erlenmeyer de 2L el cual tiene una concentración de *E. coli* de 10^4 UFC/100mL, se tomó una alícuota de 0.1mL y se colocó en agar ENDO con 0.1mL de solución neutralizante y se efectuó la técnica extensión en placa con asa bacteriológica. Este proceso se realizó por triplicado para ambas columnas. El control sirve para la determinación de la concentración de microorganismos que ingresan a las columnas experimentales empacadas y corroborar que la concentración inicial es la correcta.

4.4.4. CUANTIFICACIÓN DE *Escherichia coli*

Se realizó mediante la técnica extensión en placa descrita en (APHA, 2017a). Se realizó un control partiendo del tubo 2 de McFarland para tener una concentración inicial de microorganismos conocida que corresponde a 10^4 UFC/100mL. Se realizó la extensión en placa de los controles por triplicado para cada columna al tiempo cero y se incubó durante 24h.

Del vaso de precipitado donde se realizó la recolección del agua experimental filtrada se pone en agitación con un agitador magnético Thermolyne 546725 a lado de 2 mecheros bunsen generando así una zona aséptica. Se tomó una alícuota de 0.1mL con micropipeta Biotlit Proline y se agregó en la caja Petri con medio ENDO para su extensión y posteriormente se metió a incubar durante 24h en ausencia de luz. Se tomaron 3 alícuotas antes y después de la filtración del agua experimental, estas se inocularon por triplicado en agar ENDO. Después de transcurrido el tiempo de incubación se cuantificó la concentración de microorganismos que crecieron. Se realizó la cuenta en los controles al tiempo cero y en el agua experimental filtrada después de 4h de contacto.

De esta manera se puede calcular el porcentaje de eliminación de los AMN frente a *E. coli* en columnas experimentales empacadas utilizando AMN provenientes de dos lugares diferentes mediante la relación de la concentración de microorganismos que ingresan a las columnas y la concentración que se obtienen después de la filtración.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de las etapas descritas en la metodología.

5.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AMN

Para la caracterización del material se tomaron muestras de AMNM y AMNZ, se seleccionó cada tamaño mediante el método de cuarteo el cual consiste en agrupar el material y partirlo por la mitad, así mismo se vuelve a partir por la mitad hasta obtener cuatro cuartos, de esta manera, se obtiene una muestra representativa. Al material seleccionado se le determinó densidad real, densidad aparente y espacio poroso. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades físicas del AMNM.

Tamaño de AMNM [mm]	Densidad real promedio [g/cm³]	± σ	Densidad aparente promedio [g/cm³]	± σ	% Espacio poroso
5	2.47	0.05	1.20	0.010	51.50
10	2.53	0.01	1.18	0.66	53.21
15	2.53	0.02	1.23	0.020	55.91

Se realizó la medición por triplicado para cada tamaño de partícula de AMN (n=3). De acuerdo con lo que menciona (Villaseñor Ortiz, 2015) los valores de densidad real para suelos minerales se encuentra entre 2.6-2.7 g/cm³, de forma que, los resultados obtenidos indican que el AMNM tiene características de un suelo mineral (véase en Tabla 5). Sin embargo, esta característica varía fuertemente dependiendo de la composición química.

Tabla 6. Propiedades físicas del AMNZ.

Tamaño de AMNZ [mm]	Densidad real promedio [g/cm³]	± σ	Densidad aparente promedio [g/cm³]	± σ	% Espacio poroso
5	2.82	0.070	1.23	0.007	56.05
10	2.73	0.122	1.10	0.767	59.69
15	3.423	0.002	1.33	0.304	60.87

En la Tabla 6, se observa que el AMNZ es más pesado a comparación del AMNM, de acuerdo con lo que señala (DEPARTAMENTO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, 2019), la densidad aparente se encuentra en el rango de 1-1.4 g/cm³ que corresponde a suelos minerales, esta característica varía de acuerdo con la morfología del material.

La porosidad representa el volumen total de poros, así mismo, los valores obtenidos van del 50 al 60%, de manera que, a menor tamaño de partícula menor será su porosidad y a mayor tamaño de partícula mayor porosidad. El espacio poroso resultante se encuentra por encima de los valores usados en medios filtrantes, incluso superior a la porosidad de la grava gruesa que cuenta con 50% de espacio poroso. Estos resultados varían debido a la estructura del AMN ya que no es un material totalmente esférico.

5.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AMNM Y AMNZ

Se determinó la composición química de cada AMN mediante Microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de emisión atómica (EEA).

Para los análisis de las muestras de AMNM y AMNZ se utilizó el polvo resultante de la trituración del material. Se seleccionó mediante el método de cuarteo para obtener una muestra representativa, posteriormente se envió a la USAII para su análisis.

5.2.1. ESPECTROSCOPIA ATÓMICA

De acuerdo con el reporte de la USAII de la Facultad de Química (UNIDAD DE SERVICIOS DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN Y A LA INDUSTRIA, 2023) se efectuó el análisis de metales contenidos en el AMN empleando un espectrómetro de emisión atómica con plasma generado por microondas (MP-AES), siguiendo el procedimiento interno PT-USAII-FQ-EA-003. La muestra fue tratada con ácido nítrico suprapuro empleando un horno de microondas marca MultiWave Pro Anton Paar. Con esta metodología se busca analizar Cobre, Hierro, Zinc, Plata, Arsénico, Plomo, Oro y Estaño, mediante la técnica de espectroscopia atómica (AA-Flama).

Los resultados obtenidos para AMNM se encuentran en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de análisis por EA para AMNM

<i>Elemento</i>	<i>µg/g</i>
<i>Hierro</i>	403914.65
<i>Cobre</i>	10061.26
<i>Plomo</i>	1212.23
<i>Arsénico</i>	416.83
<i>Zinc</i>	202.23
<i>Estaño</i>	2.69
<i>Plata</i>	2.24

En la Tabla 7, se indica la cantidad de microgramos por gramo de muestra. Se observa que el elemento en mayor abundancia en el AMNM es el hierro y el de menor cantidad la plata. Asimismo, hay presencia de plomo y arsénico, mismos que forman parte de los metales pesados y que en concentraciones que superen el límite máximo permisible descrito en la NOM-001-SEMARNAT-2021 puede representar un riesgo para la salud.

Para el AMNZ, según lo que informa la USAII, el análisis se realizó con un espectrómetro de emisión atómica con plasma generado por microondas (MP-AES) y empleando el procedimiento interno PT-USAII-FQ-EA-003. La muestra fue tratada en horno de microondas marca Anton Paar, modelo MultiWave PRO, empleando ácido nítrico suprapuro. Obteniéndose los resultados citados en la tabla 8 para AMNZ:

Tabla 8. Resultados de análisis EA para AMNZ

<i>Elemento</i>	<i>µg/g</i>
<i>Hierro</i>	39123.80
<i>Plata</i>	893.35
<i>Plomo</i>	688.10
<i>Cobre</i>	400.08
<i>Oro</i>	32.49
<i>Arsénico</i>	10.15

En la tabla 8, se puede observar que en el AMNZ hay mayor concentración de hierro, además de que tiene mayor concentración de plata que el AMNM. El AMNZ tiene la característica de estar menos intemperizado que el AMNM, es decir, que estuvo menos expuesto a condiciones ambientales, tales que, contribuyen al desgaste del material.

5.2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Para esta técnica se utilizó un microscopio electrónico de alto vacío JEOL JSM-5910 con resolución de 3.0 nm HV y microanálisis Oxford Aztec 100 para la caracterización de la morfología del AMN.

De acuerdo con los resultados obtenidos por MEB los espectros emitidos muestran la caracterización superficial de los AMN (imagen 2).

Se emitieron 15 espectros para el AMNM a una longitud de 500µm, en cada espectro se obtuvo un porcentaje en masa de los elementos detectados por MEB

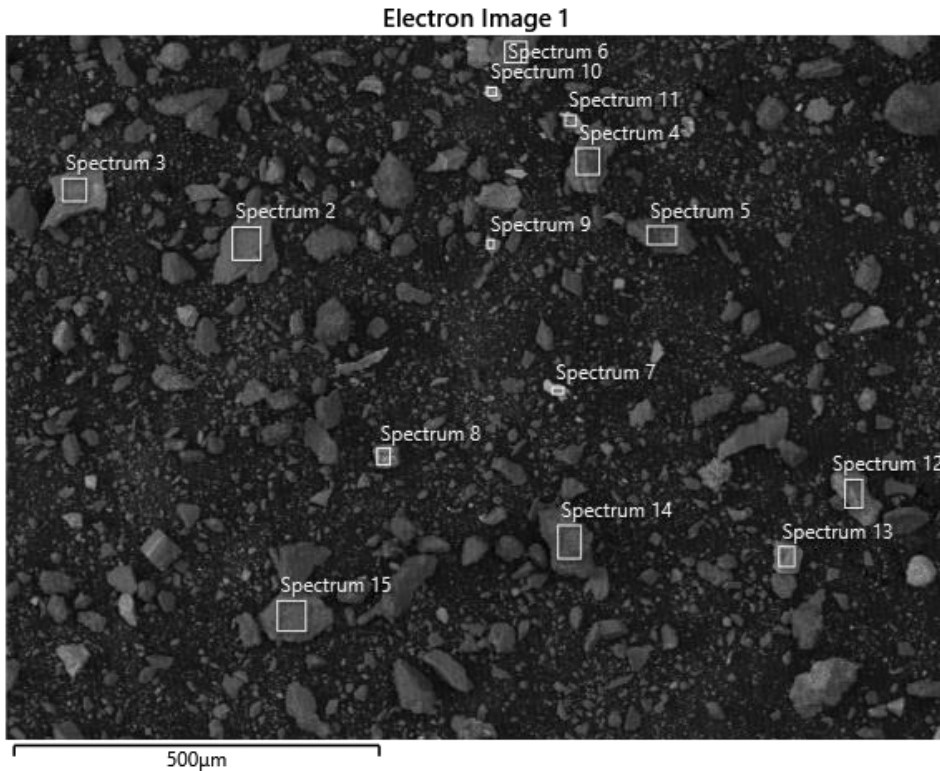


Imagen 1. Espectros emitidos por MEB para AMNM

En las imágenes 3 a 16 se muestran los porcentajes en masa de los elementos detectados en cada espectro

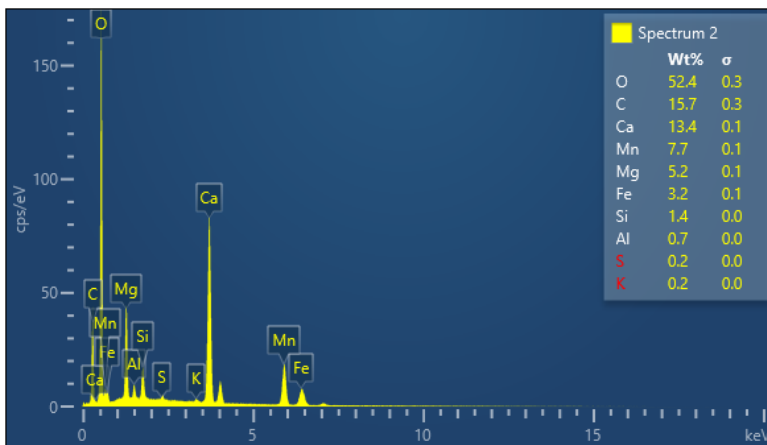


imagen 2. Espectro 2 emitido por MEB para AMNM

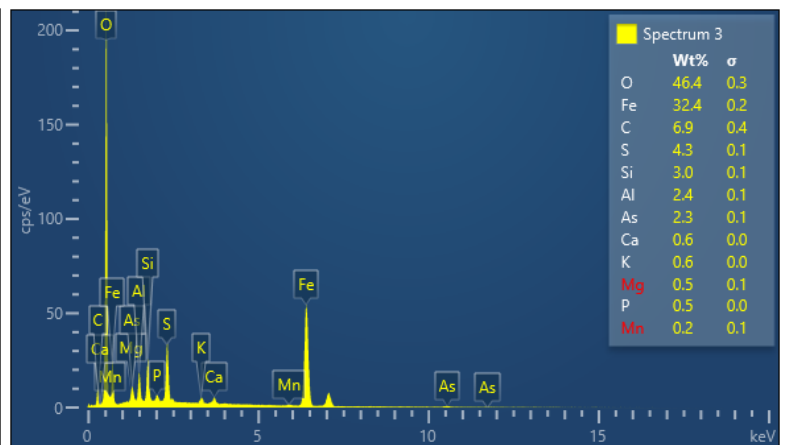


imagen 3. Espectro 3 emitido por MEB para AMNM

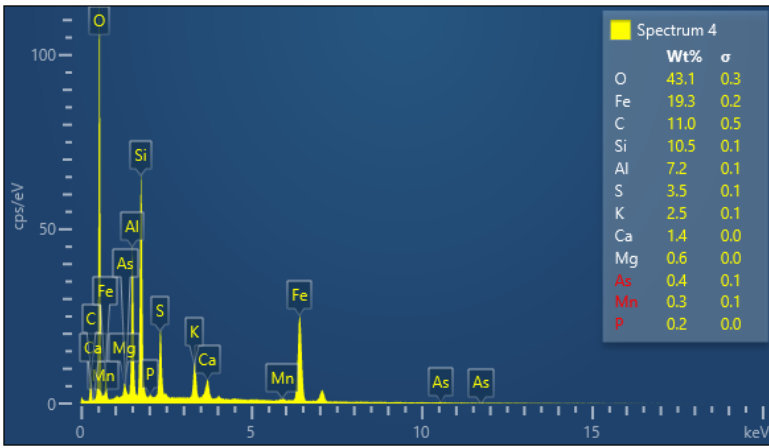


Imagen 5. Espectro 4 emitido por MEB para AMNM

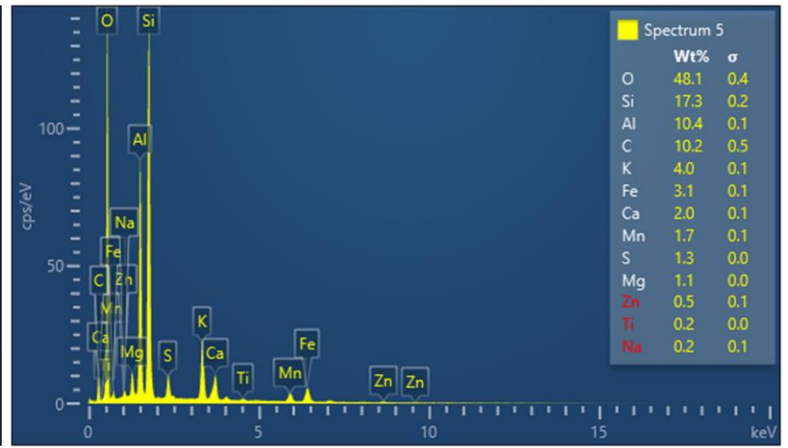


Imagen 4. Espectro 5 emitido por MEB para AMNM

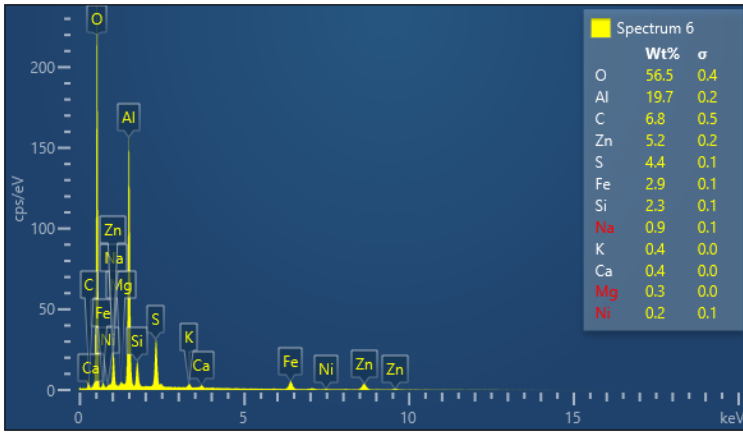


imagen 6. Espectro 6 emitido por MEB para AMNM

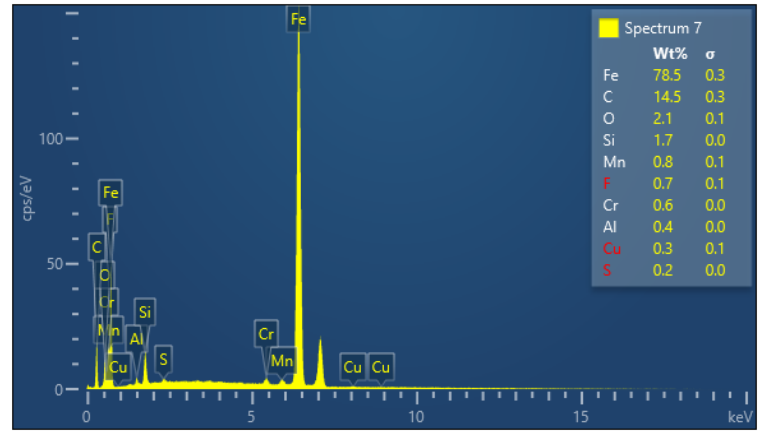


imagen 7. Espectro 7 emitido por MEB para AMNM

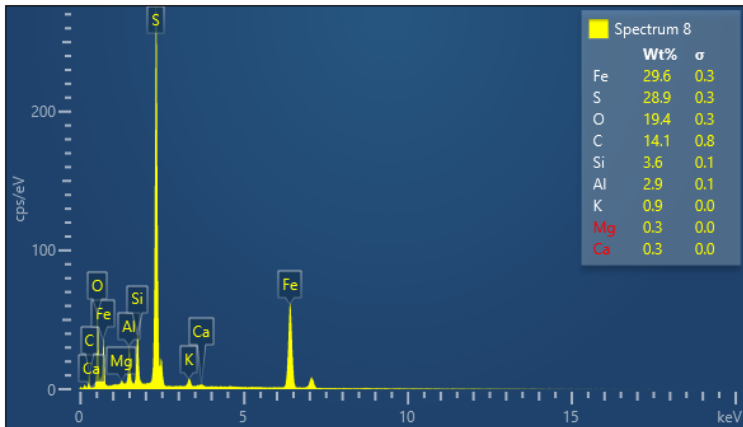


imagen 8. Espectro 8 emitido por MEB para AMNM

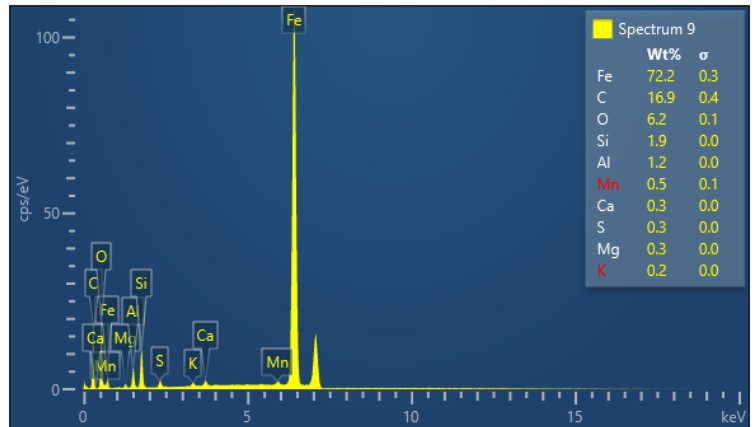


imagen 9. Espectro 9 emitido por MEB para AMNM

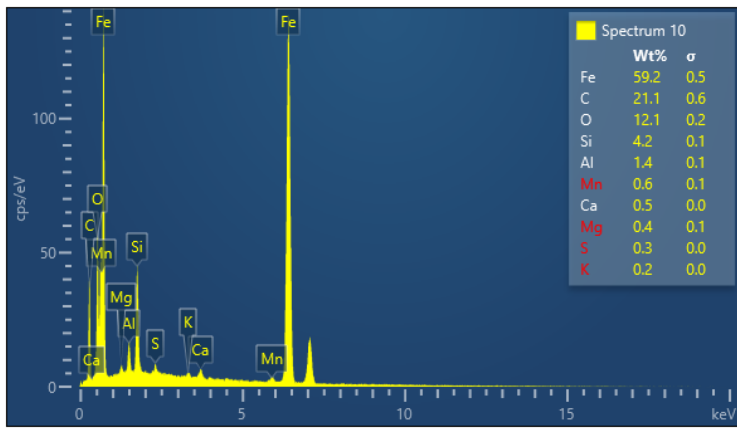


imagen 10. Espectro 10 emitido por MEB para AMNM

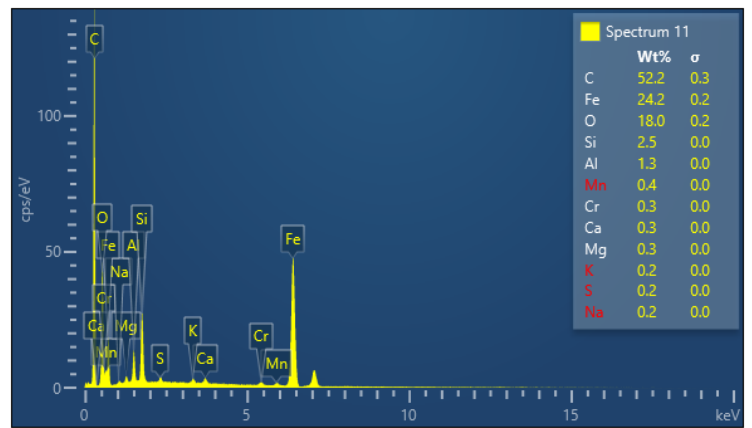


imagen 11. Espectro 11 emitido por MEB para AMNM

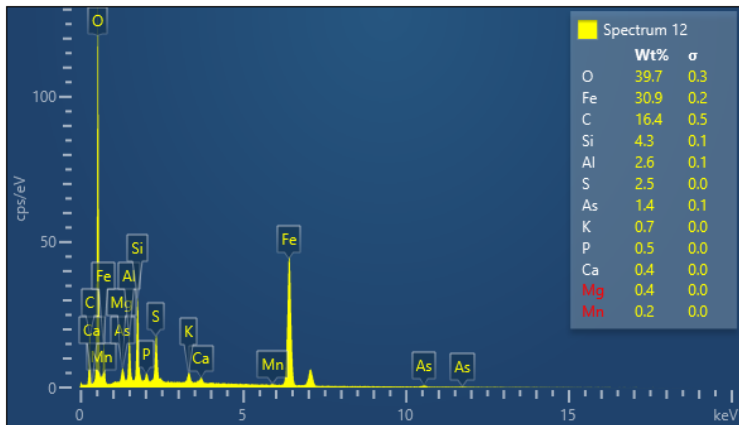


imagen 13. Espectro 12 emitido por MEB para AMNM

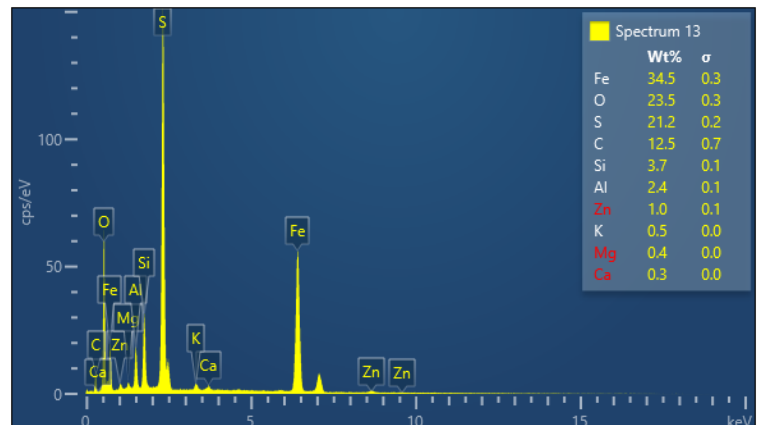


imagen 12. Espectro 13 emitido por MEB para AMNM

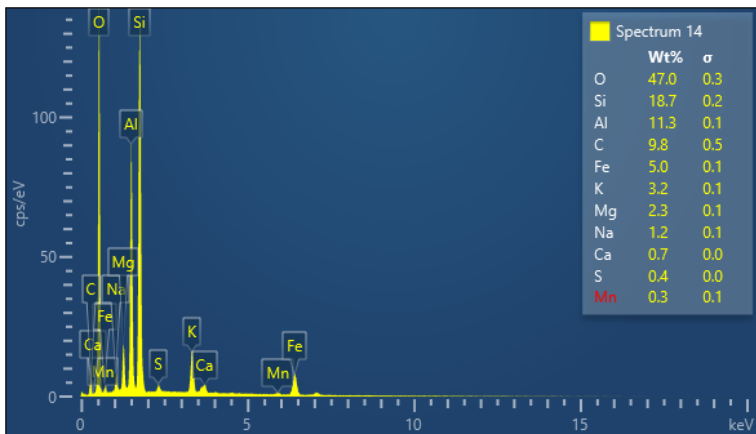


imagen 14. Espectro 14 emitido por MEB para AMNM

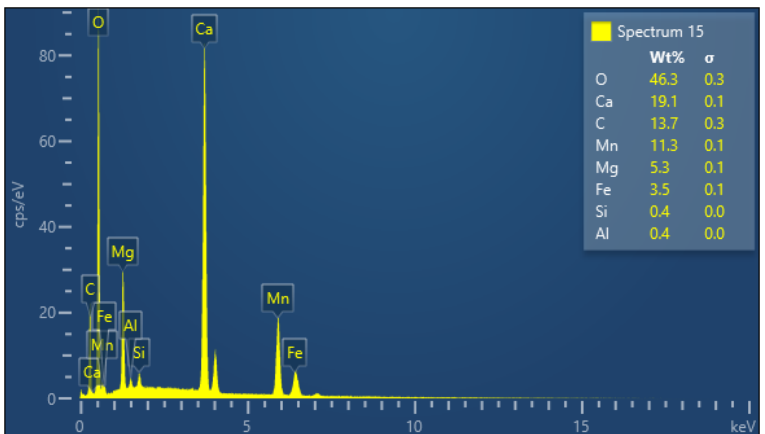


imagen 15. Espectro 15 emitido por MEB para AMNM

El análisis indica la presencia de metales alcalinos, alcalinotérreos, metales de transición, metaloides y no metales.

La tabla 9 y 10 muestran el porcentaje en masa de los elementos identificados en cada espectro por MEB. En algunos espectros emitidos no se identificó (NI) la presencia de algunos elementos, esto se debe a la morfología del AMNM.

Tabla 9. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNM

Espectro	Na	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Al	Cr	Zn	Ti
2	NI	0.2	5.2	13.4	7.7	3.2	0.7	NI	NI	NI
3	NI	0.6	0.5	0.6	0.2	32.4	2.4	NI	NI	NI
4	NI	2.5	0.6	1.4	0.3	19.3	7.2	NI	NI	NI
5	0.2	4	1.1	2	1.7	3.1	10.4	NI	0.5	0.2
6	0.9	0.4	0.3	0.4	NI	2.9	19.7	NI	5.2	NI
7	NI	NI	NI	NI	0.8	78.5	0.4	0.6	NI	NI
8	NI	0.9	0.3	0.3	NI	29.6	2.9	NI	NI	NI
9	NI	0.2	0.3	0.3	0.5	72.2	1.2	NI	NI	NI
10	NI	0.2	0.4	0.5	0.6	59.2	1.4	NI	NI	NI
11	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	24.2	1.3	0.3	NI	NI
12	NI	0.7	0.4	0.4	0.2	30.9	2.6	NI	NI	NI
13	NI	0.5	0.4	0.3	NI	34.5	2.4	NI	1	NI
14	1.2	3.2	2.3	0.7	0.3	5	11.3	NI	NI	NI
15	NI	NI	5.3	19.1	11.3	3.5	0.4	NI	NI	NI

Tabla 10. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNM

Espectro	Cu	As	Si	O	C	S	P	F	Ni
2	NI	NI	1.4	52.4	15.7	0.2	NI	NI	NI
3	NI	2.3	3	46.4	6.9	4.3	0.5	NI	NI
4	NI	0.4	10.5	43.1	11	3.5	0.2	NI	NI
5	NI	NI	17.3	48.1	10.2	1.3	NI	NI	NI
6	NI	NI	2.3	56.5	6.8	4.4	NI	NI	0.2
7	0.3	NI	1.7	2.1	14.5	0.2	NI	0.7	NI
8	NI	NI	3.6	19.4	14.1	28.9	NI	NI	NI
9	NI	NI	1.9	6.2	16.9	0.3	NI	NI	NI
10	NI	NI	4.2	12.1	21.1	0.3	NI	NI	NI
11	NI	NI	2.5	18	52.2	0.2	NI	NI	NI
12	NI	1.4	4.3	39.7	16.4	2.5	0.5	NI	NI
13	NI	NI	3.7	23.5	12.5	21.2	NI	NI	NI
14	NI	NI	18.7	47	9.8	0.4	NI	NI	NI
15	NI	NI	0.4	46.3	13.7	NI	NI	NI	NI

En la tabla 11, se muestra el porcentaje en masa total de cada elemento identificado en todos los espectros.

Tabla 11. Porcentaje promedio en masa de elementos identificados por MEB para AMNM

<i>Elemento</i>	<i>% masa total</i>
<i>Oxígeno</i>	32.91
<i>Hierro</i>	28.46
<i>Carbono</i>	15.84
<i>Silicio</i>	5.39
<i>Azufre</i>	5.21
<i>Aluminio</i>	4.59
<i>Calcio</i>	3.05
<i>Zinc</i>	2.23
<i>Manganeso</i>	2.18
<i>Arsénico</i>	1.37
<i>Magnesio</i>	1.34
<i>Potasio</i>	1.13
<i>Flúor</i>	0.70
<i>Sodio</i>	0.63
<i>Cromo</i>	0.45
<i>Fósforo</i>	0.40
<i>Cobre</i>	0.30
<i>Níquel</i>	0.20
<i>Titanio</i>	0.20

De acuerdo con los resultados obtenidos por MEB los espectros emitidos muestran la caracterización superficial del AMNM. Se analizaron puntos específicos de la superficie del material y se evidencia la presencia de oxígeno, hierro, carbono y silicio, estos elementos se consideran de primer orden y aportan cerca del 90% de la litósfera.

Para este análisis se identificaron del espectro 59-70 a una distancia de 500 μm (imagen 16).

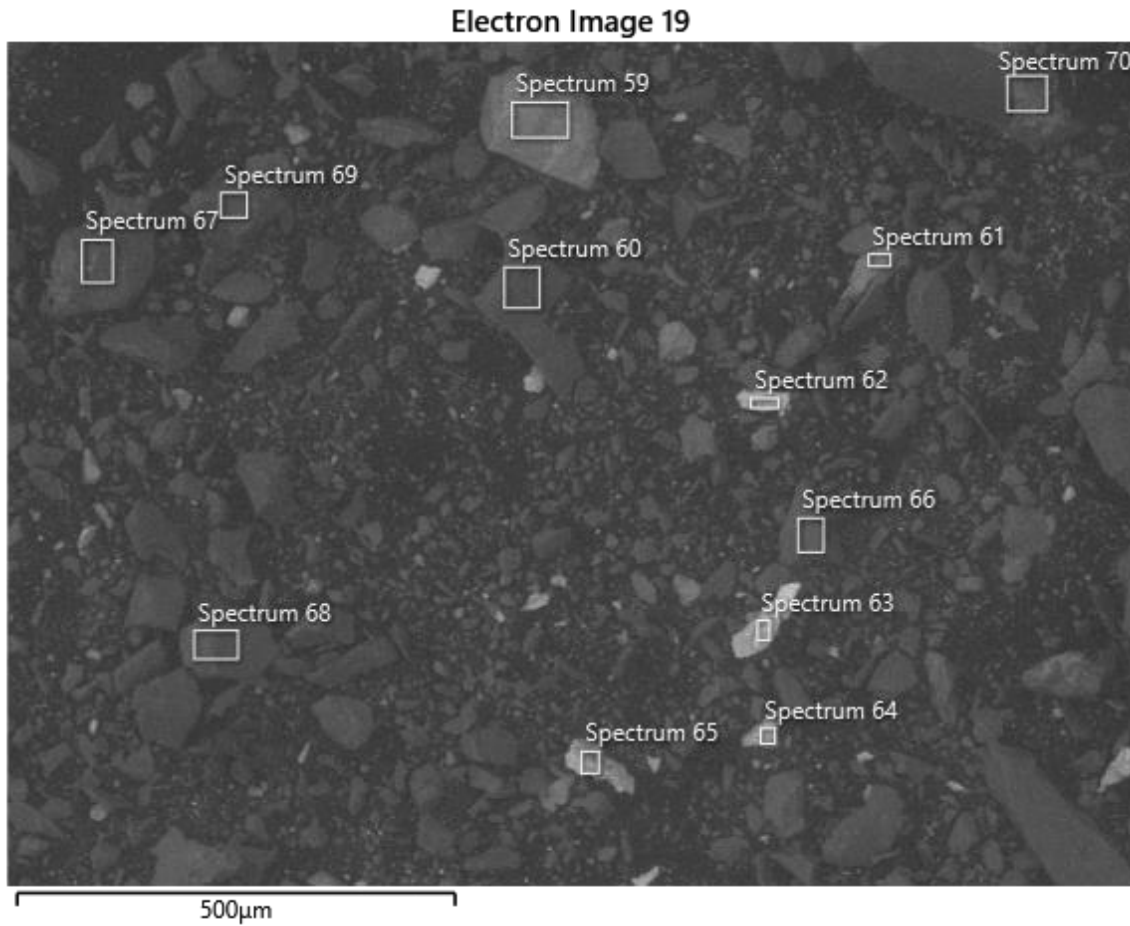


imagen 16. Espectros emitidos por MEB para AMNZ

En las imágenes 18 a 28, se muestran los porcentajes en masa de los elementos detectados en cada espectro:

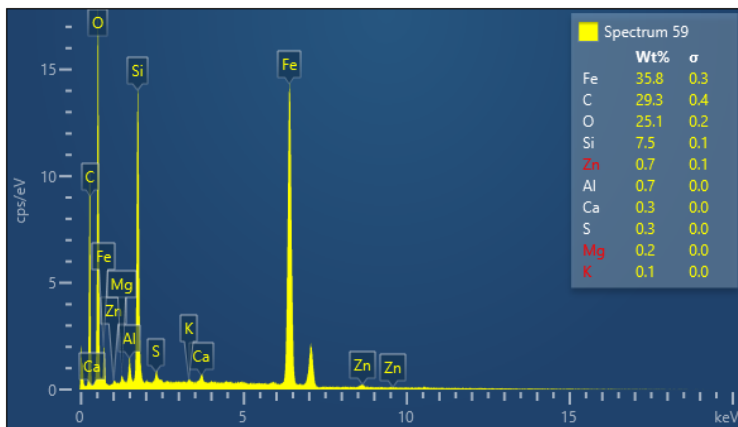


imagen 17. Espectro 59 emitido por MEB para AMNZ.

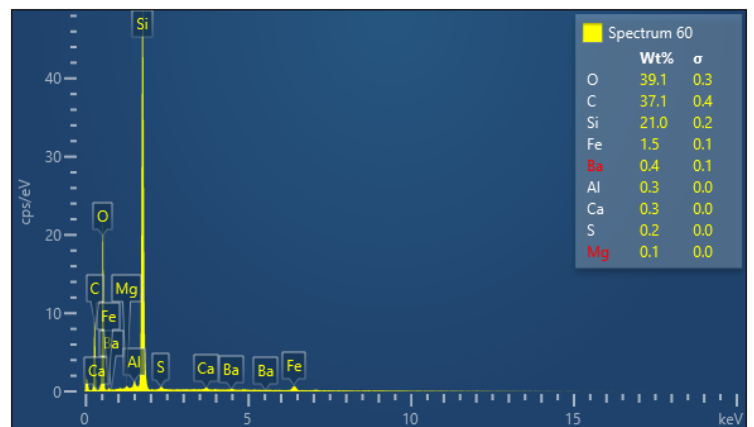


imagen 18. Espectro 60 emitido por MEB para AMNZ

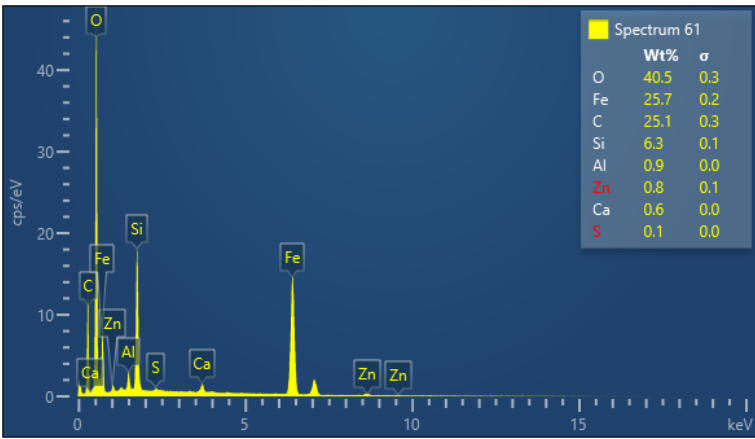


imagen 19. Espectro 61 emitido por MEB para AMNZ

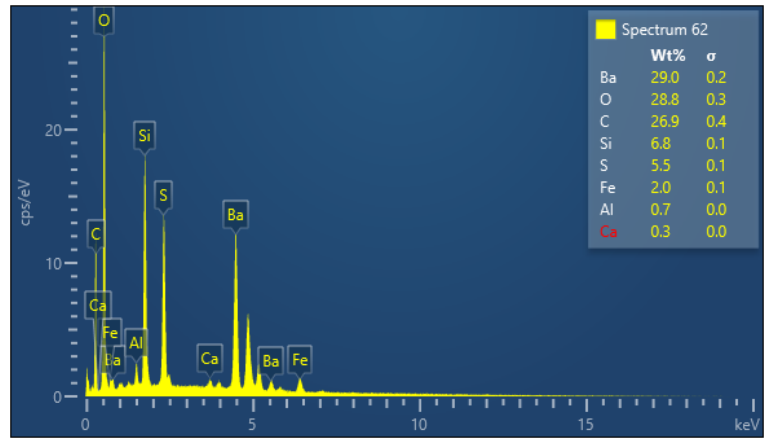


imagen 20. Espectro 62 emitido por MEB para AMNZ

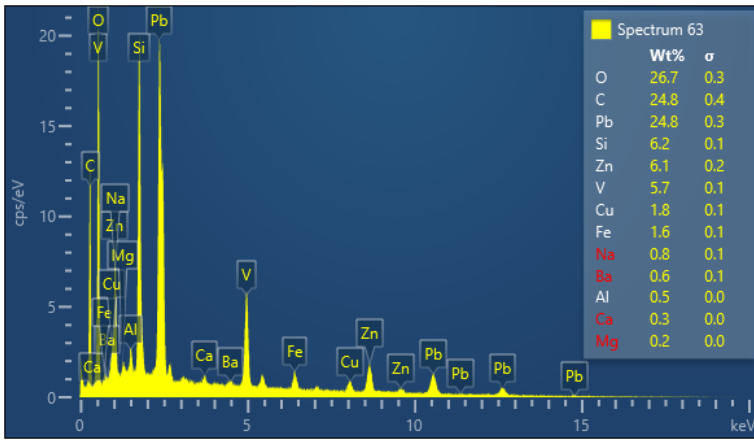


imagen 22. Espectro 63 emitido por MEB para AMNZ

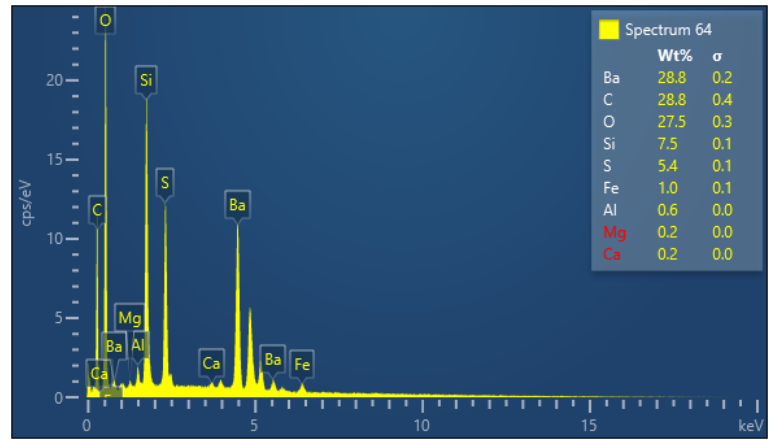


imagen 21. Espectro 64 emitido por MEB para AMNZ

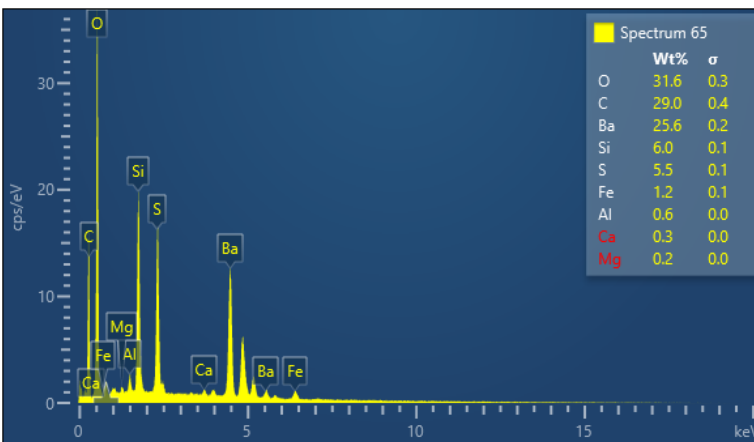


imagen 23. Espectro 65 emitido por MEB para AMNZ

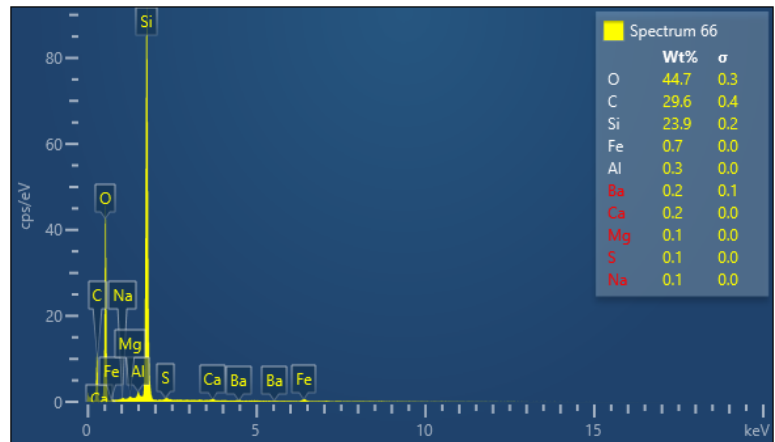


imagen 24. Espectro 66 emitido por MEB para AMNZ

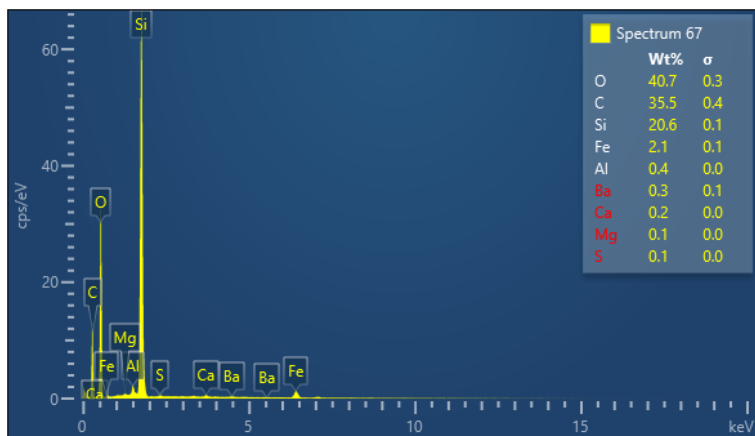


imagen 25. Espectro 67 emitido por MEB para AMNZ

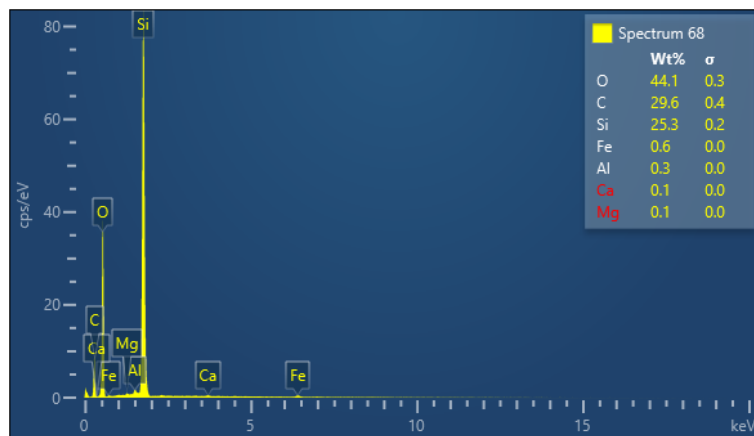


imagen 26. Espectro 68 emitido por MEB para AMNZ

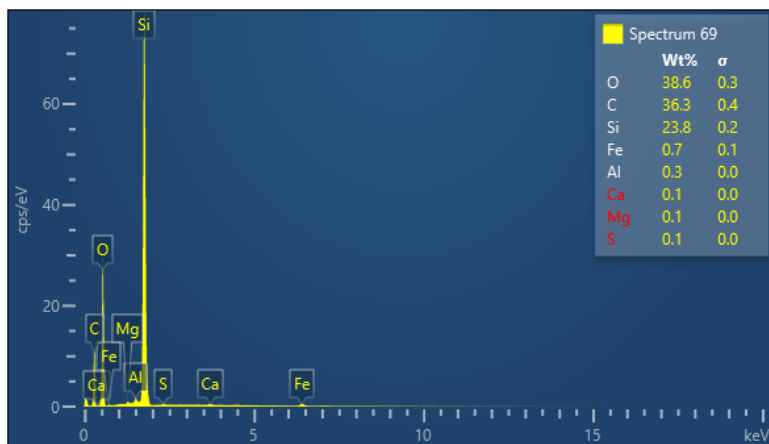


imagen 28. Espectro 69 emitido por MEB para AMNZ

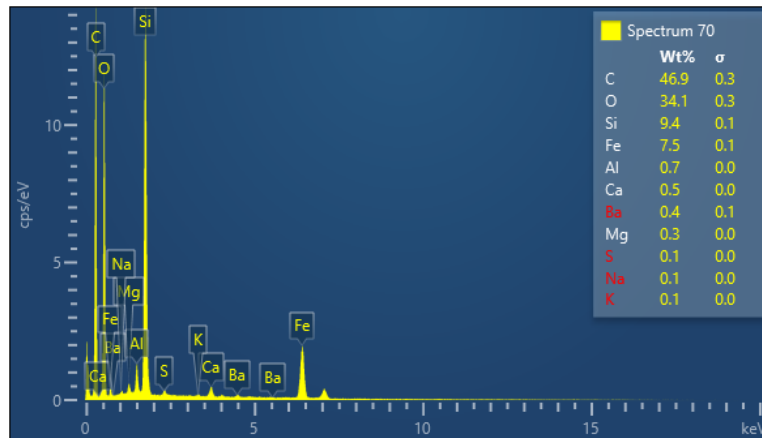


imagen 27. Espectro 70 emitido por MEB para AMNZ

La tabla 12 y 13 muestran el porcentaje en masa de los elementos identificados en cada espectro por MEB. En algunos espectros emitidos no se identificó (NI) la presencia de algunos elementos, esto se debe a la morfología del AMNZ.

Tabla 12. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNZ

Espectro	O	Fe	C	Si	Zn	Al	Ca	S	Mg
59	25.1	35.8	29.3	7.5	0.7	0.7	0.3	0.3	0.2
60	39.1	1.5	37.1	21	NI	0.3	0.3	0.2	0.1
61	40.5	25.7	25.1	6.3	0.8	0.9	0.6	0.1	NI
62	28.8	2	26.9	6.8	NI	0.7	0.3	5.5	NI
63	26.7	1.6	24.8	6.2	6.1	0.5	0.3	NI	0.2
64	27.5	1	28.8	7.5	NI	0.6	0.2	5.4	0.2
65	31.6	1.2	29	6	NI	0.6	0.3	5.5	0.2
66	44.7	0.7	29.6	23.9	NI	0.3	0.2	0.1	0.1
67	40.7	2.1	35.5	20.6	NI	0.4	0.2	0.1	0.1
68	44.1	0.6	29.6	25.3	NI	0.3	0.1		0.1
69	38.6	0.7	36.3	23.8	NI	0.3	0.1	0.1	0.1
70	34.1	7.5	46.9	9.4	NI	0.7	0.5	0.1	0.3

Tabla 13. Porcentaje en masa de elementos identificados por MEB para AMNZ

Espectro	K	Ba	Pb	V	Cu	Na
59	0.1	NI	NI	NI	NI	NI
60	NI	0.4	NI	NI	NI	NI
61	NI	NI	NI	NI	NI	NI
62	NI	29	NI	NI	NI	NI
63	NI	0.6	24.8	5.7	1.8	0.8
64	NI	28.8	NI	NI	NI	NI
65	NI	25.6	NI	NI	NI	NI
66	NI	0.2	NI	NI	NI	0.1
67	NI	0.3	NI	NI	NI	NI
68	NI	NI	NI	NI	NI	NI
69	NI	NI	NI	NI	NI	NI
70	0.1	0.4	NI	NI	NI	0.1

NI: No Identificado

En la tabla 14 se muestran los resultados del porcentaje promedio en masa para todos los espectros, estos indican la presencia de oxígeno, carbono, plomo y silicio. En el AMNZ solo se detectaron 15 elementos y en el AMNM se detectaron 19 elementos. La detección de los elementos en los AMN varía de acuerdo a su morfología y lugar de extracción, además cabe mencionar que en las minas ubicadas en Zacatecas se extrae principalmente Ag, Pb, Zn y Au.

Las diferencias entre ambos AMN son: el AMNZ tiene una mayor concentración de plata y plomo ya que en las minas ubicadas en Zacatecas es lo que principalmente se extrae; el AMNM es un material que presentó en abundancia hierro, cobre y plomo ya que según la información mineralógica de las minas en Michoacán hay presencia de galena (PbS), cuarzo (SiO₂), pirita (FeS₂), sulfosales de plata (Ag₂S).

Tabla 14. Porcentaje promedio en masa de elementos identificados por MEB para AMNZ

Elemento	% masa
<i>Oxígeno</i>	35.13
<i>Carbono</i>	31.58
<i>Plomo</i>	24.80
<i>Silicio</i>	13.69
<i>Bario</i>	10.66
<i>Hierro</i>	6.70
<i>Vanadio</i>	5.70
<i>Zinc</i>	2.53
<i>Cobre</i>	1.80
<i>Azufre</i>	1.74
<i>Aluminio</i>	0.53
<i>Sodio</i>	0.45
<i>Calcio</i>	0.30
<i>Magnesio</i>	0.16
<i>Potasio</i>	0.10

5.3. CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL LOTE DE AGUA DEL EFLUENTE DEL SHADE

Como en cualquier otro tratamiento de aguas residuales, en una muestra simple se determinó la DQO para cuantificar la MO, fosfato, nitrato, CT, CF, pH y temperatura. La caracterización nos permite conocer la calidad del efluente de tratamiento biológico proveniente del SHADE que se usará para filtración y curvas de calibración se encuentran en el anexo II.

5.3.1. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

En la tabla 15, se presentan los resultados de la cuantificación de la materia orgánica en mgO₂/ L del efluente del SHADE.

Tabla 15. Cuantificación de materia orgánica

Muestra	Absorbancia promedio	$\pm \sigma$	mg O ₂ /L	$\pm \sigma$
Efluente del SHADE	0.035	0.003	149	7.09

Se realizó la medición por triplicado (n=3) del efluente del SHADE obteniendo una DQO promedio de 149 mgO₂/L, estos valores corresponden a DQO de intervalo bajo que va de 10-170 mgO₂/L.

5.3.2. FOSFATOS

Se cuantificó la concentración de fosfatos por triplicado (n=3) en el efluente del SHADE obteniendo los resultados mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Cuantificación de fosfatos

Muestra	Absorbancia	mg/L	$\pm \sigma$
Efluente SHADE	0.124	3	0.001

La concentración de fosfatos como fósforo total según lo que reporta (NOM-001-SEMARNAT-2021, 2021) se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles con 3mg/L. De acuerdo con (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014) la concentración de fósforo total en el efluente del STHA corresponde a 1.44 mg/L.

5.3.3. NITRATOS

Se determinó la concentración de nitratos en mg/L del efluente del SHADE por triplicado (n=3) obteniendo los siguientes resultados (tabla 17).

Tabla 17. Cuantificación de nitratos

Muestra	Absorbancia	mg/L	$\pm \sigma$
Efluente SHADE	0.444	2	0.007

La concentración de nitratos es menor reportada con los resultados de (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2014), donde la concentración de nitratos en el Lago del Bosque de San Juan de Aragón corresponde a un promedio de 24 mg/L.

5.3.4. COLIFORMES TOTALES Y FECALES

Se cuantificó la concentración de CT y CF de la entrada y salida del SHADE en UFC/mL. Sin embargo, para efectos de esta tesis se realizó el cambio de unidades a UFC/100mL. Estos resultados se obtuvieron en colaboración con la pasante de QFB (Apátiga Hermoso Jakeline) y se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Cuantificación de CT y CF

	Entrada [UFC/100mL]	Salida [UFC/100mL]
Coliformes totales	2.7 x 10 ⁴	2.2 x 10 ⁴
Coliformes fecales	0	0

Los resultados de CT en la salida del SHADE indican que el sistema no está operando de forma correcta ya que la cantidad de microorganismos del efluente permaneció en el mismo orden de magnitud, esto se atribuye a la falta de recirculación y tiempo de operación de las bombas en el SHADE. Asimismo, no hay presencia de CF a la entrada ni a la salida de agua.

5.3.5. POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y TEMPERATURA

Se determinó el pH y temperatura por triplicado mediante el uso del multiparámetro de la marca Thermo ELECTRON CORPORATION. Se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 19).

Tabla 19. Medición de pH y temperatura

Muestra	pH promedio	±σ	Temperatura promedio [°C]	±σ
Efluente SHADE	8.26	0.04	22.8	0.7

Estos parámetros se midieron en el laboratorio antes del almacenamiento y conservación del lote de agua.

5.4. PORCENTAJE DE ELIMINACIÓN DE *Escherichia coli* EN COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS CON AMN.

Para la elaboración de este ensayo se empleó el agua procedente del efluente del humedal artificial ubicado en el Bosque de San Juan de Aragón, la cual presentó una concentración de materia orgánica en términos de DQO entre 140 y 165 mgO₂/L. El lote de agua previamente esterilizado, fue inoculado con *E. coli* para obtener una concentración de 40,000 unidades formadoras de colonias en 100 mL (4X10⁴ UFC/100mL) de agua a tratar, la cual es una concentración relativamente alta para un efluente procedente de plantas de tratamiento biológico.

Se realizó la cuenta de UFC a la entrada (control a tiempo cero) y a la salida de las columnas experimentales empacadas (desinfección después de 4 horas). Se efectuó la cuenta para tanto el AMN de la mina de Michoacán, como para el de la mina de Zacatecas, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 20 a 23 para las diferentes columnas.

Tabla 20. Eliminación de *E. coli* Columna 1

Agregado Mineral Michoacán n=3	
Columna 1	
Control [UFC/100mL] t=0	Después de desinfección [UFC/100mL] t=4h
49000	32000
41000	44000
50000	39000
Promedio	
46666	38333
± σ	
4932.8	6027.7
% eliminación	18

Tabla 21. Eliminación de *E. coli* Columna 2

Agregado Mineral Michoacán n=3	
Columna 2	
Control [UFC/100mL] t=0	Después de desinfección [UFC/100mL] t=4h
46000	33000
55000	44000
44000	36000
Promedio	
48333	37667
± σ	
5859.5	5686.2
% eliminación	22

Tabla 22. Eliminación de *E. coli* Columna 1

Agregado Mineral Zacatecas n=3	
Columna 1	
Control [UFC/100mL] t=0	Después de desinfección [UFC/100mL] t=4h
70000	20000
82000	18000
49000	17000
Promedio	
67000.0	18333
± σ	
16703.3	1527.5
% eliminación	73

Tabla 23. Eliminación de *E. coli* Columna 2

Agregado Mineral Zacatecas n=3	
Columna 2	
Control [UFC/100mL] t=0	Después de desinfección [UFC/100mL] t=4h
32000	11000
43000	13000
49000	12000
Promedio	
41333	12000
± σ	
8621.7	1000.0
% eliminación	71

En la tabla 20 y 21 se obtuvieron los porcentajes de eliminación de *E. coli* en contacto con AMNM. De manera más específica se obtuvo un 18% (8×10^3 UFC/100mL) de eliminación en la columna 1 y 22% (10.5×10^3 UFC/100mL) en la columna 2, respectivamente.

Para el AMNZ se obtuvo un porcentaje de eliminación de 73% (48.6×10^3 UFC/100mL ó 4.86×10^4 UFC/100mL) en la columna 1 y 71% (29×10^3 UFC/100mL ó 2.9×10^4 UFC/100mL) en la columna 2 (tabla 22 a 23). Es decir, el AMNZ (removió en el orden de 10^4) logró remover una unidad logarítmica más que el AMNM (removió en el orden de 10^3). Lo anterior, implica que su uso es recomendable para tratar aguas que contengan como concentración inicial de bacterias ese orden de magnitud de 10^4 , en el caso de filtros de arena y grava implementados en sistemas de lodos activados convencionales

en buenas condiciones de operación y 10^3 , en el caso de humedales artificiales operados de manera correcta.

La diferencia del porcentaje o concentración de bacterias eliminadas de AMNZ sobre AMNM se atribuye a que en su composición mineralógica presentó una concentración mayor de plata y de acuerdo a las características físicas (densidad real, densidad aparente y porosidad) corresponde a un suelo de tipo mineral de forma que el AMNZ es el que mejores resultados brindó.

5.4.1. DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE COLUMNAS EXPERIMENTALES EMPACADAS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES ÚTILES PARA EL DISEÑO DE LA PPFD.

La recopilación de datos útiles para el diseño de la PPFD se desglosa a continuación:

- I) Filtro de flujo descendente
- II) Operación semicontinua
- III) Filtración por gravedad
- IV) Tres lechos u horizontes de AMN de diferente tamaño (5,10,15mm)
- V) Tiempo de contacto de 4 horas para la desinfección total o parcial de *E. coli* a una concentración inicial de 10^4 UFC/100mL
- VI) Densidad real de 2.4 a 2.7g/cm³
- VII) Densidad aparente de 1.1 a 1.3 g/cm³
- VIII) Porosidad de 51 a 59%
- IX) Parámetros iniciales para caracterización del agua de entrada:
Coliformes totales, coliformes fecales, Demanda Química de Oxígeno, nitratos, fosfatos, potencial de hidrógeno y temperatura.

6. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron datos experimentales útiles para el diseño de una PPFD mediante el uso de columnas a escala laboratorio empacadas con AMNM y AMNZ que permitieron la reducción de *E. coli* inoculada en concentraciones de 4.8×10^4 UFC/100mL y 6.7×10^4 UFC/100mL, respectivamente, en el efluente previamente esterilizado del SHADE ubicado en el Bosque de San Juan de Aragón.
- Se determinaron las dimensiones y datos de diseño de las columnas experimentales empacadas con AMN que brindaron datos útiles para el diseño de una PPFD que emplea AMN para el tratamiento de una muestra del efluente del SHADE. De manera más específica, las dimensiones fueron: altura (90cm); diámetro de las columnas (5.08cm) tamaños de partícula (5, 10 y 15mm). Los datos de diseño son: flujo descendente; operación por lote; filtración por gravedad; tamaño de partícula de 5mm, 10mm y 15mm; acomodo de los lechos A=15mm en la parte superior de la columna, B=10mm en la parte intermedia de la columna y C=5mm en la parte inferior de la columna.
- Se determinaron las principales características físicas del AMN procedente de una mina del Estado de Michoacán (AMNM) y otra del Estado de Zacatecas (AMNZ), midiendo la densidad real (2.6 a 2.7 g/cm³), densidad aparente (1.1 a 1.3 g/cm³) correspondiente a un suelo mineral. Se determinó la composición mineralógica de ambos AMN mediante las técnicas de espectroscopia atómica y microscopía electrónica de barrido. El AMNM presentó en su composición cantidades importantes de hierro y cobre, mientras que el AMNZ hierro y plata, lo que muy probablemente repercutió en que este último lograra mayor porcentaje de eliminación de bacterias.
- El efecto desinfectante de las columnas experimentales empacadas con AMN, se evaluó mediante el porcentaje de eliminación de *Escherichia coli* cepa ATCC 11229, inoculada al efluente estéril del SHADE, logrando después de 4 horas de contacto, el 22% de remoción equivalente a (10.5×10^3 UFC/100mL) para el AMNM y de 73% equivalente a (4.86×10^4 UFC/100mL) para el AMNZ.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, P., Maya, C., Orta, T., & Luna Pabello, V. M. (2006). Disinfection of sludge with high pathogenic content using silver and other compounds. *Water Science & technology*, 54, 179-187. Retrieved julio 8, 2022
- American Public Health Association, A. W. (2017). 4500-P C. Vanadomolybdophosphoric acid colorimetric method. In *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Vol. 23, pp. 4-161 - 4-162). Washington D.C: Eugene W. Rice, APHA. Retrieved agosto 25, 2022
- Apátiga Hermoso, J. L. (2023 (en proceso)). *Evaluación del efecto desinfectante de un agregado mineral natural sobre Escherichia coli cepa ATCC11229 en presencia de materia orgánica*. Tesis de licenciatura en proceso, Ciudad de México. Retrieved agosto 2, 2023
- APHA. (1998a). Vanadomolybdophosphoric Acid Colorimetric Method. In APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (vigésima ed., pp. 4-144). Washington DC, Estados Unidos de América: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Retrieved 1 25, 2023
- APHA. (1998b). Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method. In APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (vigésima ed., pp. 4-115). Washington DC, Estados Unidos de América: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Retrieved 7 25, 2023
- APHA. (2017a). 9215 C. Spread Plate Method. In APHA, *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (vigésima tercera ed., pp. 9-41). Washington, DC, Estados Unidos de América: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Retrieved 1 15, 2023
- APHA. (2017b). 5220-D Closed Reflux, Colorimetric Method. In APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (vigésima tercera ed., pp. 5-21). Washington DC, Estados Unidos de América: American Public Health

Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.
Retrieved 1 25, 2023

Avila Bareño, I. R., & Moreno Figueroa, M. A. (2016). *Diseño, propuesta e implementación de un filtro para tratamiento de agua de uso doméstico en tanques de reserva en la población del casco urbano de la inspección de San Antonio de Anapoima*. Anteproyecto seminario, Bogota. Retrieved agosto 8, 2022, from file:///E:/FQUIM/TITULACI%C3%93N/bibliograf%C3%ADa/ANTEPROYECTO%20SEMINARIO%20FILTRO%20ARENA%20ULTIMA%20%20ENTREGA%20JUNIO%202011.pdf

Cabrera Molina, E., Hernández Garciadiego, L., Gómez Ruíz , H., & Cañizares Macías , M. (2003, enero-marzo). Determinación de nitratos y nitritos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. *Revista de la Sociedad Química de México*, 47(1), 88-92. Retrieved 11 25, 2022, from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932003000100014&lng=es&nrm=iso

Calderon Esquivel, A. Y., & Esteban Condor, V. O. (2022). *Evaluación de la concentración de E. Coli y el tiempo de contacto con nanopartículas de ZnO en la desinfección de bacterias*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo Perú. Retrieved agosto 7, 2023, from https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8331/T010_74460291_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Carretero León , I., & Pozo Rodriguez, M. (2008). *Minerología aplicada salud y medio ambiente*. Madrid España: Thomson.

Castro, E. R. (2000). *Principios básicos de espectroscopía*. Ciudad de México, México: UACH. Retrieved junio 12, 2023, from https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/ARCHIVOS/2%20LLAMADOS%20FINALIZADOS/2011/REF%2022_2011%20TECNICO%20LABORATORIO%20LUBRICANTES/MATERIAL%20DE%20ESTUDIO/ESPECTROMETRIA.PDF

Chipile, D. I. (2017). *Carbón activado granular, en la mejora de la calidad del agua potable*. Universidad Privada del Norte. Cajamarca Perú: Universidad privada del norte. Retrieved agosto 30, 2023, from <https://hdl.handle.net/11537/12672>

Collection, A. T. (2023). *American Type Culture Collection products*. Retrieved agosto 31, 2023, from [atcc.org: https://www.atcc.org/products/11229](https://www.atcc.org/products/11229)

Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. (2007 ed.). (S. d. Naturales, Ed.) México, Distrito Federal, México. Retrieved agosto 29, 2023, from https://www.academia.edu/41171397/Comisi%C3%B3n_Nacional_del_Agua_MANUAL_DE_AGUA_POTABLE_ALCANTARILLADO_Y_SANEAMIENTO_DISEÑO_DE_PLANTAS_POTABILIZADORAS_TIPO_DE_TECNOLOGÍA_SIMP

CONAGUA. (2022). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México. Retrieved julio 1, 2022

Condalab. (2019, mayo 13). <https://www.condalab.com>. Retrieved from https://www.condalab.com/int/en/index.php?controller=attachment&id_attachment=8270

Condalab. (2019, mayo 21). <https://www.condalab.com>. Retrieved from https://www.condalab.com/int/en/index.php?controller=attachment&id_attachment=8248

Davies, R., & Etris, S. (1997). *Catalysis Today, The development and functions of silver in water purification and disease control* (Vol. 36). Washinton DC: Elsevier.

Delgadillo, O., Camacho, A., F. Pérez, L., & Andrade, M. (2020, enero 3). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Retrieved from [core.ac.uk: https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf](https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf)

DEPARTAMENTO DE AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. (2019). *aulavirtual.agro*. Retrieved 06 06, 2023, from

https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42969/mod_resource/content/1/POROSIDAD%20Y%20AIREACION%2026-3-19.pdf

Diario Oficial de la Federación. (2020, diciembre 17). *NOM-127-SSA1-2017*. Retrieved from [dof.com: http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/8040/salud11_C/salud11_C.html](http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/8040/salud11_C/salud11_C.html)

Díaz Soria, P. L. (2021, enero). Efecto bactericida de nanopartículas de hierro, cobre, zinc y plata en el tratamiento y desinfección de aguas residuales. *Naturaleza y Tecnología*, 16. Retrieved agosto 7, 2023, from <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/6429>

Dirección General de Normas. (1980). *NMX-AA-003-1980*. México, D.F. Retrieved octubre 10, 2022, from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf>

Escobar, J. D. (2020). *Manual de Geología para Ingenieros*. Manizales: U.N de Colombia.

Ferrer, A.. (2003). Intoxicación por metales. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26(Supl. 1), 141-153. Recuperado en 30 de octubre de 2023, de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200008&lng=es&tlng=es.

Hernández Cruz, A. T., & Tautiva Villalobos, Y. A. (2020). *DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FILTRACIÓN (λ) GLOBAL, PARA 3 TIPOS DE LECHOS FILTRANTES UTILIZANDO LA TURBIEDAD INICIAL EN PTAP A NIVEL CUNDINAMARCA*. Tesis Licenciatura, UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, Programa de Ingeniería Civil, Bogotá. Retrieved octubre 26, 2023, from <file:///E:/FQUIM/TITULACION%20bibliograf%20ADa/Filtros%20informacion%20de%20apoyo%20PROYECTO%20DE%20INVESTIGACION%20-%20COEFICIENTE%20DE%20FILTRACION%20GLOBAL.pdf>

León Guerrero, E. M., & Mosqueda Gómez, J. L. (2014). Actividad antimicrobiana del cobre en un sistema dinámico de agua contra bacterias causantes de infecciones asociadas a la atención en salud. *Jovenes en la ciencia*, 464-469.

- Luna Pabello, V. M., & Aburto Castañeda, S. (2014, junio). *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 17(1), 33-35. Retrieved agosto 9, 2023, from <https://www.medigraphic.com/pdfs/revespciequibio/cqb-2014/cqb141c.pdf>
- Luna Pabello, V. M., & Aburto Castañeda, S. (2014, enero 13). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 37-51. doi:10.1016/S1405-888X(14)70318-3
- Magaña López , R. (2011, Junio 28). *Diseño y evaluación del funcionamiento de un filtro empacado con agregados minerales para la eliminación de huevos de helminto (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Retrieved julio 26, 2023, from [tesunam.dgb.unam.mx: https://tesunam.dgb.unam.mx/F/32C8JQ3N668DS7LVC744SLGDYLCQAAMU4KT7HKJPQF38M8KKRP-40101?func=full-set-set&set_number=456956&set_entry=000007&format=999](https://tesunam.dgb.unam.mx/F/32C8JQ3N668DS7LVC744SLGDYLCQAAMU4KT7HKJPQF38M8KKRP-40101?func=full-set-set&set_number=456956&set_entry=000007&format=999)
- Magaña Lopez, R. (2018). *Efecto de la plata, cobre, hierro y agregados minerales sobre huevos de helminto y su potencial uso en un sistema de filtración (doctor en ingeniería)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Retrieved julio 5, 2022, from https://tesunam.dgb.unam.mx/F/S135398Y34E7899L3LT1CJN92QR8QFES6G7X97N92X4N4LN5M6-00907?func=full-set-set&set_number=365360&set_entry=000009&format=999
- Magaña-López Rafael et al, .. V.-P.-G.-V. (2016, mayo). Effect of mineral aggregates on the morphology and viability of *Toxocara canis* eggs. *Ecological Engineering*, 90, 125-134. Retrieved agosto 30, 2023, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416300702>
- Mendoza Espinoza, L., & Stephenson, T. (1999). A Review of Biological Aerated Filters (BAFs) for Wastewater Treatment . *ENVIRONMENTAL ENGINEERING SCIENCE*, 216.

- Metcalf & Eddy. (2014). Operaciones de filtración. In Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (Vol. 1, pp. 1146-1150). McGraw-Hill Education. Retrieved 7 26, 2023
- Metcalf & Eddy. (2014). Operaciones de filtración continua. In Metcalf & Eddy, *WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT AND RESOURCE RECOVERY* (quinta ed., pp. 1147-1149). New York, NY, United States of America: McGraw-Hill Education. Retrieved 7 27, 2023
- Metcalf & Eddy. (2014). Procesos químicos unitarios; Tratamiento fisicoquímico independiente. In Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (quinta ed., pp. 478-479). New York, NY: McGraw-Hill Education. Retrieved 7 27, 2023
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (quinta ed., Vol. 1). (H. D. George Tchobanoglous, Ed.) New York, NY: McGraw-Hill Education. Retrieved 4 2023, 7
- Miranda Ríos, M. (2005). *Estudio y evaluación del poder germinicida de compuestos de plata en aguas residuales parcialmente tratadas (Tesis de maestría)*. Tesis maestría, Facultad de Química UNAM, Departamento de biología, CDMX. Retrieved 04 20, 2023
- Miranda Ríos, M., Luna Pabello, V. M., Orta de Velásquez , M., & Barrera Godínez, J. (2011). *Removal of Escherichia coli from biological effluents using natural and artificial mineral aggregates*. Artículo Científico, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México. Retrieved agosto 30, 2023, from <http://www.ircwash.org/sites/default/files/Miranda-Rios-2011-Removal.pdf>
- NMX-AA-008-SCFI-2016. (n.d.). *MEDICIÓN DEL pH EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS*. Ciudad de México. Retrieved 05 30, 2023, from <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>
- NOM-001-SEMARNAT-2021, D. G. (2021). *Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores*

propiedad de la nación. Ciudad de México. Retrieved 05 31, 2023, from https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gs.tab=0

NV, S., B, N., Prashant, H., BR, M., & BK, S. (2003). Determinación de nitrito por método de diazotización simple. *Microquímica*, 27-32. Retrieved from INFONA.

Pérez de la Cruz, F. J., & Urrea Mallebrera, M. A. (s.f). Abastecimiento de aguas Tema 8 Filtración. *Filtración*, 1-45. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena. Retrieved agosto 5, 2022, from https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6023/mod_resource/content/1/Tema_08_FILTRACION.pdf

quimica.es . (n.d.). *Antracita*. Retrieved 05 2023, 31, from QUIMICA.ES: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Antracita.html#:~:text=La%20antracita%20es%20el%20carb%C3%B3n,%20C8%20gr%2Fcm3>.

Rodriguez, M. P. (2019). EL PAPEL DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y GEOQUÍMICA EN EL ESTUDIO DE LAS CULTURAS ANTIGUAS: EJEMPLOS DE EXCAVACIONES ESPAÑOLAS EN ORIENTE. *UAM*, 93-106. Retrieved octubre 19, 2023, from <https://revistas.uam.es/isimu/article/download/isimu2019.22.004/11579/28805>

Secretaria de Gobernación SEGOB. (2021, 08 24). *NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Retrieved 8 22, 2023, from https://www.dof.gob.mx/https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gs.tab=0

Servicio Geológico Mexicano. (2006, 05 10). *FICHA DE INVENTARIO FÍSICO DE LOCALIDADES MINERAS MUNICIPIO ANGANGUEO, ESTADO MICHOACÁN*. Retrieved 04 27, 2023, from [mapserver.sgm.gob.mx:https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/A1607BUGJ0001_01.PDF](https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/A1607BUGJ0001_01.PDF)

Silva, J., Ramírez, L., Alfieri, A., Rivas, G., & Sánchez, M. (2004, enero). Determinación de microorganismos indicadores de calidad sanitaria. Coliformes totales, coliformes fecales y aerobios mesófilos en agua potable envasada y distribuida en San Diego, estado Carabobo, Venezuela. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 24(1-2). Retrieved noviembre 11, 2022, from http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1315-25562004000100008&script=sci_arttext

Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación . (2023, junio 19). *quimica.unam.mx*. Retrieved junio 19, 2023, from Espectroscopia Atómica: <https://quimica.unam.mx/investigacion/servicios-para-la-investigacion/usaii/espectroscopia-atmica/#:~:text=Es%20una%20t%C3%A9cnica%20capaz%20de,cer%C3%A1micos%2C%20minerales%20y%20material%20biol%C3%B3gico>.

Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación. (2023, junio 20). *USAII*. Retrieved junio 19, 2023, from Microscopía Electrónica de Barrido: <https://quimica.unam.mx/investigacion/servicios-para-la-investigacion/usaii/microscopia-electronica/>

Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Ciencia. (2023). *Resultados de servicio analítico EA*. Informe de análisis analítico, Ciudad de México. Retrieved 06 16, 2023, from <file:///E:/FQUIM/TITULACI%C3%93N/Resultados%20an%C3%A1lisis%20USAII/Resultados%20usaii%20AMNZ/EA/5670803497.pdf>

UNIDAD DE SERVICIOS DE APOYO A LA INVESTIGACIÓN Y A LA INDUSTRIA. (2023). *INFORME DE SERVICIO ANALÍTICO*. Informe de servicio analítico, UNAM, Ciudad de México. Retrieved 06 14, 2023

Villaseñor Ortiz, D. (2015). *Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo* (primera ed.). Machala, Ecuador: ediciones UTMACH. Retrieved 05 31, 2023, from

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/10690/1/FUNDAMENTOS%20Y%20PROCEDIMIENTOS.pdf>

Vullo, D. L. (2003, Octubre 30). MICROORGANISMOS Y METALES PESADOS: UNA INTERACCIÓN EN BENEFICIO DEL MEDIO. *Química Viva*, *II*(3), 1-10. Retrieved agosto 28, 2023

8. ANEXO I TÉCNICAS PARA DETERMINACIÓN DE CALIDAD DE AGUA DETERMINACIÓN DE MICROORGANISMOS.

Para la cuantificación de CF y CT se siguió la técnica extensión en placa descrita en (APHA, 2017a).

Preparación de reactivos

a) Buffer de dilución

Tomar 1.25 mL del stock de fosfatos y 5.0 mL del stock de cloruro de magnesio, aforar a 1L con agua destilada, cerciorarse que el pH = 7.2 ± 0.1 . Esterilizar en autoclave durante 15 min a 121°C.

b) Stock de fosfatos 0.25 M

Pesar 0.34 g de KH_2PO_4 y aforar a 10 mL con agua destilada.

c) Stock de cloruro de magnesio 0.4 M (Descartar acidez)

Pesar 2.02 g de MgCl_2 y aforar a 25 mL con agua destilada. (Descartar si se genera turbidez.)

Metodología para la cuantificación de CF y CT en agua.

Se tomó 0.1 μL de muestra y se sembró por duplicado en Agar Endo y Agar m-Fc para CF y CT respectivamente con asa bacteriológica. Posteriormente se tomó 1mL de la muestra y se colocó en 9 mL de buffer de dilución estéril (tubo 1), se homogenizó en agitador VORTEX G560 y se tomó una alícuota de 0.1 μL para sembrar en ambos medios.

Del tubo 1 se tomó una alícuota de 1 mL y se colocó en 9 mL de buffer de dilución estéril (tubo 2), se homogenizó y sembró 0.1 μL en ambos agares. Se repitió el procedimiento de diluciones 1:10 y sembrado hasta el tubo 5.

Para reportar los resultados se eligieron las cajas que presentaban 30-300 UFC ajustando el cálculo de acuerdo a la dilución.

DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

Para la medición de DQO se utilizó el método colorimétrico de reflujo 5220-D (APHA, 2017a) el cual requiere de las siguientes disoluciones:

- a) Disolución de digestión de alto rango: Se pesaron 2.0432g de $K_2Cr_2O_7$ previamente secado a $150^\circ C$ por 2h, se disolvió en 100mL de agua destilada, posteriormente se añadieron 33.4mL de H_2SO_4 y 6.66g de $HgSO_4$ disolver, dejar enfriar y aforar a 200mL.
- b) Disolución de digestión, rango bajo: Preparar como en a) pero utilizar solo 1.022g de $K_2Cr_2O_7$
- c) Reactivo de ácido sulfúrico: Se agregó 5.06g de Ag_2SO_4 en un matraz volumétrico de 500mL, se agregó aforó con H_2SO_4 y se dejó reposar de 1-2 días en la campana de extracción para disolver totalmente el Ag_2SO_4 .
- d) Curva de calibración KHP: Secar a $110^\circ C$ biftalato ácido de potasio (KHP) $HOOC_6H_4 COOK$. Disolver 425 mg en 250mL de agua destilada y aforar a 1000mL. El reactivo tiene una DQO de 1.176 mg O_2 /mgDQO y la disolución una DQO teórica de 500 mg O_2 /mL.

Preparación de curva de calibración.

Para preparar la curva de calibración utilizar 7 tubos de DQO, agregar volúmenes como se muestra en la Tabla 22 de KHP y agua destilada, después adicionar a cada tubo 1.2 mL de dicromato de potasio y 3.5mL de reactivo de ácido sulfúrico (reacción exotérmica), agitar vigorosamente. Precalentar el digestor a $150^\circ C$.

Preparación de blanco.

Preparar el blanco digerido (se mete en el digestor) y blanco no digerido (no se mete a digestión) agregando solamente 2mL de KHP, adicionar 1.2 mL de dicromato de potasio y 3.5mL de reactivo de ácido sulfúrico. Los volúmenes utilizados para la curva de calibración se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Curva de calibración DQO

Volumen de KHP [mL]	Volumen de agua destilada [mL]	DQO [mgO ₂ /L]
0	2.0	0
0.3	1.7	75
0.6	1.6	150
0.8	1.2	200
1.0	1.0	250
1.5	0.5	375
2.0	0	500

Preparación de muestras.

Filtrar la muestra con un filtro de jeringa de 0.20 µm y agregar 2mL a un tubo de DQO por triplicado, posteriormente adicionar 1.2mL de dicromato de potasio usando una bureta y 3.5mL de reactivo de ácido sulfúrico, por último, agitar usando el vortex.

Meter al digestor los tubos de la curva de calibración y las muestras a 150°C durante 2h, dejar enfriar y destapar los tubos, posteriormente retirar después de transcurrido el tiempo.

La medición de la absorbancia se realiza en espectrofotómetro PHARMACIA BIOTECH 80210620 a 600nm ajustando el blanco no digerido a cero, posteriormente meter blanco digerido y realizar lectura de los tubos de curva de calibración y muestras.

Una vez obtenida la absorbancia, restar a cada uno de los datos la absorbancia resultante del tubo de blanco digerido.

Para la determinación de la DQO obtener la ecuación de la recta graficando absorbancia vs concentración donde $(y=mx+b)$ corresponde a $y=$ absorbancia obtenida a 600nm $m=$ pendiente $b=$ ordenada al origen. Por último, despejar x que corresponde a la concentración de la materia orgánica en [mg/L].

DETERMINACIÓN DE FOSFATO

Este procedimiento se basa en la reacción del orto fosfato con el reactivo vanadomolibdico formando un heteropoliácido de color amarillo cuya absorción de luz se mide a 420nm. La intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fosfatos.

Se requiere de las siguientes soluciones:

- a) Disolver 25g de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 300 mL de agua destilada
- b) Disolver 1.25g de metavanadato de amonio (NH_4VO_3) en 300 mL de agua destilada hirviendo. Agregar 330 mL de HCl concentrado, dejar enfriar la solución a temperatura ambiente y verter a) en b), mezclar y aforar a 1L de agua, solución AB
- c) Solución estándar de fosfato: disolver en agua destilada 219.5 mg de KH_2PO_4 y aforar a 1L (1 mL = 50 $\mu\text{g PO}_4^{3-}$)

Ajuste del pH de la muestra: Si el pH de la muestra es superior a 10 agregar 0.05mL (1 gota) de indicador fenolftaleína a 50mL de la muestra y descargue el color rojo con HCl antes de diluir a 100mL

Eliminación del color de la muestra: Remover el exceso de color en la muestra agitando unos 50mL con 200mg de carbón activado en un matraz Erlenmeyer durante 5 minutos y filtre para eliminar el carbón activado.

Desarrollo de color en la muestra: Coloque 35mL o menos de muestra que contenga de 0.05 a 1mg de P en un matraz volumétrico de 50mL. Agregue 10mL de reactivo AB y diluya hasta la marca con agua destilada. Después de 10 minutos o más, medir absorbancia de la muestra frente al blanco a una longitud de 420nm

- d) Preparación de la curva patrón (Tabla 25): Adicionar en matraz volumétrico de 25mL los volúmenes de entre 1 y 6 mL de la disolución estándar de fosfato, posteriormente agregar 10mL del reactivo vanadato-molibdato y aforar con agua destilada.

Tabla 25. Curva de calibración Fosfatos

Volumen de disolución estándar de fosfatos [mL]	Volumen de reactivo vanadato-molibdato [mL]	Concentración de patrón de fosfatos [mg/L]
1.0	10	2
2.0	10	4
3.0	10	6
4.0	10	8
5.0	10	10
6.0	10	12

Preparación del blanco.

Colocar 10mL de reactivo vanadato-molibdato y aforar en matraz volumétrico de 25mL con agua destilada.

Preparación de muestra.

En un matraz volumétrico de 50mL adicionar 25mL de muestra y 10mL de reactivo de vanadato-molibdato y aforar con agua destilada, dejar reposar 10 minutos y medir absorbancia a 420nm.

DETERMINACIÓN DE NITRATOS (NO_3^-)

Se utilizó el método de espectrofotometría ultravioleta [4500- NO_3^-] descrito en APHA (2017). La técnica de monitoreo espectrofotométrico ultravioleta mide la absorbancia del nitrato a 220nm y es adecuada para la determinación rápida de nitrato y el monitoreo de aguas con bajo contenido de materia orgánica

Reactivos:

- Agua destilada o re-destilada, desionizada (el agua tiene que ser de la más alta pureza para preparar las disoluciones)
- solución madre de nitrato: Secar nitrato de potasio (KNO_3) en estufa a 105°C por 24h, posteriormente disolver 0.7218g en agua y diluir en 1000mL; 1mL =

100µg NO₃⁻-N. Conservar con 2mL de CHCl₃/L. Esta solución es estable durante 6 meses.

- c) Solución intermedia de nitrato: Diluir 100 mL de solución madre de nitrato en 1000mL con agua; 1mL = 10µg NO₃⁻-N. Conservar con 2 mL de CHCl₃/L. Esta solución es estable durante 6 meses.
- d) Solución de ácido clorhídrico 1N

Tratamiento de la muestra:

- a) A 50mL de la muestra, filtrar si es necesario, agregar 1mL de HCl y mezclar minuciosamente.
- b) Preparación de la curva estándar: Preparar los estándares de calibración en el rango de 0 a 7 mg de NO₃⁻-N/L en matraz volumétrico de 50mL los siguientes volúmenes de la solución intermedia de nitrato: 1.00, 2.00, 4.00, 7.00...35.0 mL. Trate los estándares de la misma manera que las muestras.
- c) Medición espectrofotométrica: Leer absorbancia o transmitancia contra el agua redestilada ajustando la absorbancia a cero (blanco). Utilizar una longitud de onda de 220nm para obtener una lectura de NO₃⁻ y a 275nm para determinar la interferencia debida a la materia orgánica disuelta.

Cálculos

Para las muestras y estándares restar 2 veces la lectura de absorbancia de 275nm a la lectura de 220nm para obtener la absorbancia debida al NO₃⁻. Construir curva trazando la absorbancia vs [NO₃⁻]_{estándar}. Con las absorbancias de la muestra corregida obtener las concentraciones de las muestras directamente de la curva estándar.

Construcción de curva de calibración: Agregar la cantidad necesaria de la disolución intermedia de nitratos para obtener un rango de concentración de 1-7 mg/L (véase en Tabla 26).

Tabla 26. Curva de calibración Nitratos

Volumen disolución intermedia de nitratos [mL]	Rango de concentración de nitrato [mg/L]
5.0	1
10.0	2
15.0	3
20.0	4
25.0	5
30.0	6
35.0	7

DETERMINACIÓN DE TEMPERATURA Y pH.

Para esta medición se usó un multiparámetro marca Thermo ELECTRON CORPORATION previamente calibrado.

Se tomaron tres muestras de 25 mL, posteriormente se realizó la medición con el electrodo correspondiente. El equipo realiza la lectura de pH y temperatura al mismo tiempo.

9. ANEXO II CURVAS DE CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

Demanda Química de Oxígeno.

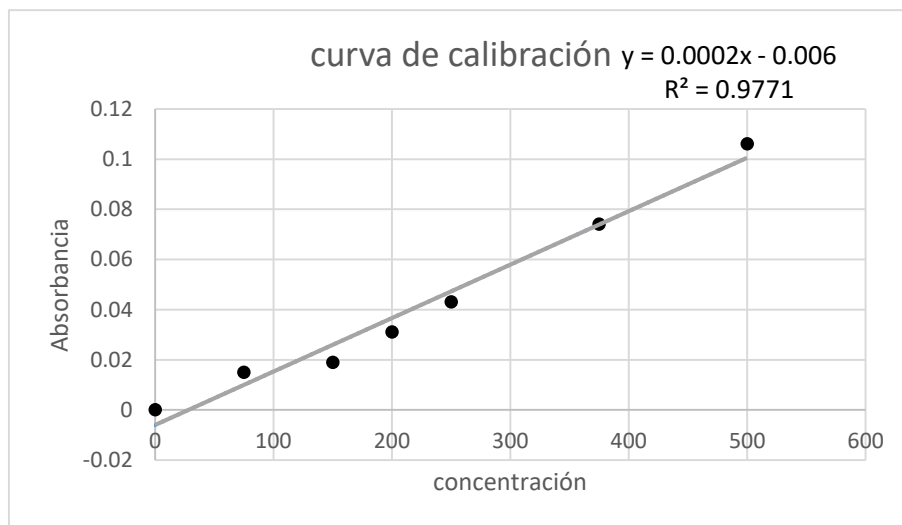
Datos obtenidos para construcción de curva de calibración.

Tabla 27. Datos para construcción de curva de calibración

Concentración	Abs 600nm	abs- abs bd
0	0.016	0
75	0.031	0.015
150	0.035	0.019
200	0.047	0.031
250	0.059	0.043
375	0.09	0.074
500	0.122	0.106
Blanco digerido (bd)	0.016	0

Curva de calibración de DQO:

Gráfica 1. Curva de calibración DQO.



Pendiente y ordenada al origen:

m=	0.0002
b=	-0.0060

Resultados de muestras:

Tabla 28. Resultados DQO

Muestra	Absorbancia	DQO
1	0.033	141
2	0.039	155
3	0.035	150

Fosfatos.

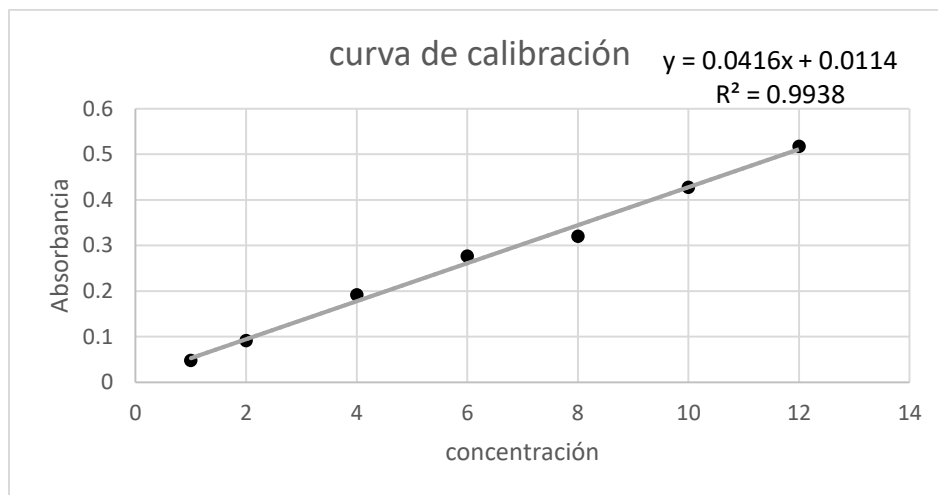
Datos obtenidos para construcción de curva de calibración.

Tabla 29. Datos para construcción de curva de calibración

Absorbancia	Concentración [mg/L]
0.0475	1
0.091	2
0.191	4
0.2765	6
0.32	8
0.427	10
0.517	12

Curva de calibración de fosfatos:

Gráfica 2. Curva de calibración Fosfatos



Pendiente y ordenada al origen:

Ecuación de la recta	$y = 0.0416x + 0.0114$
m	0.0416
b	0.0114

Resultados de muestras:

Tabla 30. Resultados Fosfatos

Muestra	Absorbancia	Concentración de fosfatos [mg/L]
1	0.124	2.72
2	0.124	2.70
3	0.126	2.75

Nitratos.

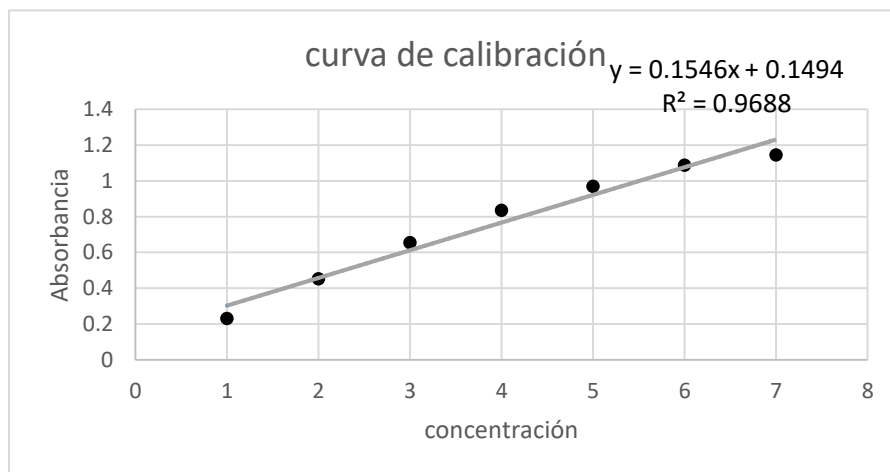
Datos obtenidos para construcción de curva de calibración.

Tabla 31. Datos para construcción de curva de calibración.

concentración	Absorbancia
1	0.2305
2	0.452
3	0.6545
4	0.8355
5	0.9695
6	1.087
7	1.145

Curva de calibración de nitratos:

Gráfica 3. Curva de calibración Nitratos.



Pendiente y ordenada al origen:

Ecuación de la recta	$y=0.1546x+0.1494$
m=	0.1546
b=	0.1494

Resultados de muestras:

Tabla 32. Resultados Nitratos

Muestra	Abs 275	Abs 220	Absorbancia corregida	Concentración
1	0.183	0.811	0.445	1.912
2	0.193	0.831	0.445	1.912
3	0.192	0.827	0.443	1.900