



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS  
CENTRO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS

**“Carbono  $sp^2$  en roca volcánica y su aplicación en filtros de agua para la remoción de metales pesados”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**LICENCIADO EN DISEÑO MOLECULAR Y NANOQUÍMICA**

PRESENTA:

**ZANDRA EUNICE NUÑEZ SALAZAR**

DIRECTORA DE TESIS

**DRA. MARÍA LUISA GARCÍA BETANCOURT**

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO 2023

# Trabajos presentados en eventos académicos



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

a través del

CENTRO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS



otorga la presente

*Constancia*

a:

**Zandra Eunice Nuñez Salazar y  
María Luisa García Betancourt**

Por su participación en el Cartel Virtual titulado:

**“Carbono  $sp^2$  en roca volcánica y su aplicación en filtros  
de agua para la remoción de metales pesados”**

En el marco de la celebración del 25 Aniversario del CIQ llevado a cabo en la modalidad virtual  
el 3 de mayo del 2021

**Por una humanidad culta  
una Universidad de excelencia**



---

Dr. Víctor Barba López  
Encargado de Despacho la Dirección del CIQ

# Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Al Centro de Investigaciones Químicas y al Laboratorio Nacional de Estructura de Macromoléculas, por las instalaciones y el equipo, por darme todas las herramientas y conocimientos necesarios para ser una mujer profesionalmente preparada.

A la Dra. María Luisa García Betancourt, Dr. Hugo Saldarriaga Noreña, Dra. Mayra Antúnez Mojica: Gracias por su paciencia, por su apoyo, por orientarme e impulsarme a dar lo mejor, por confiar siempre en mí.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Laboratorio Nacional de Investigaciones en Nanociencias y Nanotecnología; Instituto de Física-UNAM, por las facilidades brindadas para la caracterización de los materiales.

A la Dra. Cristina Zorrilla (Instituto de Física-UNAM), gracias por su apoyo y por enseñarme cosas que eran desconocidas para mí.

Al Dr. Alfonso R. García Márquez, Facultad de Química UNAM por el apoyo en la caracterización BET.

**A Dios**, por su amor, por su gracia, por suplir cada una de las necesidades que se presentaron a lo largo de mis estudios, por ser mi torre fuerte y pilar principal en mi vida.

## **A mis padres,**

Raul Nuñez Delgado y Zandra Lorena Salazar Villalobos Por impulsarme siempre a dar lo mejor, por recargarme de fuerzas cuando sentía que ya no podía, por creer en mí, por enseñarme que el amor es incondicional, por ser tan valientes y esforzados, mi admiración y respeto lo tendrán por siempre, pues gracias a ustedes soy quien soy. Espero algún día poder regresar un poco de lo mucho que han dado por mí. Gracias por darme la oportunidad de estudiar y dar la milla extra por mí. Gracias porque mi mejor herencia es conocer a Dios. Los amo.

## **A mi Familia**

Gracias Raúl Isaac y Víctor Ariel Nuñez Salazar, por apoyarme incondicionalmente siempre, gracias por su amor.

Gracias Abuelita María Luisa Salazar Villalobos, por enseñarme a leer y a escribir, porque tú fuiste y siempre serás inspiración para mí, eres un pilar importante en mi vida, gracias por todo tu apoyo y amor. Te amo abue.

Gracias abuelito Tarsicio Salazar Mancilla por siempre recordarme quién era yo, tus palabras siempre están en mi corazón. Te amo por siempre.

A mis tías, Ma. Luisa, Irma, Orquídea Salazar Villalobos, por siempre cuidarme y preocuparse por mí, las amo. Espero algún día poder ser como ustedes.

## **A mis amigos.**

A mi novio, por siempre recordarme que puedo lograr todo lo que me proponga, por impulsarme a ser una mejor versión de mí, gracias Alejandro Benítez Navarrete, te amo.

Gracias Pamela Pérez Gonzalez y Beatriz Castro Gómez por siempre estar conmigo, en las buenas y en las malas.

## Resumen

El tezontle es una piedra de origen volcánico; es un compuesto natural de bajo costo. Estudios previos sugieren la presencia de carbono  $sp^2$  en la roca volcánica, lo cual es común encontrar en algunos suelos, mejorando la fertilidad del ecosistema.

El tezontle puede tener usos y aplicaciones muy amplias, más allá de las que se conocen, como la remoción de metales pesados en agua. Los metales pesados no pueden ser metabolizados por el organismo, se acumulan en nuestro cuerpo ocasionando graves enfermedades. Normalmente el ser humano consume metales pesados en agua, esto se debe a que los filtros que remueven estos contaminantes son caros y no todos pueden tener acceso a uno de ellos. Uno de los objetivos de proyecto es el diseño y construcción de un filtro de agua con tezontle como factor de remoción de metales pesados en agua, complementando con materiales de bajo costo para que todos puedan tener acceso a ellos.

En este proyecto se caracterizó el compuesto para analizar la presencia de carbono  $sp^2$  por medio de análisis elemental, espectroscopía Raman, Fotoespectroscopía de Rayos X, complementando con Microscopía Electrónica de Barrido y Difracción de Polvos.

De acuerdo con la caracterización realizada por Difracción de rayos X de polvos es un material compuesto que contiene **Andesina** ( $Na_{0.5}Ca_{0.5}Al_{1.5}Si_{2.5}O_8$ ), **Cuarzo** (SiO), y **Hematita** ( $Fe_2O_3$ ). El análisis Raman confirmó que el carbono es hibridación  $sp^2$  gracias a la presencia del pico de la banda G en el espectro.

Se fabricaron filtros con tezontle negro y rojo, como propuesta para filtración de agua y remoción de metales pesados, de los cuales se analizó el tiempo de filtrado, obteniendo un resultado entre los reportados en la literatura.

# Contenido

Trabajos presentados en eventos académicos .....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen .....	iv
Contenido .....	v
Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tablas .....	xi
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 Carbono $sp^2$ natural y sintético.....	3
2.1.1. Tipos de carbono $sp^2$ .....	3
2.1.2. Configuración $sp^2$ .....	3
2.1.3. Carbono $sp^2$ natural .....	4
2.1.4. Carbono $sp^2$ sintético .....	5
2.1.5. Determinación de carbono $sp^2$ .....	6
2.1. Tezontle .....	7
2.1.1 Usos comunes.....	7
2.1.2 Usos de tezontle en remediación ambiental .....	8
2.1.3 Porosidad en el tezontle.....	9
2.2. Carbón activado .....	9
2.2.1 Propiedades .....	10
2.2.2 Usos comunes.....	10
2.2.3 Usos de carbón activado en remediación ambiental .....	11
2.3. Metales Pesados .....	11
2.3.1 Metales pesados en suelo .....	13
2.3.2 Metales pesados en el agua.....	13
2.3.3 Movilidad de los metales pesados .....	14
2.4 Factores que afectan la acumulación y disponibilidad de los metales pesados	14
2.4.1 pH .....	14
2.4.2 Dureza del Agua .....	15
2.4.3 Materia Orgánica.....	15
2.4.4 Condiciones Redox.....	16
2.5 Técnicas de remoción de metales pesados convencionales.....	17
2.6 Técnicas de remoción no convencionales .....	17
2.7 Termodinámica de la adsorción .....	19

2.7.1	Isotermas de adsorción .....	20
2.7.2	Isotermas de adsorción de Langmuir .....	21
2.7.3	Isotermas de Freundlich.....	21
2.8	Filtros para agua .....	22
2.8.1	Diferencia entre filtración y purificación de agua.....	22
2.8.2	Filtros de Arena.....	22
2.8.3	Filtros de cerámica .....	22
2.9	Materiales para hacer un filtro de agua casero .....	23
2.10	Clases y composición de los sistemas de filtración caseros .....	27
2.10.1	Los filtros BSF.....	27
2.10.2	El filtro de bioarena modificado (MBSF) .....	27
2.10.3	Los filtros BF .....	27
2.10.4	Filtros caseros de vela cerámica .....	27
2.10.5	Los filtros CCF .....	28
2.10.6	El filtro SIPP .....	29
2.10.7	El filtro de matriz estructurada.....	29
2.10.8	Filtros de Arcilla .....	30
2.10.9	Filtro de Arcilla con plata coloidal. ....	30
2.11	Filtros y purificadores de agua para el hogar en el mercado.....	31
2.12	Técnicas de caracterización .....	33
2.12.1	Microscopía electrónica de barrido .....	33
2.12.2	Análisis elemental .....	34
2.12.3	Espectroscopía Raman .....	34
3.	Difracción de rayos X de polvos.....	35
4.	Espectroscopía foto electrónica de rayos X .....	36
5.	BET: Análisis de superficie .....	36
6.	Marco teórico .....	37
7.	Planteamiento del problema.....	39
7.1	Justificación .....	39
7.2	Hipótesis .....	39
8.	Objetivo.....	39
8.1	Objetivo General .....	39
8.2	Objetivos específicos.....	39
9.	Materiales y métodos.....	41

9.1	Roca volcánica (tezontle).....	41
10.	Caracterización del tezontle .....	41
10.1	Microscopía electrónica de barrido .....	41
10.2	Análisis elemental.....	42
10.3	Espectroscopía Raman .....	43
10.4	Difracción de rayos X de polvos.....	43
10.5	Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X .....	44
10.6	BET.....	45
11.	Prototipo de filtro utilizando tezontle.....	45
12.	Metodología para el prototipo de filtro .....	47
12.1	Tamaño del Filtro .....	48
12.2	Molienda del tezontle.....	48
12.3	Procedimiento.....	48
13.	Resultados y discusión .....	50
13.1	Caracterización del tezontle .....	50
13.1.1	Microscopía.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
13.2	Análisis elemental.....	54
13.3	Espectroscopía Raman .....	55
13.4	Difracción de rayos X de polvos.....	56
13.5	Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X .....	57
13.6	BET: Área superficial específica .....	59
14.	Mecanismo de remoción de metales pesados del agua con tezontle .....	60
15.	Filtro de agua .....	62
15.1	Prototipo de filtro utilizando tezontle.....	62
15.1.1	Prototipo con Tezontle Rojo .....	65
15.1.2	Prototipo con Tezontle Negro.....	66
15.1.3	Prototipo sin tezontle.....	67
15.2	Uso y manejo de los Filtros .....	68
16.	Ventajas y desventajas de los filtros fabricados en este proyecto .....	70
17.	Conclusiones.....	71
18.	Perspectivas.....	72
19.	Productos académicos y publicaciones .....	73
20.	Bibliografía.....	74



# Índice de Figuras

Figura 1. Hibridación $sp^2$ del carbono con su estado híbrido, excitado y basal[14].	4
Figura 2. Patrón de difracción de polvos del Tezontle del Estado de Hidalgo [23].	6
Figura 3 . Tipos de tezontle[28].	7
Figura 4. Diferentes tipos de sorción [42].	19
Figura 5. Tipos básicos de isoterma [52].	20
Figura 6. Ejemplo de filtro bioarena [59].	23
Figura 7. Ejemplo de Filtro lento de Arena. Imagen extraída de los cuadernos de Permacultura de Antonio Urialdes [42].	25
Figura 8. Filtro casero de Agua compuesto por diversas capas [62].	26
Figura 9. Filtros de vela cerámica de fabricación casera [66].	28
Figura 10. Composición de los sistemas de filtración casera. (A)Filtro de bioarena, (B)Filtro cubos, (C)Filtros de Vela de cerámica, (D)Filtro poroso impregnado de plata coloidal SIPP, (E)Filtro cilema, (F)Filtro de membrana [66].	29
Figura 11. Diagrama de energía de las diferentes transiciones en la espectroscopía Raman.	35
Figura 12. Fotografías de la mina de Huitzilac, Morelos, México.	41
Figura 13. Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo FESEM SU5000 Hitachi [85].	42
Figura 14. Equipo de análisis elemental orgánico FLASH 2000 de Thermo Scientific [86].	42
Figura 15. Thermo Scientific DXR Raman Microscope [87].	43
Figura 16. Difractómetro de Rayos-X Smart Lab RIGAKU [88].	44
Figura 17. Espectrofotómetro Sistema Phi 5000 Versaprobe II [91].	44
Figura 18. Prototipo de filtro con tezontle y otros materiales.	45
Figura 19. Materiales Utilizados para la elaboración del filtro prototipo	46
<b>Figura 20.</b> Etapas para la construcción de filtro con tezontle.	47
Figura 21. Fotografía de microscopio óptico de la superficie del tezontle rojo.	50
Figura 22. Fotografía de microscopio óptico de la superficie del tezontle negro.	51
Figura 23. Fotografía de microscopio óptico de la superficie del tezontle amarillo.	51
Figura 24. Micrografía de barrido electrónico de la superficie de tezontle color rojo.	52
Figura 25. Micrografía de barrido electrónico de la superficie de tezontle color negro.	53
Figura 26. Micrografía de barrido electrónico de la superficie de tezontle color amarillo.	53
Figura 27. Espectros RAMAN, de tezontle negro, rojo y amarillo.	56
Figura 28. Patrones de difracción de polvos de las muestras de tezontle (a) rojo, (b) negro, y (c) amarillo, en donde se indican de manera general las fases presentes para C-cuarzo ( $SiO_2$ ), A-anortita ( $CaAl_2Si_2O_8$ ), B-albita ( $NaAlSi_3O_8$ ) y H-óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ).	57
Figura 29. Medición general de la espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) de tezontle rojo, negro, y amarillo.	58
Figura 30. Espectro C1s de las muestras de tezontle (a) rojo, (b) negro, y (c) amarillo, en donde el pico principal corresponde al carbono $sp^2$ .	59
Figura 31. Esquema para el mecanismo de remoción de metales pesados con el tezontle, interacción de carbono $sp^2$ y metales pesados disueltos en Agua[8].	60
Figura 32. Adsorción de metales pesados y permeabilidad del agua.	61
Figura 33. Primer prototipo de filtro a escala menor.	63

<b>Figura 34.</b> a) Molienda del tezontle con ayuda de un molcajete/mortero. b) Separación del tezontle con ayuda de cernidor de aproximadamente 130-200 micras, cedazo convencional. ....	63
Figura 35. Tela de algodón utilizada para separar la capa del tezontle de las arenas. ....	64
Figura 36. Construcción del filtro con tezontle rojo. ....	65
Figura 37. Filtro con tezontle rojo. ....	66
Figura 38. Filtro con tezontle negro. ....	66
Figura 39. Filtro sin Tezontle. ....	67
Figura 40. Uso y manejo de los filtros con el paso del tiempo. ....	68

## Índice de Tablas

Tabla 1. Relación entre hibridación, estereoquímica y estructuras del carbono sólido [12]. .....	3
Tabla 2. Actividades industriales generadoras de metales pesados [27].....	12
Tabla 3. <i>Técnicas de remoción convencionales</i> [27] [49][50][19]¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 4. Técnicas de remoción no convencionales [27].....	18
Tabla 5. Tipo de purificadores de agua y sus funciones [71].....	31
Tabla 6 Datos de análisis BET para tezontle rojo .....	45
Tabla 7. Comparación de la composición elemental del tezontle negro, rojo y amarillo. ....	54
Tabla 8. Comparación de la composición elemental del tezontle negro, rojo y amarillo. ....	58
Tabla 9. Molienda realizada con un molcajete/mortero de roca volcánica.....	64
<b>Tabla 10.</b> Tasa de filtración promedio para los sistemas de filtración casera comparados con nuestro filtro[67]. ....	69

# 1. Introducción

Hoy en día la contaminación del agua tanto en México como en el mundo es uno de los problemas que generan mayor impacto en la población. El agua es el recurso que utilizamos para todas las necesidades del ser humano, así como en las actividades industriales y agropecuarias. Más de 4800 enfermedades en el mundo son producidas por la contaminación del agua [2]. El agua es uno de los recursos más contaminados del planeta; por lo que la remediación y eliminación de contaminantes son una necesidad urgente junto con herramientas de monitoreo fáciles y rápidas [3].

La problemática de los metales pesados como plomo, níquel, cadmio, manganeso, mercurio, arsénico, y cromo, presentes en el agua residual utilizada para riego, radica principalmente en que pueden ser acumulados en los suelos agrícolas [4]. Estos metales resultan peligrosos por su carácter no biodegradable, la toxicidad que ejercen sobre los diferentes cultivos y su biodisponibilidad, que es el criterio que evalúa la proporción y la velocidad de adsorción de un medicamento, un alimento o un principio activo, según el modo en el que se administra o se ingiere[4]. Los metales pesados y el arsénico se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos, pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas [4], pueden pasar a la atmósfera por volatilización y movilizarse hacia el agua superficial o subterránea. En el organismo de los seres vivos, hay pequeñas cantidades de algunos metales pesados que pueden intervenir en reacciones bioquímicas, pero otros metales no representan utilidad biológica. Por esto, la exposición ocupacional y la exposición pasiva a metales pesados presentes en el ambiente o que provienen de la dieta deben ser reguladas, ya que cantidades superiores a las consideradas normales pueden ocasionar ciertas enfermedades[5].

La contaminación de las aguas por estos compuestos de origen metálico puede aparecer a través de medios naturales (aguas de pozo y ríos) o medios artificiales (actividades antropogénicas). Las actividades humanas han afectado considerablemente la concentración en el ambiente a un nivel preocupante. Y es común que, en zonas agrícolas extensas, donde se ha utilizado agua residual para el riego agrícola, se reporta una tendencia creciente en las concentraciones de metales pesados [6][4]. El uso de plaguicidas también contribuye al incremento de los metales pesados en el suelo [7].

Para conocer las concentración de metales pesados que tiene un agua contaminada, será suficiente con realizar un análisis completo de calidad y potabilidad donde nos dará no solo estos datos si no también concentración de bacterias, salinidad, turbidez y otros parámetros que se deben tener en cuenta para el tratamiento de reducción de metales pesados [1][8]. Las técnicas convencionales para eliminar metales pesados del agua y las aguas residuales incluyen galvanoplastia, evaporación, filtración por membrana, oxidación, reducción, intercambio iónico y adsorción. Entre estos métodos, la adsorción es la técnica más efectiva. Varios adsorbentes como el carbón activado, gel de sílice y óxido de grafito se pueden utilizar en la purificación de agua. Históricamente, el óxido de grafito y otros nanomateriales basados en carbono se han utilizado como adsorbentes para aplicaciones

de purificación ambiental y tratamiento de agua para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos [8].

Uno de los procesos más eficientes para la reducción de metales pesados en agua son los sistemas de filtración para absorción. Equipos diseñados con un medio filtrante específico que se encarga de eliminar este tipo de metales disueltos en el agua mediante el contacto con esta. Durante el paso del agua por el interior del filtro se produce una reacción química que produce la precipitación y posterior absorción de estos compuestos metálicos pesados. La eliminación de los metales pesados del agua se produce gracias a las fuerzas Van der Waals, debiendo controlar que estas trabajen correctamente con un diseño del equipo adecuado que garantice la absorción de cualquier metal presente en el agua. Estos tipos de filtros tienen costos elevados, son de gran tamaño y es muy difícil poder tener acceso a ellos, por lo que consumir agua libre de contaminantes es un lujo[7].

El tezontle se ha estudiado como material de remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales y como filtro junto con procesos aeróbicos, reduciendo los sólidos suspendidos en un 80% en aguas residuales municipales [9,10]. Considerando su posible aplicación del tezontle en tecnologías ambientales, es importante analizar las variaciones de las propiedades físicas del tezontle como material debido al tamaño de partícula de las muestras. En este sentido, en este trabajo se pretende fabricar un filtro con materiales naturales que permita la remoción de metales pesados en agua, el cual tenga un tamaño ideal dependiendo las necesidades, fácil de construir, con materiales accesibles y al mismo tiempo, económicos para que todos puedan tener acceso a un agua limpia y purificada dónde se encuentren. La base central del filtro es el tezontle, por lo que previo a su diseño se presentan sus caracterizaciones y su análisis para la determinación de carbono  $sp^2$ .

## 2. Antecedentes

### 2.1. Carbono $sp^2$ natural y sintético

#### 2.1.1. Tipos de carbono $sp^2$

El elemento carbono, con un número atómico de 6, posee una configuración electrónica  $[\text{He}]^2s^2 2p^2$ . Los átomos de carbono pueden adoptar tres tipos de hibridación de orbitales:  $sp^3$ ,  $sp^2$  y  $sp$ , puede formar moléculas con enlaces sencillos, dobles y triples, lo que no sucede con ningún otro elemento que dan lugar a la existencia de hasta cinco formas alotrópicas: grafito, diamante, fullerenos, nanotubos, y carbinos; cada una de ellas con propiedades extremadamente diferentes [13,21]. El diamante con una hibridación en cuatro orbitales  $sp^3$ , es extremadamente duro y raya a la mayor parte de los materiales; el grafito, con una hibridación de tres orbitales  $sp^2$  planos más un orbital  $p$  perpendicular a este plano, se exfolia con suma facilidad, lo que le convierte en un excelente lubricante. Esta configuración, que se denomina grafítica, es la más habitual en los materiales de carbono [21]. En la Tabla 1 se muestran los diferentes tipos de hibridación, estereoquímica y las estructuras del carbono.

Tabla 1. Relación entre hibridación, estereoquímica y estructuras del carbono sólido [21].

Tipo de Hibridación	Estereoquímica	Estructuras
$Sp^3$	Tetraédrica	Diamante Lonsdaleíta
$Sp^2$	Trigonal plano	Grafito hexagonal Grafito Romboédrico
$Sp$	Lineal	Carbinos

#### 2.1.2. Configuración $sp^2$

Se define como la combinación de un orbital  $s$  y  $2p$ , para formar 3 orbitales híbridos, que se disponen en un plano formando ángulos de  $120^\circ$  [22]. Los átomos que forman hibridaciones  $sp^2$  pueden formar compuestos con enlaces dobles. A los enlaces simples se les conoce como enlaces sigma ( $\sigma$ ) y los enlaces dobles están compuestos por un enlace sigma y un enlace pi ( $\pi$ ). Las reglas de ubicación de los electrones en estos casos, como el alqueno etileno obligan a una hibridación distinta llamada  $sp^2$ , en la cual un electrón del orbital  $2s$  se mezcla sólo con dos de los orbitales  $2p$ : surge a partir o al unirse el orbital  $s$  con dos orbitales  $p$ ; por consiguiente, se producen tres nuevos orbitales  $sp^2$ , cada orbital nuevo produce enlaces covalentes [22]. Las hibridaciones del carbón, su estereoquímica y las estructuras que forman se observan en la figura 1.

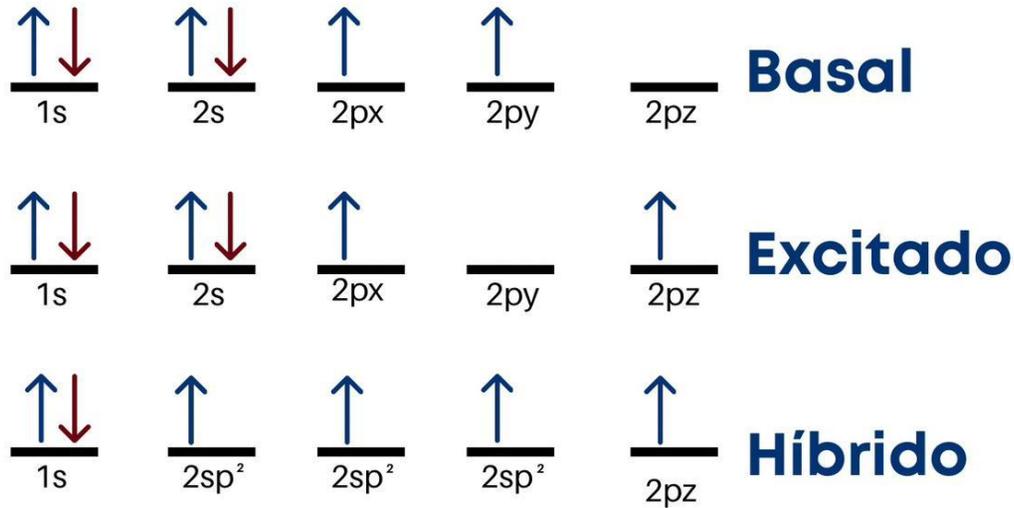


Figura 1. Hibridación  $sp^2$  del carbono con su estado híbrido, excitado y basal[23].

### 2.1.3. Carbono $sp^2$ natural

Las partículas de carbono desordenadas o amorfas son sólidos nanocristalinos de materiales de carbono alotrópico, de las cuales existen una gran variedad como: la antracita, lignito, carbón bituminoso, carbón natural, el hollín y otras formas de carbono que no son ni grafito ni diamante[24][25]. Estos carbonos amorfos están disponibles en la naturaleza como resultado de las actividades humanas y fenómenos naturales. En un estudio realizado en las amazonas exploraron las diferencias entre los tipos de carbono que se encuentran en suelo y como influyen en el ambiente de acuerdo a sus propiedades fertilizantes y tamaños, en los resultados de las caracterizaciones obtenidas se muestra que existe la presencia del carbono  $sp^2$  de forma natural en el suelo amazónico[26].

El tezontle es una roca volcánica/ígneas formada por diferentes tipos de silicatos y carbono, la cual se encuentra de forma natural. Se han estudiado las propiedades físicas y químicas del tezontle en diferentes tipos de cultivos como tomate y tulipanes, los cuales arrojan que el diámetro de la partícula de tezontle influyó las variables de crecimiento y las concentraciones de nutrimentos en hojas, sin embargo, en ese estudio no se considera que el tezontle pudiera contener carbono  $sp^2$ . Por otro lado, dependiendo del tamaño de partícula que se utilice, se obtienen buenos resultados: incremento de nutrientes y una mayor producción vegetal ya que el composito ayuda a la fertilidad de la tierra y a tener mejores rendimientos, ya que el carbono orgánico tiende a relacionarse con arcillas[27] por lo que se puede pensar que el tezontle tiene en su composición carbono  $sp^2$  [28][1].

#### 2.1.4. Carbono $sp^2$ sintético

El carbono con hibridación  $sp^2$  lo podemos encontrar de forma sintética en el grafeno y en los nanotubos de carbono. El grafeno es un material nanométrico bidimensional, consistente en una sola capa de átomos de carbono fuertemente cohesionados mediante enlaces que presentan hibridación  $sp^2$  y dispuestos en una superficie uniforme, ligeramente ondulada, con una estructura semejante a la de un panel de abejas por su configuración atómica hexagonal. El grafeno es una de las formas alotrópicas del carbono, como lo son también el grafito y el diamante[29].

En los últimos años los nanotubos de carbono (NTC) han adquirido gran importancia debido a las diferentes propiedades químicas y físicas que presentan, como alta dureza y resistencia, todo esto gracias a su naturaleza química, además de presentar alta conductividad eléctrica y térmica. Presentan hibridación  $sp^2$ , este tipo de arreglo estructural hace posible que sus átomos de carbono puedan formar hexágonos y pentágonos en estructuras tubulares tridimensionales cerradas [30].

Existen diferentes tipos de NTC en función con las capas que tienen de grafito, con lo que están formados, pueden ser nanotubos de carbono de pared sencilla (NTCPS) y nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM). La estructura de NTCPS consiste de un cilindro hueco que resulta al enrollarse una lámina de átomos de carbono (grafeno) sobre sí misma, estos átomos se encuentran covalentemente enlazados a tres átomos de carbono vecinos mediante una hibridación  $Sp^2$ , quedando el cuarto enlace del carbono deslocalizado entre los demás átomos[30].

### 2.1.5. Determinación de carbono $sp^2$

Se puede determinar la presencia de carbono  $sp^2$  por medio de diversas técnicas como espectroscopía Raman, a través de la presencia de la banda G la cual es atribuida a los modos vibracionales del enlace carbono-carbono, sin embargo, esta técnica es cualitativa y solo se puede mencionar la presencia sin determinar o cuantificar [31]. La difracción de polvos podría ayudar a la determinación de planos cristalográficos debido a las multicapas gráficas en el plano (002), o a la presencia del plano (110) en el plano hexagonal, sin embargo, su determinación en las muestras de tezontle es complicada debido a las distintas fases predominantes contenidas en los especímenes de Tezontle como el de la Figura 2, el cual corresponde a Tezontle del Estado de Hidalgo, México [32]. La técnica espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) determina de forma cualitativa y cuantitativa el contenido de carbono  $sp^2$ , así como la presencia de otros elementos enlazados con el carbono [33].

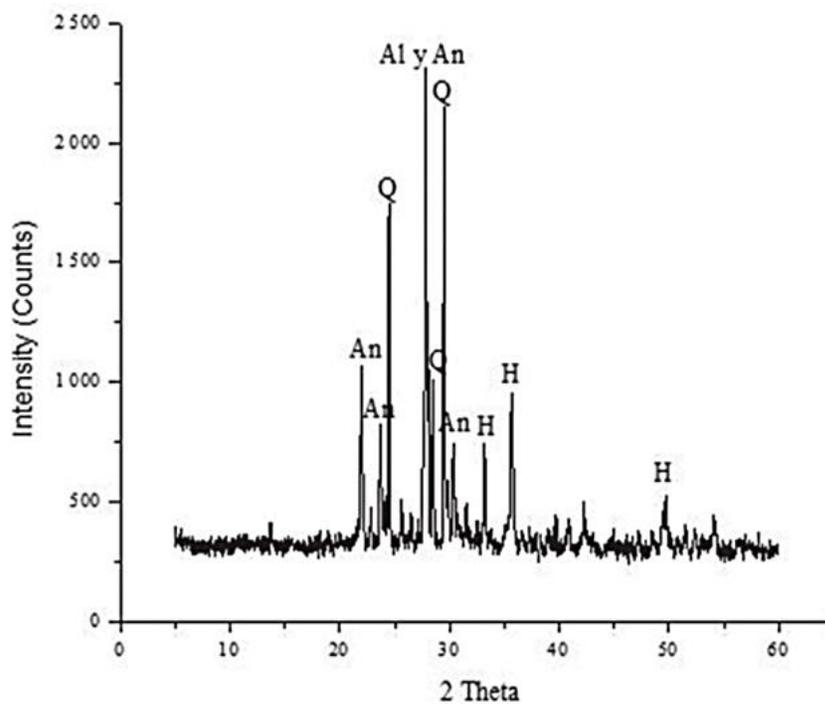


Figura 2. Patrón de difracción de polvos del Tezontle del Estado de Hidalgo [32].

## 2.2. Tezontle

El tezontle es un compuesto procedente de la erupción de los volcanes y constituido por silicatos de aluminio, formado por fragmentos y partículas de lava porosa de bajo peso. Es una roca porosa ligera, se puede encontrar en zonas volcánicas. Es un material que presenta alta heterogeneidad en el tamaño de la partícula. Este sustrato se puede encontrar en color rojo, negro o amarillo[19], la coloración dependerá de sus componentes, principalmente del bióxido de hierro es de aspecto deteriorado; en algunas ocasiones puede convertirse en una roca dura[20].

Es una piedra liviana ya que contiene bióxido de hierro, porosa y con formaciones a partir de burbujas de ahí su aspecto esponjoso, es perfecta para guardar el calor, no es permeable ni aislante. Gracias a sus propiedades y compuestos que lo forman, tienen la capacidad de remover contaminantes[1][20][34].

El tezontle se usa en la construcción para fabricar, casas, diques y tabicón negro, sirve como relleno en terracería en su presentación molida, es utilizado en la jardinería y como fachada en casas [20].



Figura 3 . Tipos de tezontle[35]

### 2.2.1. Usos comunes

El tezontle tiene múltiples usos: como filtrante en la industria, como aireador de suelos en la agricultura, y en la elaboración de polvos abrasivos para cosmetología, odontología y distintos procesos químicos. Limpieza de superficies delicadas en construcción civil y monumental tales como estucos, esgrafiados, bajorrelieves, y de forma general, todas aquellas superficies en las que sea deseable una aplicación suave. Aplicable también a superficies metálicas para matizado muy leve [36].

Para horticultura se emplea en cultivos diversos, como cubierta en jardines xerófilos y/o cactarium, como sustrato en invernaderos, campos de golf, jardinería de paisaje, también es utilizado en arreglos florales [36] [37].

El tezontle es un gran complemento para el suelo. Provee porosidad para la aireación, la cual está relacionada con el tamaño de la partícula, existen datos BET (Análisis de área superficial) reportados que para una partícula con un tamaño de 425µm se presenta un tamaño de poro de 11.8 nm, esta propiedad que posee el tezontle permite también la retención de agua en el área, permitiendo a las plantas permanecer verdes y saludables por periodos más prolongados entre lluvias o riegos, además de que aporta una gran cantidad de nutrientes, razón por la cual su fertilidad aumenta. Es utilizado en la construcción de baños de temazcal, construcción de hornos de barbacoa y de pan, fabricación del tabicón negro. Molido se usa para relleno de calles de terracería y como fachada de algunas casas [36] [37] [38].

### **2.2.2. Usos de tezontle en remediación ambiental**

Para el tratamiento de aguas residuales existen dos tipos principales de procesos biológicos: los aerobios y los anaerobios, los filtros anaerobios se consideran altamente eficientes para la conservación de la energía, estos consisten en soportes plásticos o de piedras sobre los cuales se desarrollan una capa de microorganismos que degradan los contaminantes del agua, el objetivo de este tipo de filtros es lograr la transformación bioquímica de los contaminantes y la retención física de las partículas. El tezontle se ha estudiado como empaque para filtros anaerobios, exhibiendo buenos resultados por sus características físicas que lo hacen adecuado para emplear en medios filtrante como es su una gran área superficial y alta velocidad de colonización, que al ser un material inorgánico resiste el ataque microbiano con alta termo estabilidad y buenas propiedades de flujo [39,40].

El tezontle también ha sido estudiado para la remoción de metales pesados y otros contaminantes en el agua, esto debido a su gran porosidad que se ha reportado entre 67.0% - 67.9% [41], 52.83% - 63.90% [32], 60% - 80% [42] estos valores varían debido al lugar de origen y al proceso de tamizado o molienda ya que se ha demostrado que el espacio poroso total (EPT) aumenta a medida que se incrementa el tamaño de partícula. En la remoción de metales pesados, el tezontle se ha estudiado para la adaptación de filtros en tratamientos terciarios donde se observó que a concentraciones de 9.41 meq/L (3 ppm) puede retener 1.4 meq/L la retención del cobre llevo a una saturación del material, infiriéndose por una disminución en la retención al llegar a una concentración de 16.01 meq/L, la retención del cobre tuvo buenos rendimientos y no se observó una saturación del material a las concentraciones de 12.4 meq/L [40,43].

Es así como el tratamiento del agua contaminada por metales pesados puede ser procesado de diversas formas, generalmente en el agua que lleva un tratamiento previo. Durante el proceso en el tratamiento de aguas residuales, esto es realizado en el tratamiento terciario para facilitar el proceso, evitando así que el agua tenga otros contaminantes que puedan interferir, reduciendo la eficiencia de los métodos para la eliminación de metales pesados en el agua [1].

### 2.2.3. Porosidad en el tezontle

En México, la roca volcánica conocida como tezontle es ampliamente utilizado como sustrato para la producción de hortalizas y flores en cultivos sin suelo; sin embargo, no se ha determinado el efecto del tamaño de partícula sobre las propiedades físicas. El tezontle tiene una proporción variable de porosidad ocluida, la cual se define como el volumen de poros cerrados que no tienen conexión con los poros externos y son los espacios que no pueden ser ocupados por agua y por lo tanto no interviene en la relación agua–aire del sustrato. El beneficio de este tipo de porosidad es que disminuye la densidad aparente del tezontle y facilita su manejo [28][42]. Se reportaron que en algunos casos se complica correlacionar el tamaño de partícula con algunas propiedades hídricas de los sustratos debido a la presencia de porosidad interna (porosidad ocluida) ya que ésta no permanece constante en los diferentes tamaños de partícula [28][42].

Las fracciones granulométricas del tezontle influyen en forma significativa sobre las características de densidad aparente, densidad real, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad. Los valores de densidad aparente y real aumentan a medida que disminuye el tamaño de partícula. Cuando el diámetro de partícula se reduce por debajo de 0.50 mm la capacidad de aireación se reduce significativamente. Los valores de espacio poroso total y porosidad ocluida se incrementan al aumentar el tamaño de partícula[38][42].

El espacio total del poro es determinado por la siguiente ecuación:

$$P\% = 100 - \frac{\rho_A}{\rho} \cdot 100$$

Donde:  $\rho_A$  es la densidad de la partícula,  $\rho$  es la densidad aparente seca

El porcentaje calculado incluye 2 tipos de porosidad: una relacionada con el espacio entre granos y otra promovida por las fracturas de la molienda, lo que permite un mayor espacio poroso debido a que los poros cerrados son expuestos a la superficie[38].

## 2.3. Carbón activado

El carbón activado es un término general que denomina a toda una gama de productos derivados de materiales carbonosos. El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. Es un producto obtenido a partir del carbón amorfo, el cual se ha sometido a un tratamiento de activación con el fin de incrementar su área superficial hasta 300 veces debido a la formación de poros internos, pudiendo alcanzarse áreas de 1200 -1500 m<sup>2</sup> /g de carbón [12].

El carbón activo es un material en forma de polvo muy fino que presenta un área superficial excepcionalmente alta y se caracteriza porque contiene una gran cantidad de microporos (poros inferiores a 2 nm de diámetro). El carbón activo puede tener un área superficial entre 500 y 2500 m<sup>2</sup>/g (una pista de tenis tiene 260 m<sup>2</sup>)[44]. Se denomina superficie específica al área de la superficie por unidad de masa (m<sup>2</sup>/g). Constituye la suma del área de la

superficie de todas las partículas que forman un gramo de material. En el caso de los carbones activados, la superficie de las partículas presenta una alta reactividad físico-química con el medio, lo que implica la existencia de fenómenos como la adsorción de cationes y moléculas de agua o variación de la carga eléctrica y de las fuerzas de atracción-repulsión entre partículas en función del pH, salinidad y temperatura del medio[45].

El carbón activado es un material que posee una estructura altamente porosa, es preparado artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiba un mayor grado de porosidad y superficie interna. Se prepara en la industria para que tenga una elevada superficie interna y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución. Por otra parte, el carbón es un adsorbente universal. Por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes)[12].

### **2.3.1. Propiedades**

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención. La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, pero la porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macro poros son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido[12].

Por otra parte, el carbón activado tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes), mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente [12].

### **2.3.2. Usos comunes**

- Potabilización de agua (el carbón retiene plaguicidas, grasas, aceites, detergentes, subproductos de la desinfección, toxinas, compuestos que producen color, compuestos originados por la descomposición de algas y vegetales o por el metabolismo de animales)
- Deodorización y purificación de aire (por ejemplo, en respiradores de cartucho, sistemas de recirculación de aire en espacios públicos, venteos de drenajes y plantas de tratamiento de agua, casetas de aplicación de pinturas, espacios que almacenan o aplican solventes orgánicos)
- Tratamiento de personas con intoxicación aguda (el carbón activado se considera el “antídoto más universal”, y se aplica en salas de urgencias y hospitales)

- Refinación de azúcar (el carbón retiene las proteínas que dan color al jugo de caña; el objetivo fundamental de este proceso es evitar que el azúcar fermente y se eche a perder)
- Decoloración de aceites vegetales (como el de coco), glucosa de maíz y otros líquidos destinados a la alimentación
- Decoloración y deodorización de bebidas alcohólicas (como vinos de uva y destilados de cualquier origen)
- Recuperación de oro (el oro que no se puede separar de los minerales por los procesos de flotación, se disuelve en cianuro de sodio y se adsorbe en carbón activado) [12][46].

### 2.3.3. Usos de carbón activado en remediación ambiental

Los enlaces entre el carbón y el adsorbato se llaman Fuerzas de London, que forman parte de las fuerzas de Van der Waals encontradas en la naturaleza. Por lo tanto, al ser un fenómeno que ocurre en la superficie, mientras mayor área superficial disponible tenga un sólido, mejor adsorbente podrá ser.

Ha demostrado ser un adsorbente eficiente para la eliminación de una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el medio ambiente acuático. Debido a sus áreas superficiales porosas que van desde 500 hasta 1.500 m<sup>2</sup>/g, así como la presencia de un amplio espectro de superficie funcional que la hace accesible a diferentes reactivos [34].

La adsorción en el carbón activado se debe a un desequilibrio de fuerzas que se genera en toda superficie formada por átomos de carbono. Este desequilibrio se debe a que los átomos de carbono tienden a formar sus cuatro enlaces perfectamente distribuidos en las tres coordenadas en el espacio. Ya que esto no sucede en los átomos de carbono que forman parte de la superficie sólida, éstos tienden a formar enlaces del tipo de Van der Waals, con las moléculas del fluido adyacente[46].

## 2.4. Metales Pesados

El término de metal pesado refiere a los elementos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Pertenecen a este grupo de elementos principalmente metales pesados, algunos semimetales, lantánidos y actínidos. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y zinc (Zn) [4]. Además de poseer alta densidad, son tóxicos o venenosos en concentraciones incluso muy bajas. Los metales más tóxicos son el mercurio, el plomo, el cadmio, el arsénico, el selenio (no metal) y los menos tóxicos: berilio y aluminio.

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénicas. En los suelos se pueden encontrar diferentes metales, formando parte de los minerales propios; como son silicio (Si), aluminio

(Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg). También puede encontrarse manganeso (Mn), que generalmente se presenta en el suelo como óxido y/o hidróxido, formando concreciones junto con otros elementos metálicos. Algunos de estos metales son esenciales en la nutrición de las plantas, así son requeridos algunos de ellos como el Mn, imprescindible en el fotosistema y activación de algunas enzimas para el metabolismo vegetal[4].

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos [4].

Los metales pesados pueden incorporarse a un sistema de abastecimiento de agua por medio de residuos industriales que son vertidos sin previos tratamientos, los que posteriormente se depositan en lagos, ríos y distintos sistemas acuíferos [6][4].

Las actividades geológicas naturales, como desgastes de cerros y volcanes, constituyen una fuente de aportaciones importante de metales pesados al suelo. También las actividades antropogénicas como la industria minera (ver Tabla 1), que está catalogada como una de las actividades industriales más generadora de metales pesados. En el suelo, los metales pesados, pueden estar presentes como iones libres o disponibles, compuestos de sales metálicas solubles o bien, compuestos insolubles o parcialmente solubles como óxidos, carbonatos e hidróxidos [47][4].

Los problemas de salud que pueden ser provocados por los metales pesados son variados, pueden ir desde efectos toxicológicos en el sistema nervioso central, renal, gastrointestinal cardiovascular y reproductivo que puede manifestarse en forma de náuseas, vómito, diarrea, disfunción renal, osteoporosis. Algunos de los metales más conocidos por los problemas de salud que generan son el antimonio que en exposiciones cortas puede causar náuseas, vómito, diarrea y es un agente carcinogénico [8,34].

Tabla 2. Actividades industriales generadoras de metales pesados [34].

INDUSTRIA	METALES	CONTAMINACIÓN DERIVADA
<b>Minería de metales Ferrosos</b>	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras
<b>Extracción de minerales</b>	As, Cd, Cu, Ni, Cr, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
<b>Fundición</b>	As, Cd, Pb, Tl	Procesado del mineral para obtención de metales
<b>Metalúrgica</b>	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Proceso térmico de metales

<b>Aleaciones y aceros</b>	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales. Relaves y Escoriales.
<b>Gestión de Residuos</b>	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
<b>Corrosión Metálica</b>	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
<b>Galvanoplastia</b>	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
<b>Pinturas y pigmentos</b>	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de pintura vieja
<b>Baterías</b>	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y aguas subterráneas
<b>Electrónica</b>	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuoso y sólido desde el proceso de fabricación y reciclaje
<b>Agricultura y Ganadería</b>	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas, planta de bioacumulación

### 2.4.1. Metales pesados en suelo

Las concentraciones anómalas que se presentan en un suelo pueden ser por causas naturales (por ejemplo, los suelos desarrollados con altos contenidos en elementos como Cr, Ni, Cu y Mn); los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de transformación de las rocas para originar a los suelos suelen concentrarse, pero, en general, sin rebasar los umbrales de toxicidad y además los metales pesados presentes en las rocas se encuentran bajo formas muy poco asimilables para los organismos. Las rocas ígneas ultrabásicas (como las peridotitas y las serpentinas) presentan los más altos contenidos en metales pesados, seguidas de las ígneas básicas (como los gabros y basaltos). Las menores concentraciones se encuentran en las rocas ígneas ácidas (como el granito) y en las sedimentarias (como las areniscas y las calizas). Los porcentajes más altos se dan para el Cr, Mn y Ni, mientras que el Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores cantidades, siendo mínimos los contenidos para el As, Cd y Hg [48].

### 2.4.2. Metales pesados en el agua

Los metales pesados como plomo, cadmio, cromo, zinc, mercurio entre otros, son liberados hacia ecosistemas acuáticos así como a los suelos principalmente debido a diversas actividades

antropogénicas y presenta una seria amenaza para las plantas, animales e incluso los humanos debido a su persistencia, bioacumulación, propiedad no biodegradable y su toxicidad incluso a bajas concentraciones. [49]

El mayor aporte a la contaminación de las aguas por metales pesados es debido a las descargas de aguas residuales producto de diversas actividades antropogénicas, principalmente de tipo industrial al no tener planta de saneamiento de aguas o un control sobre el vertedero de sus contaminantes terminan en los ríos y fuentes de agua cercanas, causando una contaminación enorme, dañando al ecosistema y a los seres humanos que viven cerca de estos lugares o que consumen agua y alimentos de este lugar, lo cual es de preocupar si consideramos que los niveles permisibles en el agua para consumo humano de metales como el mercurio, plomo y cromo son de 1.0 µg/L, 10 µg/L y 50 µg/L respectivamente según la legislación RD 140/03 y la NTC 183 [18], [19], mientras que se establece un valor máximo de 2.0 µg/L, 15 µg/L y 100 µg/L respectivamente según la agencia de protección ambiental de estados unidos (EPA)[49][50].

Es importante mencionar que en algunos casos existen aguas que sufren un proceso de enriquecimiento natural en metales pesados al atravesar acuíferos formados por rocas que los contienen en su composición, éstas al ser meteorizadas y lixiviadas son transportadas por flujos de agua superficial y subterráneas sean en condiciones anóxicas u oxidantes[51][50].

### **2.4.3. Movilidad de los metales pesados**

La toxicidad de los metales pesados depende de su movilidad en el medio, que a su vez, depende de su especiación química, persistencia y tendencia a bioacumulación en los seres vivos [52].

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías [48]:

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

## **2.5. Factores que afectan la acumulación y disponibilidad de los metales pesados**

### **2.5.1.pH**

La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, el pH tiene un importante efecto sobre la materia orgánica. El pH, es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. Si el pH es elevado entonces puede bajar la toxicidad metálica por precipitación como carbonatos e hidróxidos. La adsorción de los metales

pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo, y por tanto, también su solubilidad [48].

En la solución del suelo, las altas concentraciones de Aluminio ( $Al^{3+}$ ) e Hidrógeno activo ( $H^+$ ) dan lugar a la acidez del suelo. El pH (potencial de hidrógeno) es la medida del grado de acidez o alcalinidad de un suelo. Un pH de 7.0 indica neutralidad, pero a medida que este valor disminuye el suelo se vuelve más ácido, de manera que, un pH de 6.0 es diez veces más ácido que un pH de 7.0. El significado práctico del pH en términos de acidez del suelo, es que afecta significativamente la disponibilidad y la asimilación de nutrientes, y ejerce una fuerte influencia sobre la estructura del suelo[53].

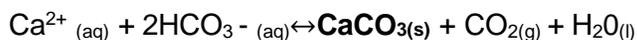
## 2.5.2. Dureza del Agua

Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad.

La unidad de medida de la dureza que se utiliza más habitualmente son los grados hidrométricos franceses ( $^{\circ} H F$ ), y el cálculo de este parámetro responde a la siguiente fórmula:

$$[(mg/l)Ca \times 2.5 + (mg/l)Mg \times 4.2]/10$$

La dureza del agua se debe a la presencia de sales de magnesio y calcio en el agua y depende fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua de forma previa a su captación. Las aguas subterráneas que atraviesan acuíferos carbonatados (calizas) son las que presentan mayor dureza y dichos acuíferos están formados por carbonatos de calcio y magnesio. Las aguas subterráneas procedentes de acuíferos con composición eminentemente silicatada (por ejemplo: granitos) dan lugar a un agua blanda, es decir, con cantidades muy bajas de sales de calcio y magnesio. Si el agua tiene una elevada dureza entonces existe baja toxicidad porque existe la formación de carbonatos insolubles mostrada en la siguiente reacción[54]:



También se presenta la adsorción de los metales en el carbonato y hay una baja biodisponibilidad de los metales. El calcio y magnesio principales cationes productores de dureza compiten con los metales por puntos activos en peces [48].

## 2.5.3. Materia Orgánica

La materia orgánica reacciona con los metales formando complejos y quelatos. Los metales una vez que forman quelatos o complejos pueden migrar con mayor facilidad. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas. Por eso algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu. La complejación por la

materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y la bioasimilación de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. También la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo [48].

La estabilidad de los complejos tiende a seguir la siguiente secuencia:

**Cu > Fe > Mn = Co > Zn**

#### **2.5.4. Condiciones Redox**

El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido, es decir:

- Cambio directo en la valencia de ciertos metales; por ejemplo, en condiciones reductoras el  $\text{Fe}^{3+}$  se transforma en  $\text{Fe}^{2+}$ , los iones reducidos son mucho más solubles.
- En segundo lugar, las condiciones redox pueden afectar indirectamente la movilidad de metales. Así muchos metales están asociados o adsorbidos a hidróxidos de Fe y Mn, estos no son estables a pH bajos y se convierten en  $\text{FeS}$  o  $\text{FeCO}_3$  dependiendo de las condiciones químicas, cuando esto ocurre los metales que estaban asociados con los hidróxidos de Fe y Mn se movilizan [48].
- En ambientes muy reductores el Fe se puede combinar con el  $\text{S}^{2-}$  hasta convertirse en pirita. Cuando los suelos y sedimentos contienen cantidades significantes de pirita se crean condiciones más oxidantes, el  $\text{S}^{2-}$  se oxida a  $\text{SO}_4$  liberando cantidades de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , el suelo se acidifica fuertemente y los metales se hacen muy solubles [48].

En definitiva, según la forma en la que se encuentre el metal retenido en el suelo, así será la disponibilidad relativa por las plantas y por tanto la incorporación en los organismos [48]. Se han registrado varias formas de extracción secuencial y se han dado muchas opciones, pero se necesitan solo de 5 pasos principales para ver la especiación [48]:

- Fase intercambiable.
- Unido a la parte de carbonatos.
- Enlazado a los óxidos de hierro y manganeso.
- Enlazado a la materia orgánica.
- Ligado a la materia mineral.

## 2.6. Técnicas de remoción de metales pesados convencionales

En la tabla 3 se muestran las técnicas de remoción de metales más conocidas y empleadas en diferentes industrias.

## 2.7. Técnicas de remoción no convencionales

Tabla 3. Técnicas de remoción de metales más conocidas y empleadas.

TÉCNICAS REMOCIÓN	DE	FUNCIÓN DE LA TÉCNICA
<i>Filtración membrana</i>	<i>por</i>	Es un método de separación física que permite separar moléculas de diferentes tamaños y características. Se emplea para tratar y recuperar sales metálicas de residuos generados en procesos galvanoplásticos, explotación y producción de hidrocarburos, en el reciclaje de aceites y en la producción alimentos.
<i>Electrodiálisis</i>		Capaz de remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante
<i>Osmosis Inversa</i>		Se utiliza para purificar el agua, elimina iones, moléculas, reduce las sales disueltas en agua, eliminando impurezas del agua haciéndolas pasar por membranas semipermeables
<i>Nanofiltración</i>		Proceso de filtración por membranas que suele utilizarse en aguas de bajos sólidos disueltos totales
<i>Adsorción convencional</i>		Empleados para remover colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre otros contaminantes orgánicos e inorgánicos generados por diferentes tipos de industrias. Ejemplo: Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, Zeolitas, perlas de sílice
<i>Nanotubos Carbono</i>	<i>de</i>	Un nuevo tipo de adsorbentes debido a su capacidad excepcional para la eliminación de diversos contaminantes inorgánicos y orgánicos, y radionucleidos a partir de grandes volúmenes de aguas residuales. Separa contaminantes de un peso específico como: permitiendo la eliminación de TOC, nitratos, herbicidas, durezas, hierro,
<i>Precipitación Química</i>		Se usa para reducir la concentración de metales en el agua residual a valores que no causen preocupación.
<i>Fotocatálisis en la degradación de metales pesados</i>	<i>de</i>	Se degradan moléculas orgánicas colorantes y metales pesados. Por medio de la transferencia de carga a través de la interfaz entre el semiconductor y la solución acuosa contaminada. Donde la conductividad aumenta con la temperatura, y se genera un par de electrón-hueco, ocurriendo la adsorción de los fotones y la distribución de diferentes estados electrónicos en la superficie

<i>Flotación</i>	El proceso de flotación ion se basa en impartir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas mediante el uso de agentes activos de superficie (tensoactivos) y la posterior eliminación de estas especies hidrófobas por burbujas de aire
------------------	---

Existen algunas técnicas de remoción que no son convencionales, es decir, algunas están en procesos de investigación y algunas otras no son conocidas, en la Tabla 4 mostramos algunas técnicas y su descripción.

Tabla 3. Técnicas de remoción no convencionales [34]

<b>TÉCNICA DE REMOCIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA</b>
<i>Adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes</i>	Se emplea una amplia variedad de materiales biológicos, como las bacterias, algas, levaduras y hongos, los cuales han recibido una atención creciente para la eliminación y recuperación de metales pesados, debido a su buen rendimiento, bajo coste y grandes cantidades disponibles
<i>Fitorremediación</i>	El uso de las plantas y los microbios del suelo asociados para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en los ambientes. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como rentable, eficiente, y amigable con el medio ambiente.
<i>Biopolímeros</i>	Son industrialmente atractivos porque son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros. Poseen un número amplio de diferentes grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminas, que aumentan la eficiencia de la absorción de iones metálicos.
<i>Hidrogeles</i>	Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales. Diversos hidrogeles se han sintetizado e igualmente investigado su comportamiento de adsorción de metales pesados.
<i>Ceniza Volante</i>	Las cenizas volantes, generadas durante la combustión de carbón para la producción de energía, es un subproducto industrial que es reconocido como un contaminante ambiental, debido a su enriquecimiento en elementos traza potencialmente tóxica que se condensan del gas de combustión.

## 2.8. Termodinámica de la adsorción

La adsorción es el proceso mediante el cual un sólido poroso (a nivel microscópico) es capaz de retener partículas de gas en su superficie tras entrar en contacto con éste. El adsorbente dispone de nanoporos, lo que se conoce como centros activos, en los que las fuerzas de enlace entre los átomos no están saturadas. Estos centros activos admiten que se instalen moléculas de naturaleza distinta a la suya, procedentes de un gas en contacto con su superficie. La figura 4 muestra un esquema de comparación entre la adsorción, absorción e intercambio iónico. En la adsorción a diferencia de los demás procesos mencionados existe una interacción que puede ser física (fisisorción) o (química) entre el adsorbente y el adsorbato. La adsorción es un proceso de transferencia de masa por el cual una sustancia se transfiere desde la fase líquida a la superficie de un sólido. El proceso de sorción describe en realidad un grupo de procesos, que incluyen la adsorción y las reacciones de precipitación. La adsorción es un proceso exotérmico y se produce por tanto de manera espontánea si el adsorbente no se encuentra saturado. La aplicación más importante de la termodinámica de la adsorción es la de calcular los equilibrios de fase entre un sólido adsorbente y una mezcla gaseosa, por simplicidad sólo se toma en consideración gases puros (monocomponentes) [48].

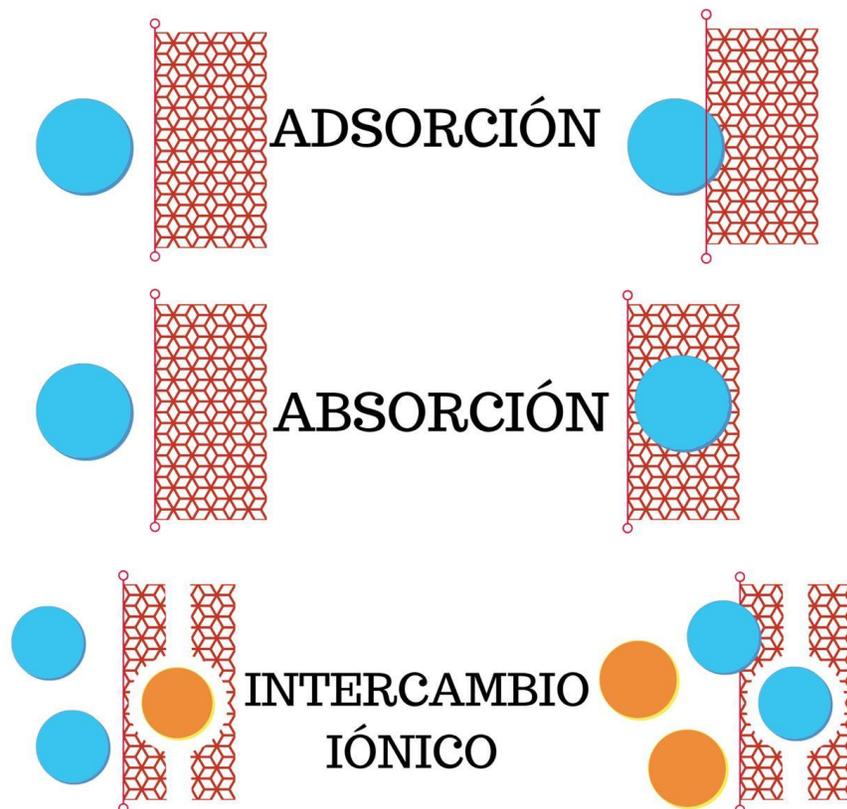


IMAGEN DE ELABORACIÓN PROPIA.

Figura 4. Diferentes tipos de sorción [48].

En resumen, podemos decir que la adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen. En química, la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie interfacial entre dos fases. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido.

La base de todo este cálculo son las isotermas de adsorción, las cuales dan la cantidad de gas adsorbido en los nanoporos como una función de la presión externa (del gas). La termodinámica sólo puede aplicarse a las isotermas de adsorción en el equilibrio. Esto significa que se debe poder llegar a cualquier punto de la curva elevando o disminuyendo la presión; en otras palabras, las curvas de adsorción y desorción tienen que coincidir. Esto ocurre sólo si no existe histéresis. La histéresis no se da en poros menores de 2 nm, sin embargo, se observa en poros lo suficientemente grandes como para que en su interior se condense gas para formar líquido [48].

### 2.8.1. Isotermas de adsorción

Una isoterma de adsorción, es la relación general entre la cantidad de gas adsorbido por un sólido, a temperatura constante como función de la presión del gas. También puede definirse como la relación en el equilibrio entre la cantidad de gas adsorbido y la presión del gas a temperatura constante[57].

Las isotermas nos permiten estimar el grado de purificación que puede ser alcanzado, la cantidad de adsorbente requerido, y la sensibilidad del proceso respecto a la concentración del producto[58].

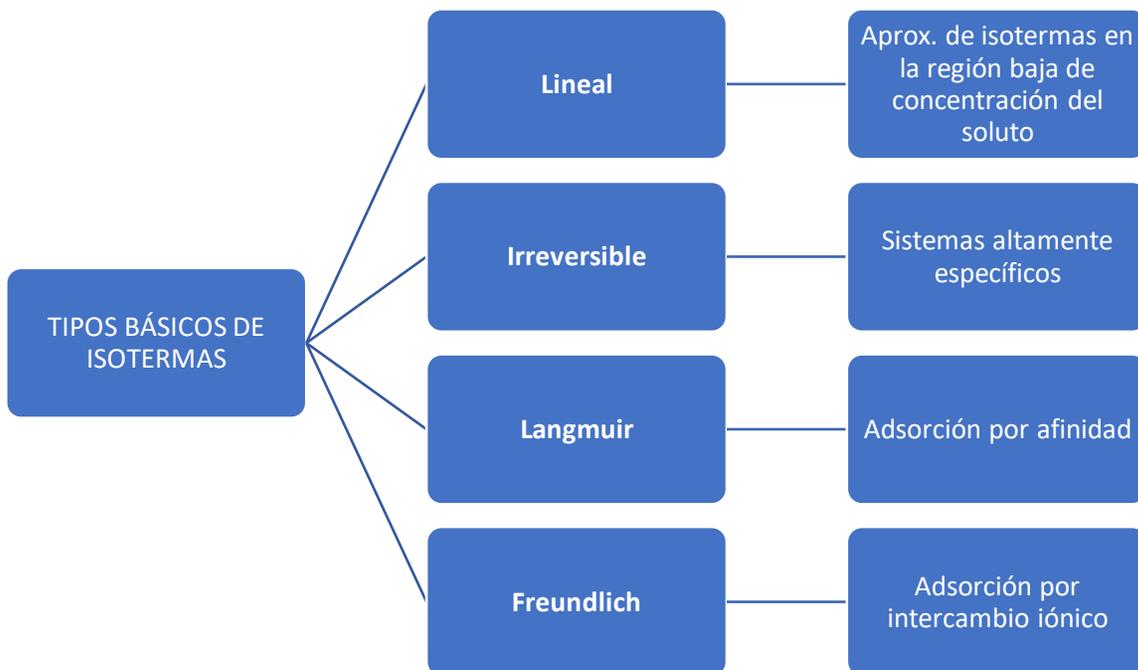


Figura 5. Tipos básicos de isotermas [58]

La isoterma de adsorción para un gas puro es la relación entre la cantidad adsorbida específica  $n$  (moles de gas por kilogramo de sólido) y  $P$ , la presión exterior de la fase gaseosa. La mayor parte de isotermas se pueden ajustar mediante una ecuación de Virial modificada[59]:

$$P(n) = \frac{n}{K} \left[ \frac{m}{m-n} \right] e^{[C_1n + C_2n^2 + C_3n^3 \dots]} \quad \text{para } n < m \text{ [59]}$$

### 2.8.2. Isotermas de adsorción de Langmuir

Es un modelo teórico, el cual describe los datos experimentales producidos en el equilibrio de las superficies homogéneas, se utiliza para estimar la capacidad máxima de adsorción en la que se considera:

- A. La superficie del adsorbente que presenta sitios energéticos homogéneos.
- B. Solamente una molécula puede ser adsorbida en un sitio y la adsorción sucede en una monocapa.
- C. No existen interacciones entre las moléculas adsorbidas [60].

La ecuación de Langmuir lineal se representa:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L} + \frac{a_L}{K_L} C_e$$

Donde:  $q_e$  es la concentración de soluto adsorbido por unidad en peso de adsorbente (mg/g);  $C_e$ , concentración de soluto en equilibrio (mg/L);  $a_L$ , constante relacionada con el calor de adsorción;  $K_L$ , constante de Langmuir (L/g) [60].

### 2.8.3. Isotermas de Freundlich

Es un modelo empírico, que representa el proceso de adsorción no ideal de formación de multicapas en superficies heterogéneas; considerando que los sitios de adsorción son ocupados primero por enlaces fuertes y que la fuerza del enlace decrece al incrementar la ocupación de sitios de adsorción [60]; el modelo se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\ln q_e = \ln K_F + b_F \ln C_e$$

$$b_F = \frac{1}{n}$$

Donde:  $q_e$  es la cantidad de soluto adsorbido por unidad de peso del adsorbente en el equilibrio (mg/g);  $C_e$ , concentración en equilibrio de la fase líquida (mg/L);  $K_F$  indica la capacidad de adsorción en la fase de la solución (L/g);  $n$ , medición de la magnitud acumulativa y de la energía asociada con una reacción de adsorción particular [60].

## **2.9. Filtros para agua**

### **2.9.1. Diferencia entre filtración y purificación de agua**

La diferencia es que un proceso de *purificación* es el que elimina impurezas no deseadas del agua por adsorción, destilación, radiación UV o intercambio iónico como ya lo mencionamos; y un proceso de *filtración*, solo impide el paso de las partículas sólidas a través de un filtro o malla, mientras el líquido fluye a través de él. Los filtros de membrana muy finas (microfiltración, ultrafiltración u ósmosis inversa) pueden retener virus, bacterias, sales y minerales. En pocas palabras, cuando hay elementos naturales o añadidos ya sean disueltas o microscópicas en el agua como un contaminante, se considera realizar una *purificación*, y cuando hay sedimentos o impurezas sólidas se considera una *filtración* [61].

### **2.9.2. Filtros de Arena**

La filtración del agua para beber en los hogares, a través de filtros de arena, es un método generalmente conocido en la mayoría de los países latinoamericanos. Sin embargo, solamente un número limitado de personas lo han practicado. La llegada de los suministros por tubería disuadió su uso. Este tipo de filtración no elimina normalmente las bacterias o los virus, pero puede eliminar la turbiedad, los quistes y protozoarios [62]. Cuando se utilizan debidamente, los filtros de arena domésticos pueden funcionar eficazmente aún con agua ligeramente turbia como tratamiento preliminar antes de hervirla o desinfectarla. Un filtro de arena doméstico debe tener una capa de arena fina de unos 60 cm o más. Debe funcionar continuamente (24 horas diarias) porque es importante que la arena no se seque y, en general, debe limpiarse y mantenerse como un filtro de arena lento regular.

### **2.9.3. Filtros de cerámica**

Este tipo de filtro se puede obtener en el comercio y se emplea en cantidades limitadas en la mayoría de los países. Algunos filtros son de presión y otros de gravedad. En todos ellos el componente esencial es la vela que puede ser de diferentes materiales cerámicas que proporcionan distintos tamaños de poro. El agua que se va a filtrar tiene que estar relativamente limpia ya que, de lo contrario, la vela se tapanía rápidamente.

El tamaño de los poros determina la eficacia en la eliminación de los microorganismos o de partículas en suspensión. Estos filtros pueden extraer quistes, protozoarios y larvas, así como partículas en suspensión, pero es posible que no se eliminen las bacterias ni los virus, requiriéndose que el agua se hierva o se desinfecte antes del consumo. Los filtros de porcelana pueden fabricarse con poros de pequeño tamaño. Para lograr eficazmente la purificación del agua, se estima que el radio máximo del poro debe ser de 1.5  $\mu\text{m}$ . El filtro

tipo Berkefeld, o similares, se fabrica con tierra de trípoli y los que tienen poros de pequeño tamaño pueden eliminar las bacterias que se encuentran corrientemente en el agua. En general, es importante comprender las limitaciones de estos filtros para emplearlos eficientemente en el tratamiento del agua potable [63].

#### 2.9.4. Materiales para hacer un filtro de agua casero

Los siguientes materiales son una lista básica de los artefactos necesarios para la creación de un filtro de agua clásico para la reutilización del agua contaminada o sucia. Son muy fáciles de conseguir, tanto para los que vivimos en zonas rurales como urbanas.

- Un contenedor plástico de aproximadamente un metro de altura.
- Arena gruesa conocida como grava.
- Arena fina y limpia.
- Piedras pequeñas.
- Piedras medianas.
- Carbón activado.

En la figura 6 podemos observar uno de los filtros más comunes que se realizan en las localidades urbanas, los filtros de bioarena [64]. El filtro de bioarena (FBA) es una adaptación del filtro lento de arena tradicional utilizado para el tratamiento de agua en las comunidades por casi 20,000 años. Este nuevo filtro de bioarena es más pequeño y está adaptado para darle un uso continuo, lo cual lo hace muy apropiado para tenerlo en casa. El contenedor del filtro puede estar hecho de hormigón o plástico, el cual se llena con capas de arena y grava especialmente seleccionada y preparada para este fin [65].

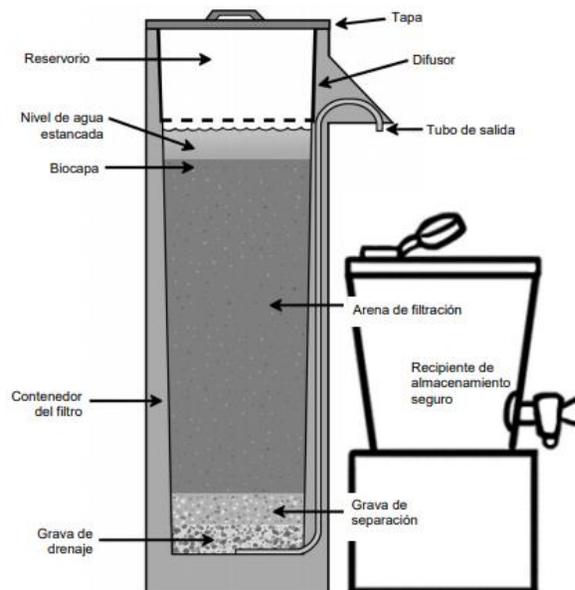


Figura 6. Ejemplo de filtro bioarena [65].

Función de cada parte del filtro:

- **Tapa:** La tapa hermética evita la contaminación y el ingreso de plagas indeseables.
- **Reservorio:** es parte de arriba del filtro, donde el agua es vertida
- **Difusor:** Evita alterar la capa de arena de filtración y protege la biocapa cuando se vacía agua en el filtro.
- **Nivel de Agua estancada:** Esta capa de agua protege el nivel superior de la arena y la biocapa contra la fuerza del agua que cae.
- **Contenedor de Filtro:** El contenedor puede estar hecho de hormigón o plástico. Puede ser cuadrado o redondo. En él está la arena, la grava y el agua.
- **Capa de arena de filtración:** Extrae los patógenos y los sólidos suspendidos (suciedad del agua). La arena se debe preparar correctamente para que el filtro funcione.
- **Biocapa:** La biocapa se desarrolla en la capa superior de la arena (hasta 1-2 cm de profundidad), donde viven pequeños microbios los cuales se comen los agentes patógenos.
- **Grava de separación:** La grava pequeña previene que la arena se mueva hacia abajo y bloquee el tubo de salida.
- **Grava de drenaje:** La grava gruesa bloquea el tubo de salida
- **Tubo de Salida:** El agua que sale del tubo de salida es buena para beber. El tubo puede ser fabricado de plástico o cobre.
- **Almacenamiento Seguro:** contenedor de almacenamiento seguro para recoger el agua cuando fluya del tubo de salida [65][48].

## FILTRO LENTO DE ARENA

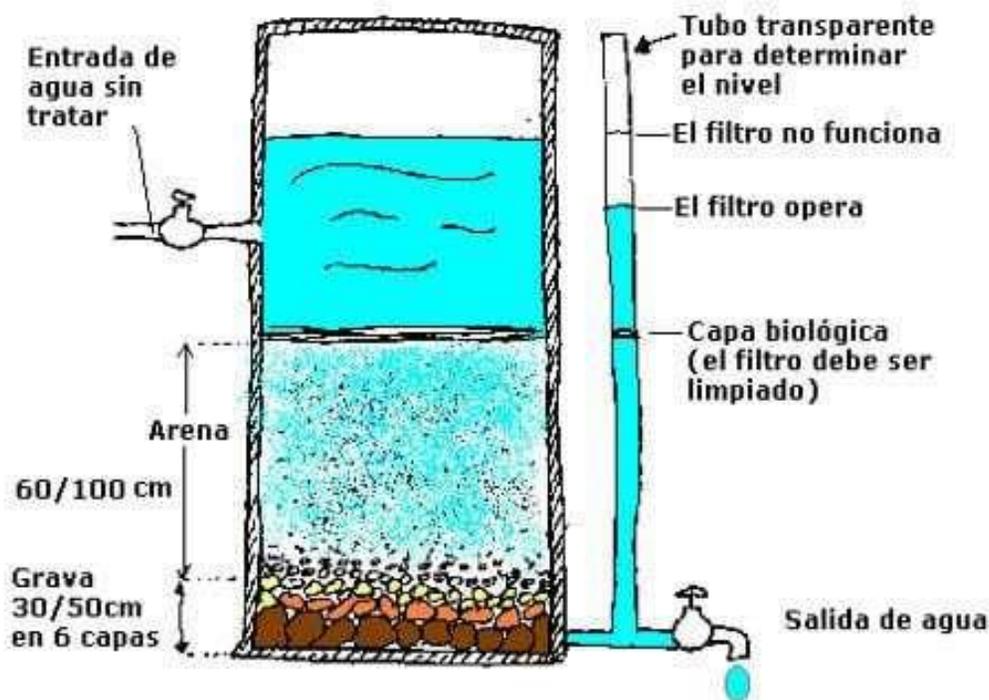


Figura 7. Ejemplo de Filtro lento de Arena. Imagen extraída de los cuadernos de Permacultura de Antonio Urialdes [48].

En la Figura 7 se muestra uno de los filtros caseros más populares, la estructura básica del filtro lento de arena es muy elemental. Básicamente, sólo se requiere de una caja o tanque, un lecho filtrante de arena, tuberías de drenaje y dispositivos de regulación y control. El tanque, a menudo hecho de concreto, puede construirse como una caja abierta o cerrada, dependiendo de los factores climáticos, así como otros factores; por ejemplo, en el caso de haber un clima frío es preferible usar una caja cerrada, ya que las bajas temperaturas disminuyen el rendimiento del proceso[66].

Las capas de arena se colocan gradualmente de acuerdo con sus tamaños de grano: granos más bien gruesos en el fondo y granos finos en la parte superior (rango de tamaño 0.15-0.30 mm de diámetro)[66][67].

En la figura 8 se muestra un ejemplo de filtro casero y el orden de sus capas. Este es el modelo de filtro en el que nos basamos ya que es el más completo y con materiales fáciles de conseguir para cualquier persona. Los cuales deben acomodarse de la siguiente manera (figura 8):

1. Algodón.
2. Carbón activado.
3. Arena fina.
4. Arena gruesa.
5. Grava o piedras de tamaño medio o pequeño[68].



Figura 8. Filtro casero de Agua compuesto por diversas capas [68].

#### **Función de cada una de las capas:**

**Arena, grava, carbón activado, piedra de río.** La Arena, grava, se adquirieron en una tienda de materiales de construcción. Las piedras de río se obtuvieron en un río ubicado en la carretera Federal Iguala-Taxco. El carbón activado lo obtuvimos en una empresa purificadora. La **arena, grava y piedras de río** son los encargados de retener las partículas sólidas en suspensión así como permitir que el agua filtrada fluya hacia el drenaje[69].

El **carbón activado** tiene como función retener impurezas y contaminantes por adsorción. Actúa atrapando impurezas en el agua como solventes, residuos industriales y otros productos químicos, dado que también remueve los contaminantes que generan olores, logra que el agua potable tenga un mejor sabor [70].

**Algodón:** es la última capa del filtro, ayuda a retener partículas que no se quedaron retenidas en las otras capas.

## **2.10. Clases y composición de los sistemas de filtración caseros**

### **2.10.1. Los filtros BSF**

Han sido fabricados generalmente con una capacidad de almacenamiento de 25 L de agua, con diferentes capas de materiales. La primera capa de la parte inferior está constituida por grava (5 cm) con un tamaño de partícula de 7.5 mm, seguido por una segunda capa de 5 cm de arena (tamaño de partícula 0.95mm. Una tercera capa está compuesta de zeolita con un espesor de 2.5 cm y la última contiene arena muy fina de 0.3 mm (espesor 2.5 cm). Se ha determinado que la zeolita tiene una alta eficiencia en eliminación de químicos y bacterias indicadoras en agua residuales. Una vez ensamblado el filtro se procede a lavar el sistema con agua hasta alcanzar una turbidez menor de 1 unidades nefelométricas de turbidez (UNT), después de la medición. Este dispositivo es capaz de filtrar 171 L/h [71].

### **2.10.2. El filtro de bioarena modificado (MBSF)**

A diferencia del filtro BSF, contiene una capa de arena recubierta con óxido de hierro, la cual permite calentar el agua por reacción exotérmica, eliminando un mayor número de microorganismos y materiales en suspensión [72].

### **2.10.3. Los filtros BF**

Han sido fabricados comúnmente mediante el empleo de dos cubetas o baldes. La primera cubeta contiene una capa de 2 cm de grava y una capa de arena fina de 5 cm. La parte inferior de la primera cubeta contiene perforaciones de pequeños agujeros que permiten el paso del agua hacia una segunda cubeta que envuelve la primera y sirve como recipiente para recoger el agua filtrada que sale por medio del grifo. La capacidad de filtración es de 167 L/h [71].

### **2.10.4. Filtros caseros de vela cerámica**

Estos pueden ser fabricados en la vivienda utilizando dos baldes de 20 litros cada uno, los cuales se colocan uno sobre la tapa del otro, de manera que el balde superior contenga las dos velas filtrantes. La base del balde superior y la tapa del balde inferior, se perforan dos agujeros coincidentes, donde se insertan las espigas de las velas filtrantes. Entre la base del balde superior y la tapa del balde inferior se colocan anillos de plásticos coincidentes con las espigas de las velas con el fin de darle mayor rigidez y evitar la fuga de agua [71]. Al balde inferior se le instala un grifo a unos 3 centímetros sobre el fondo, para extraer lateralmente el agua filtrada[73]. En la **Figura 9** podemos observar el filtro casero de vela cerámica y los pasos que se siguen para poder construirlo[72].



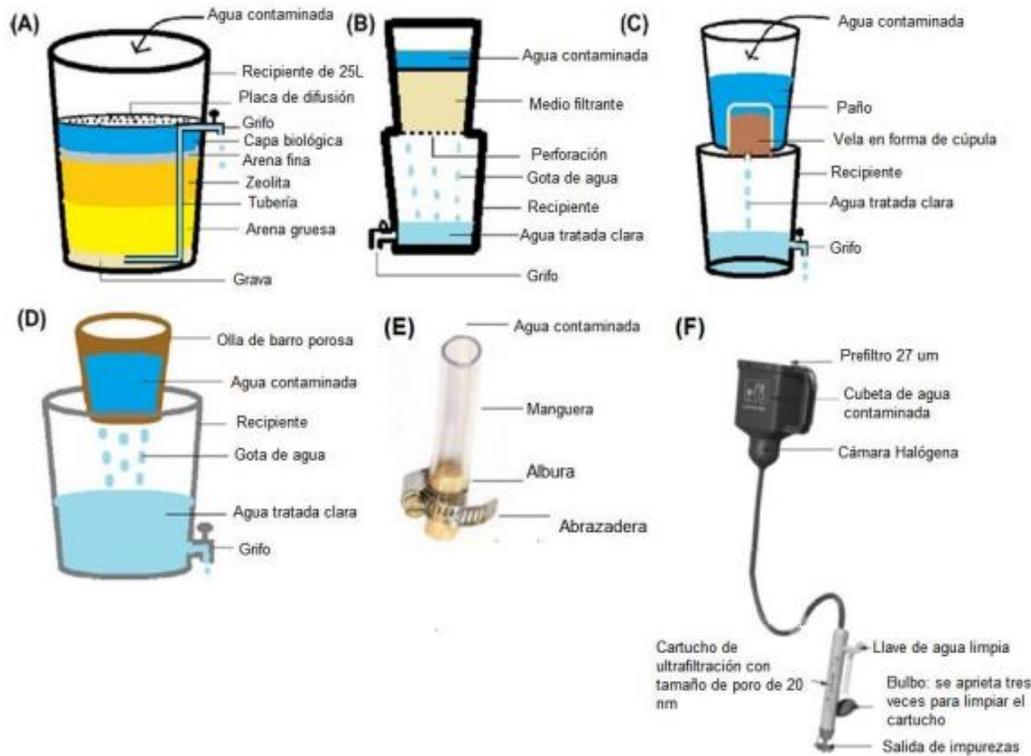
*Thomas F. Clasen. London School of Hygiene & Tropical Medicine. Keppel St., London WC1E 7HT, United Kingdom. Tomado de (RAS, TÍTULO J, Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural, 2010)*

Figura 9. Filtros de vela cerámica de fabricación casera [72].

### **2.10.5. Los filtros CCF**

Están constituidos por moldes cilíndricos huecos asegurados al fondo de un recipiente, los cuales son fabricados con arcilla mezclada con un material combustible como el aserrín, cáscaras de arroz o de café y en algunos casos se le adiciona plata coloidal. Una vez se funden estos materiales funcionan en forma de red de poros finos (0.6 - 3  $\mu\text{m}$ ) que va a servir de filtro. La eliminación de los patógenos se da por medio de procesos físicos como filtración mecánica y adsorción. Este filtro tiene una capacidad de filtración de 6.4 L/h y se presume que tiene una eficacia hasta del 100% si se adiciona plata coloidal. La plata coloidal actúa como agente antimicrobiano[65][72].

En la figura 10 se muestran los diferentes tipos de filtros de agua caseros más utilizados, los filtros A), B), C) son filtros sencillos, más accesibles y fáciles de construir; los filtros D), E), F) son filtros más especializados y no todos pueden tener acceso a ellos.



Ahamed y Komal., 2011

Figura 10. Composición de los sistemas de filtración casera. (A)Filtro de bioarena, (B)Filtro cubos, (C)Filtros de Vela de cerámica, (D)Filtro poroso impregnado de plata coloidal SIPP, (E)Filtro cilema, (F)Filtro de membrana [72].

### 2.10.6. El filtro SIPP

Es fabricado de arcilla de color marrón e impregnado con nitrato de plata, después de la cocción de la olla de barro. Este filtro tiene la capacidad de filtrar 3.5L/h. El nitrato de plata funciona como antimicrobiano evitando la proliferación bacteriana al interior del filtro [71].

### 2.10.7. El filtro de matriz estructurada

Está compuesto principalmente por carbón activado el cual absorbe el yodo residual y demás compuestos químicos, permitiendo mejorar principalmente el sabor del agua. Además, ayuda a la remoción de microorganismos[74][34]. Estudios realizados por Boutilier han probado la eficacia que tiene la madera de pino en la filtración de agua usando el xilema, un tejido vegetal lignificado de conducción que transporta líquidos de una parte a otra de las plantas vasculares[75]. Es un sistema rápido, fácilmente disponible y económico. El filtro consiste en una rama de pino (sin corteza), la cual es pegada a un tubo de manguera plástica y ajustada mediante una abrazadera metálica. Aproximadamente 3 cm<sup>3</sup> de albura que es la parte joven de la madera, se encuentra casi en el exterior de los troncos, es la

antecesora de la corteza; pueden filtrar el agua a razón de 0.16L/h, suficiente para satisfacer las necesidades de agua potable de una persona [73].

### **2.10.8. Filtros de Arcilla**

Es un dispositivo de tratamiento de agua casera, de muy bajo costo, que potabiliza agua contaminada. Este elemento filtrante puede ser fabricado por ceramistas, con materiales comunes, sin tecnologías de alto nivel. Por su estructura permite eliminar la turbidez y por su microporo evita el pase de bacterias.

### **2.10.9. Filtro de Arcilla con plata coloidal.**

Filtro hecho a base de arcilla, aserrín y plata coloidal. Estos de filtros son utilizados normalmente en Sudamérica.

#### **Fundamento Teórico.**

El filtro de arcilla funciona de dos maneras:

- *Por filtración:* Los protozoarios, helmintos, bacterias y algunos virus se atrapan en los poros del filtro.
- *Por efecto microbicida:* Las bacterias se desactivan al contacto con la plata coloidal y son incapaces de reproducirse, previniendo el crecimiento del mismo elemento.

Es un filtro que permite la purificación debido al uso de la plata coloidal que es distribuida a través del filtro de arcilla, el agua fluye hacia abajo, por los lados, hasta gotear al fondo, atrapando los microbios que entran en contacto con la plata coloidal, sin poner en riesgo la salud, pues la plata se considera un material no tóxico [61].

Henry Crooks, demostró que la plata coloidal es altamente germicida y a la vez es no tóxico para el ser humano, tiene un pH de 6.5 la concentración es de 3 a 5 mg/l. La plata coloidal es un poderoso destructor de gérmenes cada vez más popular en todo el mundo: es barata, efectiva y se prepara con facilidad. Este poderoso antibiótico de amplio espectro inactiva las enzimas de todas las células bacterianas, hongos y virus que éstas usan para su metabolismo del oxígeno [76].

Los coloides son partículas microscópicas suspendidas en líquido. La plata es convertida a plata coloidal a través de una electricidad positiva o puramente plata suspendida en agua. La medida de la partícula de pasta coloidal es generalmente entre 0.015 y 0.005 micrones. La plata viene a hacer una carga positiva iónica.

El aserrín de madera empleado, el que se mezclará con el resto de los componentes hasta formar la pasta plástica, se lo utilizará tamizado, de manera que, al ser incinerado, quedan poros medianos, finos y superfinos.

El agua atraviesa gota por gota las capas de materiales naturales con Al filtrar cada poro se rellena con el agua proveniente del interior del filtro y éste pasa al poro vecino por la

presión hidrostática natural, atravesando la pared de cada poro para pasar al contiguo y así salir al exterior donde se produce el goteo[76].

## 2.10.10. Filtros y purificadores de agua para el hogar en el mercado

Existen diferentes tipos de filtros especiales para tenerlos en casa, unos incluso poseen estructuras muy tecnológicas y modernas a simple vista, pero no sólo es la apariencia, si no la función que realizan. Una desventaja muy grande de este tipo de filtros es que no tienen la capacidad de remover los metales pesados que se encuentran en el agua y los que tienen esta propiedad son bastante costosos, por lo que no todos tienen acceso a este tipo de filtros.

En la actualidad hay una clasificación para los filtros de agua caseros, entre ellas se encuentran los siguientes:

- **Jarras de agua** – se llenan con agua del grifo que se filtra para su uso instantáneo o se deja en el refrigerador para mantenerse fresca [77].
- **Filtros de agua para grifo** – se instalan directamente en el grifo y por lo general tienen un interruptor para activar y desactivar el filtrado.
- **Filtros de agua de encimera** – se conectan al grifo o independientemente para ser llenados y después filtran el agua. P.ej. Pure it, Berkey y Propur[77].
- **Filtrado bajo la encimera** – filtran el agua específicamente para el uso de la cocina, con ciclos de reemplazo de 3 a 12 meses. P.ej. Culligan y 3M[77].
- **Sistema de filtración de agua para todo el hogar** – filtran toda el agua entrante a la casa: agua de la cocina, electrodomésticos, baño y ducha. P.ej. PureEffects, 3M, GE, Aquasana.
- **Filtros de agua de ducha** – filtran el agua que se utiliza para bañarse y para el uso en los sanitarios [77].

Existen diferentes tipos de purificadores y métodos de filtración, los más comunes son los descritos en la tabla 5 [77]. En esta tabla se presenta el método de purificación o filtración, su descripción y lo que elimina. Existen diferentes tipos de filtros y purificadores en el mercado, los más comunes se muestran en este apartado. Una de las desventajas sobre estos filtros es que no poseen la característica de poder eliminar o remover los metales pesados que se encuentran en Agua y sus costos superan los \$3000 mxn, además de que son difíciles de conseguir, la manera más fácil de obtenerlos es vía internet, pero la mayoría de las personas que los necesitan, viven en zonas rurales ó remotas, en las cuales no hay internet ó las paqueterías no llegan, razón por la cual no todas las personas tienen acceso a este tipo de aparatos [77].

Tabla 4. Tipo de purificadores de agua y sus funciones [77].

<b>Garrafa en la nevera</b>	Para deshacerse del cloro, el método más sencillo es dejar una jarra de agua sin filtrar en la nevera durante toda la noche.	Aproximadamente el 80-90% del cloro se evapora.
-----------------------------	--	---

	Generalmente la mayor parte del cloro se evapora en 12-24 horas.	
<b>Carbón activado granular (GAC)</b>	El <u>carbón activado</u> granular se hace de materiales orgánicos (tales como cáscaras de coco o carbón) que son altos en carbono. El carbono es probablemente el material más absorbente conocido por el hombre, y es tan eficiente debido a miles de poros pequeños que pueden absorber las impurezas. Algunos también utilizan medios secundarios como la plata para evitar el crecimiento de bacterias.	Los filtros de carbón activado vegetal son los más eficaces para eliminar el cloro, los sedimentos, los compuestos orgánicos volátiles (COV), el sabor y el olor del agua. Elimina la mayor parte de las bacterias. No son eficaces en la eliminación de minerales, sales y compuestos inorgánicos disueltos.
<b>Osmosis inversa (OI)</b>	Comúnmente conocido como <u>Osmosis Inversa (OI)</u> , es un proceso en el que se desmineraliza o desioniza el agua empujándola bajo presión a través de una membrana de ósmosis inversa semipermeable. Los filtros OI se suelen combinar con un filtro de carbón activo para atrapar productos químicos orgánicos y cloro antes de la membrana OI.	Capaces de eliminar más del 99% de las sales disueltas (iones), partículas, coloides, orgánicos, bacterias y pirógenos del agua (aunque no se debe confiar en un sistema de OI para eliminar el 100% de bacterias y virus).
<b>Osmosis inversa (OI)</b>	Comúnmente conocido como <u>Osmosis Inversa (OI)</u> , es un proceso en el que se desmineraliza o desioniza el agua empujándola bajo presión a través de una membrana de ósmosis inversa semipermeable. Los filtros OI se suelen combinar con un filtro de carbón activo para atrapar productos químicos orgánicos y cloro antes de la membrana OI.	Capaces de eliminar más del 99% de las sales disueltas (iones), partículas, coloides, orgánicos, bacterias y pirógenos del agua (aunque no se debe confiar en un sistema de OI para eliminar el 100% de bacterias y virus).
<b>Purificador de agua UV</b>	Los sistemas de purificación de agua UV utilizan lámparas especiales que emiten luz UV de una longitud de onda particular que tiene la capacidad, en función de su longitud, de alterar el ADN de los microorganismos. A medida que el agua pasa a través de un sistema de tratamiento de este tipo, los organismos vivos del agua están expuestos a la luz UV que ataca el código genético del microorganismo y reorganiza el ADN / ARN, eliminando la capacidad del microorganismo de funcionar y reproducirse. Normalmente los filtros UV se combinan con otro filtro, como el carbón activo.	Eliminan el 99,99% de las bacterias y virus que pueden estar presentes en el agua del grifo.
<b>Ozono</b>	Un sistema de hogar que es muy similar a los utilizados en los municipios, excepto que su escala es mucho menor. Son sistemas que incluyen una bomba de recirculación, un generador de ozono, un tanque de reciclaje de agua y un respiradero de línea de ozono. Los purificadores de agua potable de ozono generalmente se encuentran en la toma de agua para el hogar, entre la toma y el tanque de almacenamiento. El ozono también utiliza luz UV, pero en este caso para crear	El ozono elimina eficazmente el 99% de todos los patógenos biológicos incluyendo Giardia y Cryptosporidium. También es eficaz en la eliminación de hierro y manganeso, así como la liberación de cloro para eliminar aún más microbios si se utiliza en un sistema de múltiples pasos.

	moléculas de oxígeno inestables. Asimismo, se combina a menudo con la filtración del carbón activado para lograr un tratamiento de agua más completo.	
<b>Intercambio iónico</b>	En el proceso de intercambio de iones, a través de materiales de resina esférica similares a un cordón (resinas de intercambio iónico), los iones en el agua se intercambian por otros iones fijados al cordón. Los dos métodos más comunes de intercambio iónico son el ablandamiento y la desionización. La desionización se usa generalmente en combinación con filtros de carbón activado. El ablandamiento se utiliza principalmente antes de los filtros OI.	El uso primario es para ablandar el agua y reducir los contaminantes. Generalmente se utiliza en combinación con carbón activado o un filtro OI. También comercializado con frecuencia para hacer el agua alcalina (nivel de pH por encima de 7) y, por tanto, más saludable para el cuerpo.
<b>Destilación</b>	El agua se calienta hasta la ebullición. Entonces el vapor de agua sube a un condensador donde el agua se enfría y baja la temperatura, el vapor se condensa, se recoge y se almacena. La mayor parte de los contaminantes permanecen en el recipiente de la fase líquida.	Elimina la mayor parte de los contaminantes. La destilación se utiliza principalmente en procesos industriales.
<b>Hirviendo</b>	No es realmente un sistema de filtrado, pero es utilizado por muchas personas como un último recurso. Y es por eso que hemos creído conveniente añadir este sistema en nuestra guía de filtros de agua.	Hervir el agua es el método más eficaz para matar los microbios causantes de enfermedades, incluidos los virus, las bacterias y los parásitos

## 2.11. Técnicas de caracterización

### 2.11.1. Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una de las técnicas comunes para obtener imágenes de la microestructura y la morfología de los materiales. En SEM, un haz de electrones con baja energía se irradia al material y escanea la superficie de la muestra. Varias interacciones diferentes ocurren cuando el haz alcanza y entra al material, lo que conduce a la emisión de fotones y electrones desde o cerca de la superficie de la muestra [78]. Para formar una imagen, las señales de recepción producidas a partir de las interacciones electrón-muestra se detectan con diferentes tipos de detectores dependiendo del modo de SEM que se utilice. Existen diferentes modos de SEM para la caracterización de materiales (incluidos los biomateriales) como el mapeo de rayos X, la imagen secundaria de electrones, la imagen de electrones retrodispersados, la canalización de electrones y la microscopía electrónica de Auger [78]. Un SEM típico consta de varios componentes como:

- La fuente de electrones que se encuentra en la parte superior de la columna y emite electrones. Luego, los electrones se aceleran a niveles de energía típicamente de 0.1 a 30 keV.

- Emisor de tungsteno de horquilla que genera un haz de electrones de alto diámetro para formar imágenes de alta resolución.
- Lentes y aberturas electromagnéticas que enfocan y dan forma al haz de electrones para formar un pequeño punto concentrado de electrones en la muestra.
- Un entorno de alto vacío que permite que los electrones se muevan sin ser dispersados o absorbidos por el aire [79].

## 2.11.2. Análisis elemental

Técnica que permite determinar el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presentes en un amplio rango de muestras de naturaleza orgánica e inorgánica, tanto sólidas como líquidas[80]. La tecnología se basa en la oxidación instantánea completa de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una temperatura de 1000°C. Con la ayuda del gas portador (He), se transportan diferentes productos de combustión CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub> a través del tubo de reducción, y luego se separan selectivamente en una columna específica, seguido de desorción térmica. La técnica está basada en la oxidación de la muestra mediante una combustión con oxígeno puro a una temperatura aproximada de 1000°C. Los diferentes productos de combustión CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y N<sub>2</sub>, son transportados mediante el gas portador (He) a través de un tubo de reducción y después selectivamente separados en columnas específicas para ser luego desorbidos térmicamente [81].

## 2.11.3. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es el estudio de la dispersión inelástica de la luz de una muestra que da como resultado un desplazamiento azul (dispersión anti-Stoke RAMAN) o rojo (dispersión Stoke RAMAN) de la longitud de onda de la luz incidente monocromática. Es un método espectroscópico no destructivo, no invasivo y complementario a la espectroscopía de absorción IR, se emplea para evaluar vibraciones moleculares y tiene un potencial considerable como técnica analítica en la caracterización de biomateriales en cualquier estado (sólido, líquido o gaseoso).

La espectroscopía RAMAN ha jugado históricamente un papel importante en la caracterización estructural de materiales gráficos, en particular proporcionando información valiosa sobre defectos, apilamiento de capas de grafeno y los tamaños finitos de los cristales. el conocimiento proporciona una poderosa maquinaria para comprender las nuevas formas de materiales de carbono sp<sup>2</sup> [82].

La muestra será irradiada con una luz incidente que promoverá las transiciones del estado basal a los estados excitados, el regreso al estado inicial puede ser de tres maneras distintas:  $\nu_L$ ,  $\nu_L - \nu_M$ ,  $\nu_L + \nu_M$ , nombradas de acuerdo con las frecuencias de luz emitidas. Estas dispersiones que se muestran en la figura 11 son conocidas como: Elástica o Rayleigh, en el caso de que la transición comience y termine en el mismo lugar; Stokes, cuando se comienza del estado vibracional más bajo y termina en el estado vibracional más alto; anti-Stokes, en este caso comienza de un nivel más alto a un nivel más bajo[83][84].

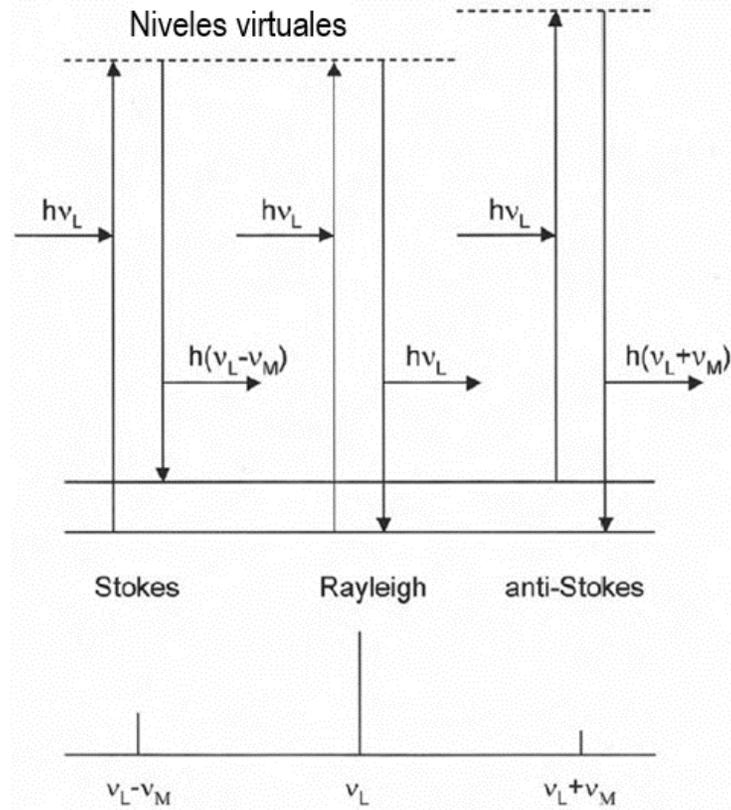


Figura 11. Diagrama de energía de las diferentes transiciones en la espectroscopía Raman.

#### 2.11.4. Difracción de rayos X de polvos

La Difracción de Rayos X está basada en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Los Rayos X tienen longitudes de onda de Angstroms, del mismo orden que las distancias interatómicas de los componentes de las redes cristalinas. Al ser irradiados sobre la muestra a analizar, los Rayos X se difractan con ángulos que dependen de las distancias interatómicas[85]. El método analítico del Polvo al Azar o de Debye-Scherrer consiste en irradiar con Rayos X sobre una muestra formada por multitud de cristales colocados al azar en todas las direcciones posibles. Para ello es aplicable la **Ley de Bragg**

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}\theta$$

en la que “d” es la distancia entre los planos interatómicos que producen la difracción [85].

Los rayos X son producidos mediante la aceleración de electrones desde un cátodo hacia un blanco metálico (ánodo), por medio de alto voltaje. Los electrones acelerados chocan con los átomos del metal utilizado como blanco, removiendo electrones de niveles internos y ocasionando que electrones de niveles superiores cubran los lugares vacantes, emitiendo así, fotones de rayos X[86]. Debido a que los rayos X tienen una frecuencia correspondiente a la diferencia de energía entre esos dos niveles, también son llamados radiación

característica. Los rayos X que se generan de esta forma, se utilizan para bombardear muestras cristalinas y así obtener su patrón de difracción de rayos X[86]. En una muestra cristalina, los átomos se encuentran agrupados de forma periódica y ordenada, por lo que, al recibir esta radiación, son dispersados en todas direcciones, produciendo fenómenos de interferencia, tanto constructiva como destructiva. La mayor parte de las dispersiones son del tipo destructivo, cancelándose entre sí, pero en determinadas ocasiones, debido a la periodicidad de los átomos, puede ocurrir que las ondas dispersadas se encuentren en fase y se refuercen, dando origen al fenómeno de difracción[85].

La difracción de rayos-x es un método de alta tecnología no destructivo para el análisis de una amplia gama de materiales, incluso fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores. La aplicación fundamental de la Difracción de Rayos X es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina[87]. Estudios de polimorfismo, transiciones de fase, y soluciones sólidas, medida del tamaño de partícula, determinación de diagramas de fase y es utilizada para otras caracterizaciones [85].

### **2.11.5. Espectroscopía foto electrónica de rayos X**

La Espectroscopía foto electrónica de rayos X (XPS) es una técnica analítica de superficie para análisis de la composición, tanto cualitativa como cuantitativa, que además permite determinar el estado químico de los elementos en los diferentes enlaces de energía de la superficie de un material (~10 nm). Adecuada para el estudio de superficies e interfases.

XPS detecta todos los elementos excepto hidrógeno, es inherentemente cuantitativo, pero tiene una sensibilidad limitada (típicamente 0.2% atómico límite de detección para elementos de sección transversal de fotoelectrones bajos) mientras que SSIMS (espectrometría de masa de iones secundarios). Detecta todos los elementos con especificidad isotópica (pero algunos, especialmente nitrógeno, solo en iones combinados), es intrínsecamente difícil de cuantificar, pero puede tener muy alta sensibilidad (ppm de una monocapa). La información estructural en XPS está dominada por funcionalidad y limitada por el pobre rango dinámico de los cambios químicos mientras que SSIMS tiene un alto nivel de especificidad molecular y puede discriminar moléculas de entidades macromoleculares [88].

### **2.11.6. BET: Análisis de superficie**

La teoría BET (Brunauer, Emmett y Teller) se utiliza cuando los sólidos que se utilizan en los estudios de adsorción son muy irregulares y porosos, se usa comúnmente para evaluar los datos de adsorción de gas y generar un resultado de área de superficie específica expresado en unidades de área por masa de muestra ( $m^2/g$ ). El área superficial específica de un material se determina mediante la adsorción física de un gas (típicamente nitrógeno, criptón o argón) sobre la superficie de la muestra a temperaturas criogénicas (típicamente temperaturas de nitrógeno líquido o argón líquido). La elección del gas a utilizar depende

del área de superficie por analizar y de las propiedades de la muestra. Una vez que se ha medido la cantidad de gas adsorbato (ya sea mediante una técnica volumétrica o de flujo continuo), se aplican cálculos que asumen una capa monomolecular del gas conocido[89][32][90].

El método BET se basa en el cálculo del número de moléculas de adsorbato, en este caso de nitrógeno, adsorbidas en monocapa, es decir, el número de moléculas necesario para cubrir la pared del sólido con una única capa. Al ponerse en contacto un gas con la superficie de un sólido se produce un equilibrio entre las moléculas adsorbidas y las moléculas en fase gaseosa, que depende de la presión del gas y de la temperatura. La relación entre las moléculas adsorbidas y la presión a temperatura constante se puede recoger en una isoterma de adsorción. Estas isotermas informan directamente el volumen adsorbido a una determinada presión y permiten también calcular el área superficial del sólido, el tamaño, forma de poro y su distribución, los calores de adsorción, etc[90].

### 3. Marco teórico

1. Absorción: Es el fenómeno en la que los átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos se disuelven en otra sustancia. Es un fenómeno de masa y volumen[11].
2. Adsorción: Fenómeno el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie de una sustancia sólida o líquida. Es un fenómeno superficial[11].
3. Carbón activado: El carbón activado es un término general que denomina a toda una gama de productos derivados de materiales carbonosos. El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna[12].
4. Dureza del agua: Se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. El agua denominada comúnmente como “dura” tiene una elevada concentración de dichas sales y el agua “blanda” las contiene en muy poca cantidad[13].
5. Filtración: La filtración es un proceso físico que utiliza un elemento filtrante o malla que retiene partículas sólidas mientras se deja pasar un fluido[14].
6. Hibridación: En química, se habla de hibridación cuando en un átomo, se mezcla el orden de los electrones entre orbitales creando una configuración electrónica nueva, un orbital híbrido que describa la forma en que en la realidad se disponen los electrones para producir las propiedades que se observan en los enlaces atómicos[15].
7. Metales pesados: El término de metal pesado refiere a los elementos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Además de poseer alta densidad, son tóxicos o venenosos en concentraciones incluso muy bajas. Los metales más tóxicos son el mercurio, el plomo, el cadmio, el arsénico, el selenio (no metal) y los menos tóxicos: berilio y aluminio[4].
8. Permeabilidad: Permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es

permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable[16].

9. PH: Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución. El pH se mide en una escala de 0 a 14. En esta escala, un valor pH de 7 es neutro, lo que significa que la sustancia o solución no es ácida ni alcalina. Un valor pH de menos de 7 significa que es más ácida, y un valor pH de más de 7 significa que es más alcalina[17].
10. Prototipo: Este término se emplea para nombrar al primer dispositivo que se desarrolla de algo y que sirve como modelo para la fabricación de los siguientes o como muestra[18].
11. Purificación: El término purificar significa eliminar lo que no es deseado, por lo tanto, un producto que pretende purificar el agua quiere decir que su fin es hacer que el agua sea potable (apta para el consumo humano). En otras palabras, significa: se elimina lo que no se desea, o lo que a ciertos niveles podría representar un riesgo a la salud (minerales, sales, materia orgánica, metales, etc.)[14].
12. Tezontle: Es un compuesto procedente de la erupción de los volcanes y constituido por silicatos de aluminio, formado por fragmentos y partículas de lava porosa de bajo peso. Es un compuesto procedente de la erupción de los volcanes y constituido por silicatos de aluminio, formado por fragmentos y partículas de lava porosa de bajo peso[19][20]

## 4. Planteamiento del problema

### 4.1. Justificación

En la naturaleza existen compósitos formados por materiales en distintas fases, por ejemplo, la roca volcánica conocida como tezontle. El tezontle contiene distintas fases como la anorita, silice, óxido de hierro, andesina, hematita, y cuarzo; en investigaciones recientes se ha observado que contiene carbono  $sp^2$ [1]. La capacidad que tiene el tezontle para remover metales pesados del agua puede ser atribuida a sus fases, entre ellos el carbono  $sp^2$  embebido entre los demás componentes, por tal motivo puede ser un material eficaz en la fabricación de partes de filtros de agua para usos domésticos. Además, el tezontle actualmente es de bajo costo, requiere un proceso mínimo en su aplicación (molienda), por lo tanto, la síntesis del material contenido como el carbono  $sp^2$  no requeriría una síntesis que implique una contaminación extra al medio ambiente, aproximándonos a las condiciones reales para poder realizar la remoción de metales pesados y contaminantes presentes en agua. Hoy en día los filtros que cuentan con remoción de metales pesados tienen un precio bastante elevado y difícil de conseguir, pues no cualquiera tiene acceso a ellos.

### 4.2. Hipótesis

“El carbono contenido en el tezontle nativo de Morelos tiene hibridación  $sp^2$ , el cual forma un compósito con óxido de hierro soportado en los demás componentes, formando así un material robusto con potencial de múltiples aplicaciones, entre ellas, el empleo en componentes de filtros de agua para uso doméstico”.

## 5. Objetivo

### 5.1. Objetivo General

Este proyecto tiene la finalidad de caracterizar el tezontle y estudiar el carbono  $sp^2$  que contiene de manera natural, así como crear un prototipo de filtro de agua, utilizando insumos de bajo costo y el tezontle para la remoción de metales pesados.

### 5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el tezontle: FESEM, Análisis elemental, Raman, Difracción de rayos X, XPS, BET.
- Proponer un modelo de remoción de metales pesados usando tezontle.
- Realizar un tratamiento de la muestra: Molienda y tamizaje.

- Construir un filtro de agua con materiales de bajo costo, utilizando el tezontle como factor de remoción de metales pesados.

## 6. Materiales y métodos

### 6.1. Roca volcánica (tezontle)

La roca volcánica de tres colores, rojo, negro y amarillo se obtuvo de la mina de Huitzilac, Morelos, México, con coordenadas 19°03'45.9"N 99°15'10.5"W. La figura 12 muestra imágenes del sitio de la mina localizada en Huitzilac, en donde puede observarse la diversidad en el tipo de material.



Figura 12. Fotografías de la mina de Huitzilac, Morelos, México.

### 6.2. Caracterización del tezontle

#### 6.2.1. Microscopía electrónica de barrido

La muestra molida en un mortero se colocó en un pin de aluminio sobre una cinta de cobre doble cara, posteriormente se analizó en un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo FESEM (por sus siglas en inglés) SU5000 Hitachi (figura 13) ubicado en el Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias Aplicadas de la UAEM con una intensidad de irradiación de 10 kV a diferentes magnificaciones para el análisis de la morfología.



Figura 13. Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo FESEM SU5000 Hitachi [91].

### 6.2.2. Análisis elemental

El análisis elemental se realizó en el microscopio electrónico de barrido FESEM SU5000 Hitachi y en el analizador elemental simultáneo FLASH 2000 de Thermo Scientific del Centro de Investigaciones Químicas (figura 14) a una temperatura aproximada de 1800°C, y se determinó simultáneamente el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el azufre y el oxígeno (C, H, N, S y O).



Figura 14. Equipo de análisis elemental orgánico FLASH 2000 de Thermo Scientific [92].

### 6.2.3. Espectroscopía Raman

El análisis de espectroscopía de Raman fue realizado en el equipo Thermo Scientific DXR Raman Microscope (figura 15) del Laboratorio de Materiales Avanzados del IFUNAM. Se irradió la muestra con un láser con longitud de onda de 514.5 nm.



Figura 15. Thermo Scientific DXR Raman Microscope [93].

### 6.2.4. Difracción de rayos X de polvos

La difracción de rayos X de polvos fue realizada en el equipo Smart Lab RIGAKU (figura 16) del Laboratorio Nacional de Investigación en Nanociencias y Nanotecnología del IPICYT que cuenta con una fuente de cobre cuya longitud de onda es 1.54 Å. El patrón de difracción se tomó en un ángulo de  $2\theta$  de  $10^\circ$  a  $90^\circ$  con un paso de  $0.01^\circ$ .



Figura 16. Difractómetro de Rayos-X Smart Lab RIGAKU [94].

### 6.2.5. Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X

La espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS por sus siglas en inglés) del tezontle molido sujetado con cinta de cobre doble cara se realizó en un espectrofotómetro Sistema Phi 5000 Versaprobe II (figura 17) en el Laboratorio Nacional de Investigación en Nanociencias y Nanotecnología del IPICYT. Para el análisis se usó un haz de alto voltaje 15 kV por una fuente de rayos X monocromatizada de 1486.7 eV. Para la identificación de los picos se utilizó la tabla periódica de Thermo Scientific<sup>1</sup> y las referencias [95,96].



Figura 17. Espectrofotómetro Sistema Phi 5000 Versaprobe II [97].

<sup>1</sup> XPS Reference Table of Elements, 2013-2012, <https://xpssimplified.com/periodictable.php>.

## 6.2.6. BET

Se llevó a cabo el análisis BET a una muestra de tezontle rojo, el cual fue realizado con el equipo NOVA STATION A para medir el área superficial del material. La muestra de tezontle rojo (0.2295 g) fue analizada por 1047.3 minutos y se registró el isoterma de adsorción de nitrógeno a 77.35 °K.

Tabla 5 Datos de análisis BET para tezontle rojo

PESO DE LA MUESTRA	VOLUMEN DE LA MUESTRA	DENSIDAD DE LA MUESTRA
0.2295 g	0.0673 cc	3.41 g/cc

## 6.3. Prototipo de filtro utilizando tezontle

La figura 18 es la representación del prototipo de filtro con tezontle. Está formado de arriba hacia abajo, por: Piedras, arena gruesa (también conocida como grava), arena fina, tezontle molido, carbón activado, algodón. El diseño se pretende elaborar lo más práctico y económicamente posible para que cualquier persona pueda realizarlo desde su casa con facilidad, sin complicaciones ni riesgos.

En la figura 18 mostramos el esquema del orden que debe seguirse para construir el prototipo de filtro con tezontle.



Figura 18. Prototipo de filtro con tezontle y otros materiales.

Decidimos seleccionar este tipo de materiales ya que de acuerdo con diferentes bibliografías, estos materiales son los que coinciden en la construcción de la mayoría de los filtros tanto caseros como industriales [48][73][65].

- Recipiente grande de plástico, tipo botella, de aproximadamente de 1.5-2 L
- Arena Gruesa (conocida como Grava)
- Arena fina
- Piedras de pequeño y mediano tamaño
- Carbón activado
- Algodón natural

**Tezontle rojo y negro.** Se uso tezontle rojo y negro, el cual fue molido y tamizado por nosotros hasta obtener el tamaño que uniforme.

**Arena, grava, carbón activado, piedra de río.** La arena, grava, se adquirieron en una tienda de materiales de construcción. Las piedras de río se obtuvieron en un río ubicado en la carretera Federal Iguala-Taxco. El carbón activado lo obtuvimos en una empresa purificadora. La **arena, grava** y **piedras de río** son los encargados de retener las partículas sólidas en suspensión así como permitir que el agua filtrada fluya hacia el drenaje[69].

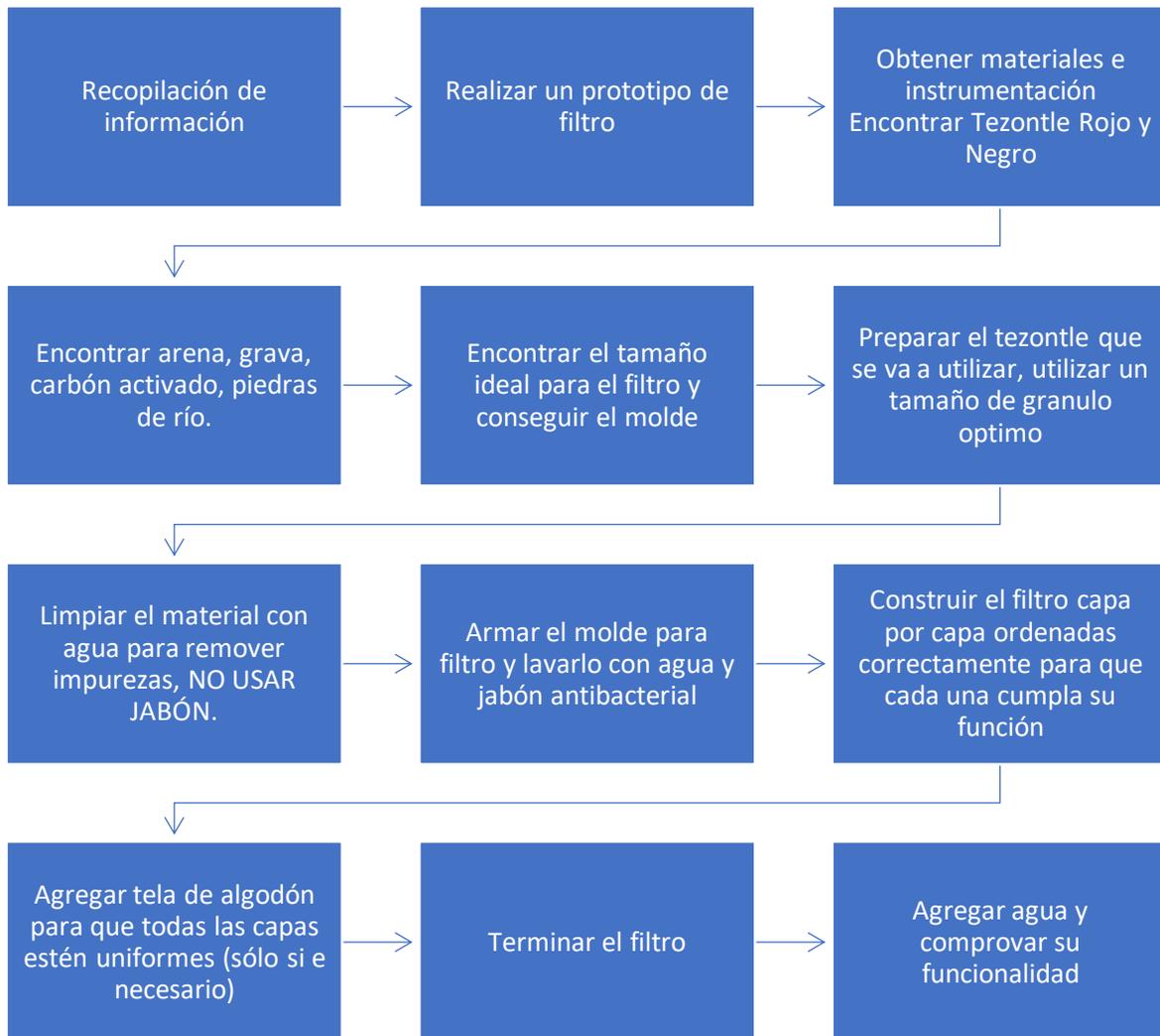
El **carbón activado** tiene como función retener impurezas y contaminantes por adsorción. Actúa atrapando impurezas en el agua como solventes, residuos industriales y otros productos químicos, dado que también remueve los contaminantes que generan olores, logra que el agua potable tenga un mejor sabor [70].



Figura 19. Materiales Utilizados para la elaboración del filtro prototipo

## 6.4. Metodología para el prototipo de filtro

Planteamos la metodología ideal para construir el filtro de agua después de analizar cada uno de los pasos a seguir, en la figura 20 se muestra la metodología paso por paso que seguimos para lograr nuestro proyecto.



**Figura 20.** Etapas para la construcción de filtro con tezontle.

- **Recopilación de información.** Primeramente, se recopiló información sobre los diferentes filtros de agua que existen, tanto industriales como caseros, con

materiales caros y materiales económicos. Por ejemplo: Existen filtros caseros que no tienen capacidad de remoción de metales y aun así su precio es elevado.

- **Prototipo.**  
Se desarrolló un prototipo con el fin de realizar un experimento para la comparación de
- **Materiales** (figura 19). Se analizaron y eligieron los materiales ideales para fabricar el filtro; entre los materiales se obtuvo tezontle rojo y negro de los cuales hay más disponibilidad en el Estado de Morelos.

### 6.4.1. Tamaño del Filtro

El tamaño ideal del filtro se obtuvo mediante el prototipo propuesto y con diferentes tamaños de partícula de tezontle. El primero se realizó en una botella de agua de 500ml y utilizando un tamaño de partícula aproximadamente de 2 a 50 milímetros, en la cual pudimos notar que el plástico no era capaz de soportar las capas y estas se volvían uniformes, considerando que el tamaño del tezontle era grande y la arena de mezclaba con la roca volcánica. El segundo prototipo realizado fue en una botella de 1.5 L tamaño seleccionado por la facilidad de encontrar este tipo de recipiente un tamaño de partícula menor a 1 mm, utilizamos tela delgada de algodón para separar las capas del tezontle y las arenas. Nos dimos cuenta de que esta fue el modelo ideal que tanto buscábamos, por lo que a partir de aquí se construyeron 3 filtros necesarios: tezontle rojo, tezontle negro, sin tezontle.

### 6.4.2. Molienda del tezontle

Se realizó la molienda del tezontle negro y rojo, con ayuda de un molcajete o mortero de piedra volcánica, se molió hasta obtener el tamaño ideal. Posteriormente se filtró con ayuda de un cedazo convencional con tamaño de poros de 100-150 micras.

Es importante mencionar que el tamaño de partícula entre 0,5 y 1 mm, normalmente da el mejor resultado entre la capacidad hidráulica y la eliminación de contaminantes. Pero pueden emplearse otros tamaños en función de los requerimientos específicos de cada caso [98].

### 6.4.3. Procedimiento

- Armar el molde. Utilizamos tres botellas de plástico recicladas, con capacidad de 1.5 L, las cuales fueron modificadas de la parte inferior.
- Los recipientes y materiales se desinfectaron antes de armar el filtro.
- Construir el filtro capa por capa.
  1. Primero colocamos la capa de algodón de aproximadamente 10 cm, la cual se comprimió para poder soportar las capas superiores.

2. Después colocamos aproximadamente 45 g de carbón activado formando una capa aproximada de 5 cm.
3. Colocamos tela de algodón cortada a la medida de la circunferencia.
4. Colocamos aproximadamente 55 g de tezontle, formando una capa aproximada de 6 cm.
5. Colocamos tela de algodón cortada a la medida de la circunferencia.
6. Colocamos aproximadamente 45 g de Arena fina formando una capa aproximada de 5cm.
7. Colocamos tela de algodón cortada a la medida de la circunferencia.
8. Colocamos aproximadamente 55 g de arena gruesa formando una capa aproximada de 6cm.
9. Colocamos piedras suficientes que formaran un volumen más grande que la capa de arena gruesa formando una capa aproximada de 8-10 cm. NOTA: Las capas de los diferentes materiales al no tener alguna barrera de separación se mezclan entre ellas, por lo que agregamos tela de algodón para que las capas fueran uniformes y heterogéneas.
10. Terminar el filtro.
11. Al terminar el filtro se puede almacenar en algún recipiente cilíndrico, que permita mantener el filtro de forma vertical. Después de aproximadamente 3-4 meses empiezan a desarrollarse algún tipo de residuos. Algo que nosotros hicimos fue colocar el filtro en el sol después de haberlo utilizado, lo que nos ayudó a que la mayor parte del agua se evaporara.
12. Agregar el agua.
13. Tomamos 500ml de agua de un río ubicado en la carretera Iguala-Taxco, lo vertimos sobre la parte superior del filtro, el cual fue colocado en una base para mantener el filtro de forma vertical, abrimos la boquilla del filtro y empezamos a tomar el tiempo de filtrado.

## 7. Resultados y discusión

### 7.1. Resultados de la caracterización del tezontle

#### 7.1.1. Microscopía óptica

Las figuras 21-23 muestran fotografías de la superficie del tezontle molido en mortero en colores rojo, amarillo, y negro, respectivamente. En estas fotografías se aprecia la superficie compuesta por múltiples partículas de diferentes tonalidades y agregadas. La muestra de tezontle rojo presenta una superficie BET calculada a un punto de  $6\text{m}^2/\text{g}$ , un valor en el orden reportado previamente [38].

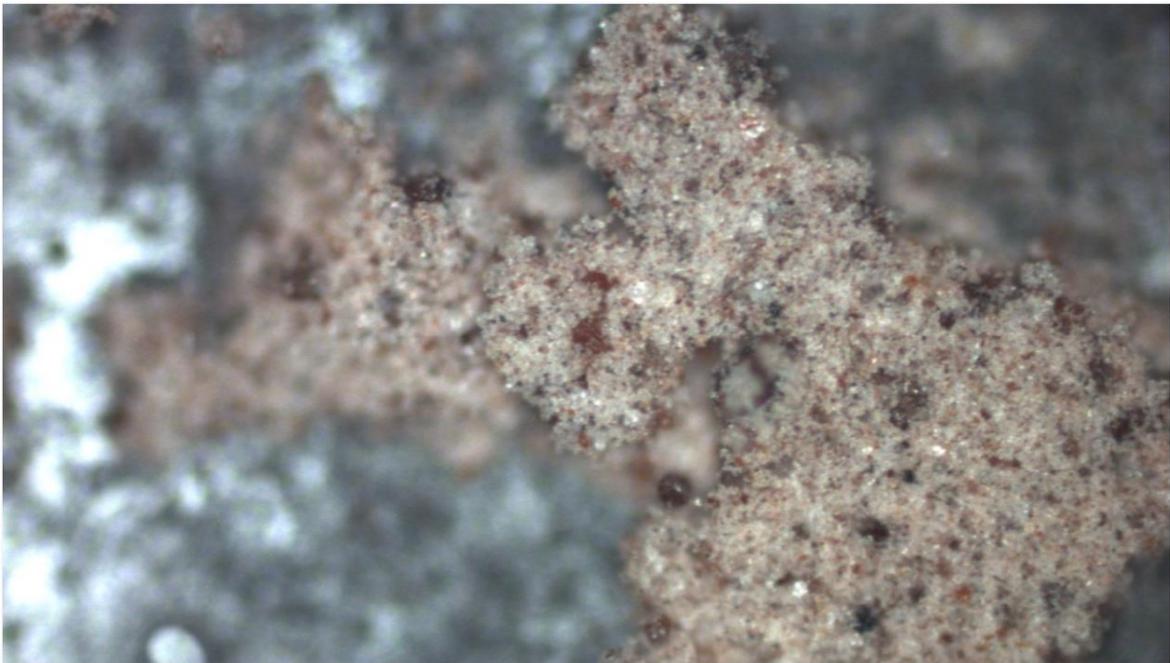


Figura 21. Fotografía de microscopio óptico de la superficie del tezontle rojo.

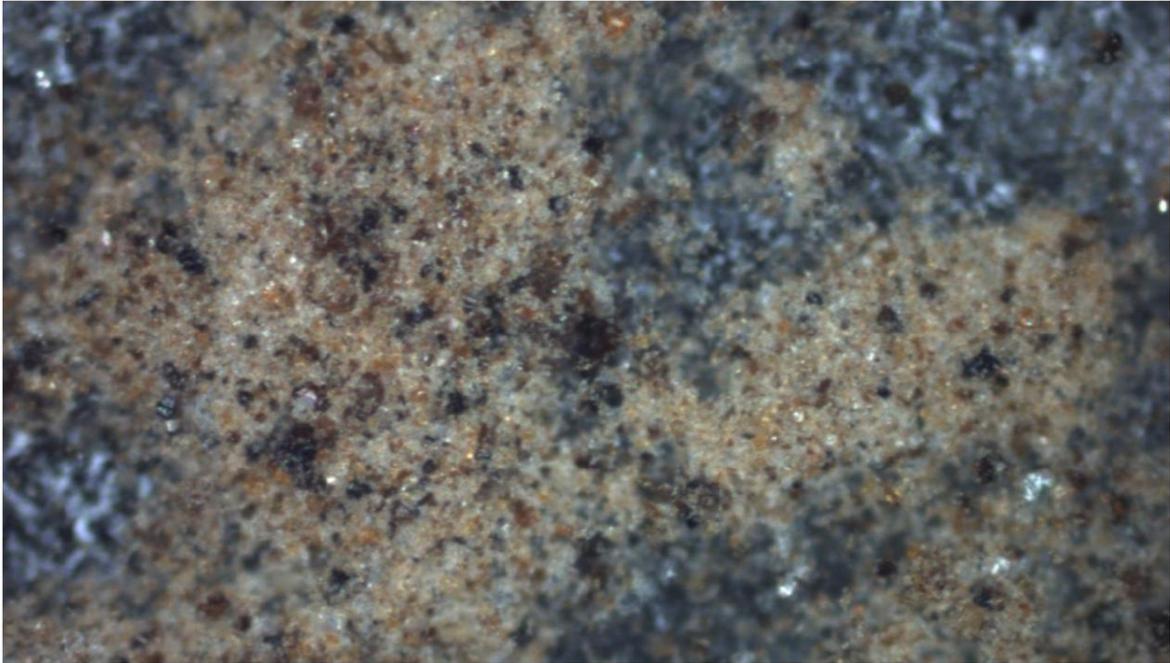


Figura 22. Fotografía de microscopio óptico de la superficie del tezontle negro.

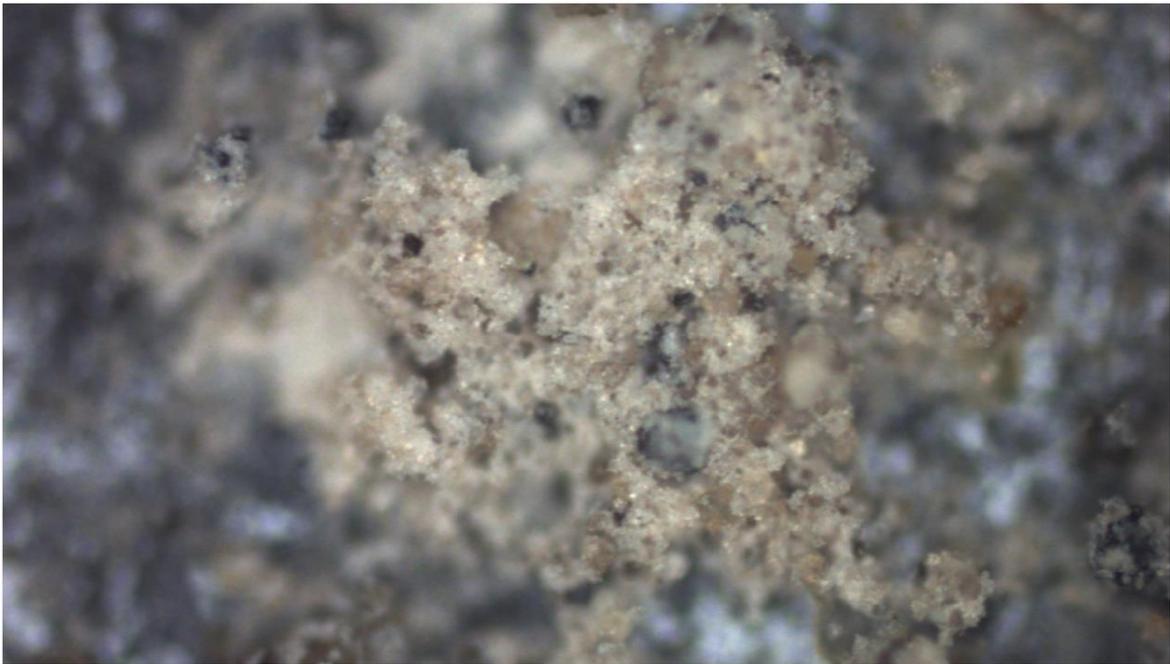


Figura 23. Fotografía de microscopio óptico de la superficie del tezontle amarillo.

### 7.1.2. Microscopía electrónica de barrido

Las figuras 24-26 muestran los resultados obtenidos de microscopía electrónica de barrido para los 3 tipos de tezontle, rojo, negro, y amarillo, respectivamente. El tezontle rojo (figura 24) se puede observar que presenta una superficie rugosa, con partículas de diferentes tamaños y muy poco uniforme. El tezontle negro (figura 25) presenta diferentes tamaños de partículas, además de que se encuentran distribuidas un poco más separadas a comparación de los otros tipos de roca. El tezontle amarillo (figura 26) presenta una superficie ligeramente rugosa. La presencia de partículas de diferente tamaño se atribuye al efecto de la molienda, antes de que la muestra sea tamizada.

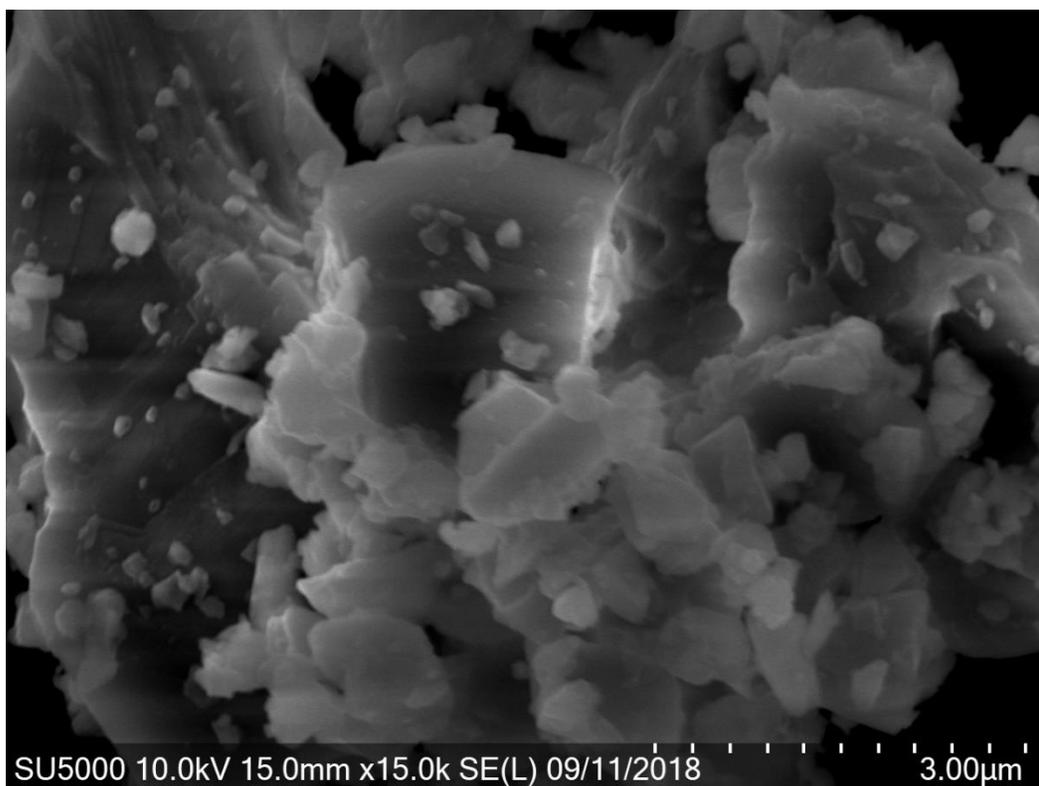


Figura 24. Micrografía de barrido electrónico de la superficie de tezontle color rojo.

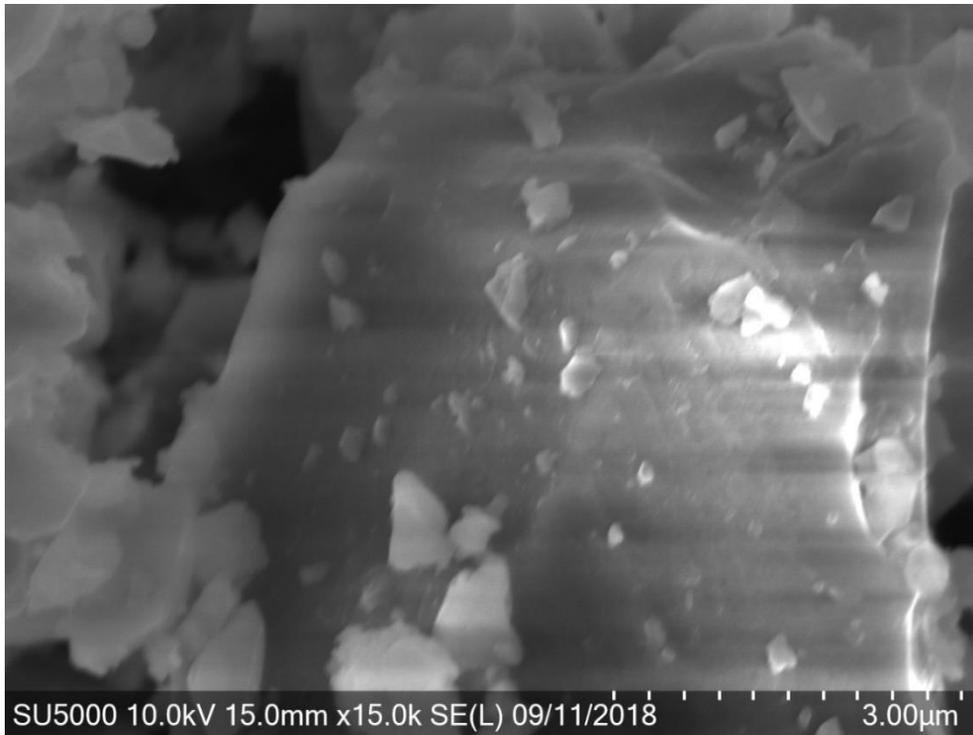


Figura 25. Micrografía de barrido electrónico de la superficie de tezontle color negro.

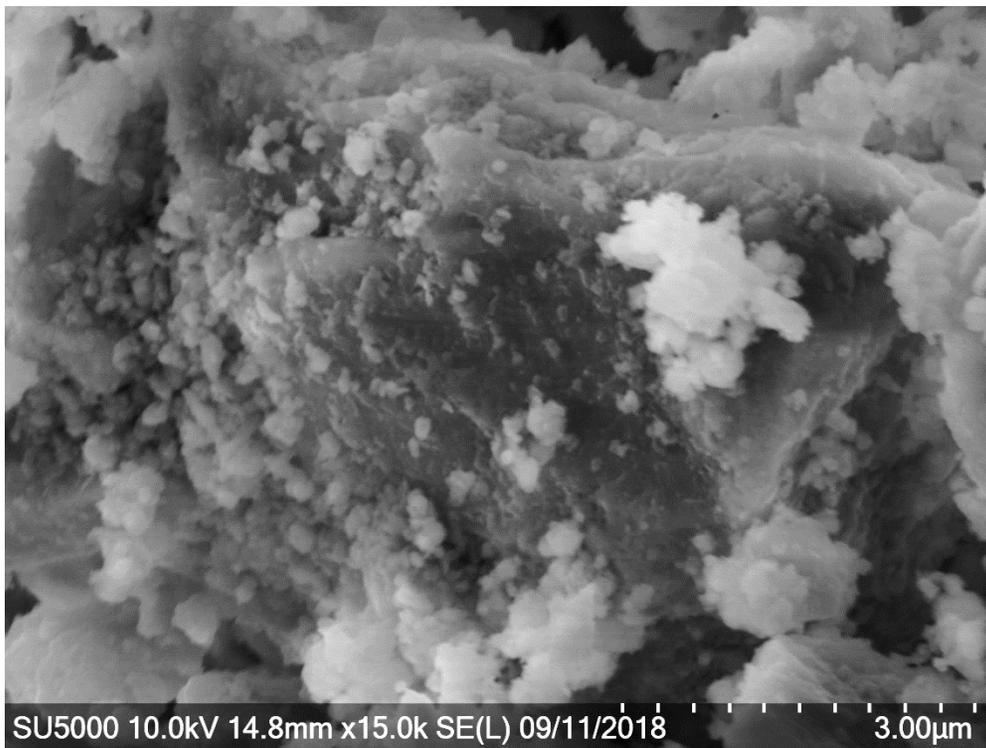


Figura 26. Micrografía de barrido electrónico de la superficie de tezontle color amarillo.

### 7.1.3. Análisis elemental

La tabla 7 muestra los resultados obtenidos del análisis elemental obtenido en microscopía electrónica; se muestran los porcentajes atómicos para la presencia de oxígeno, silicio, carbono, aluminio, magnesio, sodio, calcio, hierro, potasio, y titanio. En las tres muestras hay un alto porcentaje de oxígeno[1], lo que se debe a la presencia de diferentes tipos de óxido en el tezontle, como el óxido de hierro y el cuarzo, hay un alto porcentaje de aluminio y magnesio debido a que el tezontle es una roca ígnea, la cual está compuesta fundamentalmente por silicatos( $\text{SiO}_4^{4-}$ ), más los iones aluminio, calcio, sodio, potasio, magnesio y hierro constituyen aproximadamente el 98 % en peso de los magmas que las forman[99].

El tezontle amarillo muestra que contiene la mayor cantidad de carbono a comparación de los otros tipos de roca volcánica. En el caso del tezontle rojo, no se muestra presencia del carbono, lo que puede deberse a alguna variación en el estudio pues solo se midió una vez y el análisis es al menos sobre 50 nm de la superficie, sin repeticiones es difícil llegar a una conclusión, Aunque el análisis no es determinante en cuanto al porcentaje atómico del carbono, nos sirve para orientarnos sobre los elementos presentes en las muestras. Por lo que, aunque el carbono no se ve reflejado, no se puede asegurar que no se encuentra presente en la muestra.

El análisis elemental en el FLASH 2000 determinó el porcentaje de carbono en el tezontle rojo, negro, y amarillo; se obtuvo 0.03 % para rojo, 0.06 % para negro, y 0.03 % para amarillo; el tezontle negro es el que presenta mayor porcentaje de carbono, pero los porcentajes se encuentran en valores traza.

Tabla 6. Comparación de la composición elemental del tezontle negro, rojo y amarillo.

Elemento	Tezontle rojo (%atómico)	Tezontle negro (%atómico)	Tezontle amarillo (%atómico)
<b>O</b>	58.69 ± 11.78	52.37 ± 11.82	42.26 ± 11.91
<b>Si</b>	23.03 ± 4.19	21.28±4.19	24.12±4.21
<b>C</b>	00.00	9.93±17.43	13.44±15.68
<b>Al</b>	6.69±4.89	6.42±4.88	9.67±4.81
<b>Mg</b>	3.99±5.82	2.43±6.24	1.40±7.58
<b>Na</b>	2.52±7.20	2.43±7.18	1.75±8.13
<b>Ca</b>	2.58±4.20	2.42±4.18	2.49±4.25
<b>Fe</b>	1.59±6.64	1.98±5.95	4.10±4.96
<b>K</b>	0.54±7.10	0.42±7.86	00.00
<b>Ti</b>	0.35±9.12	0.31±9.23	0.77±6.03

### 7.1.4. Espectroscopía Raman

La espectroscopía Raman es ampliamente utilizada en la caracterización de materiales de carbono con hibridación  $sp^2$ , debido a que puede dar información sobre los estados electrónicos, dispersión de energía de fonones (son el mecanismo primario por el cual se produce la conducción de calor) y la interacción de los carbonos  $sp^2$  en nanoestructuras [1]. En la figura 27 tenemos los espectros Raman de tezontle rojo, negro, y amarillo (líneas de colores) comparadas con un espectro Raman de nanotubos de carbono (línea negra), en el cual se puede observar la banda G' característica del carbono  $sp^2$  en  $\sim 1570\text{ cm}^{-1}$  altamente pronunciada en el espectro. También se tiene otro pico en  $\sim 1350\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la banda D del desorden inducido en carbono  $sp^2$ . Los espectros de las muestras de tezontle presentan tres características particulares, la primera tiene que ver con la aparición de picos cerca de  $\sim 1350\text{ cm}^{-1}$  y  $\sim 1570$ , pues aparecen en los tres espectros lo cual puede ser una confirmación de la presencia de carbono  $sp^2$  [1]. Sin embargo, para el tezontle rojo los picos se confunden con el ruido, por lo que no resulta concluyente. La segunda característica es la zona de picos marcada con "1" atribuidos al óxido de hierro. Y la tercera es el pico alrededor de  $500\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al óxido de silicio (cuarzo).

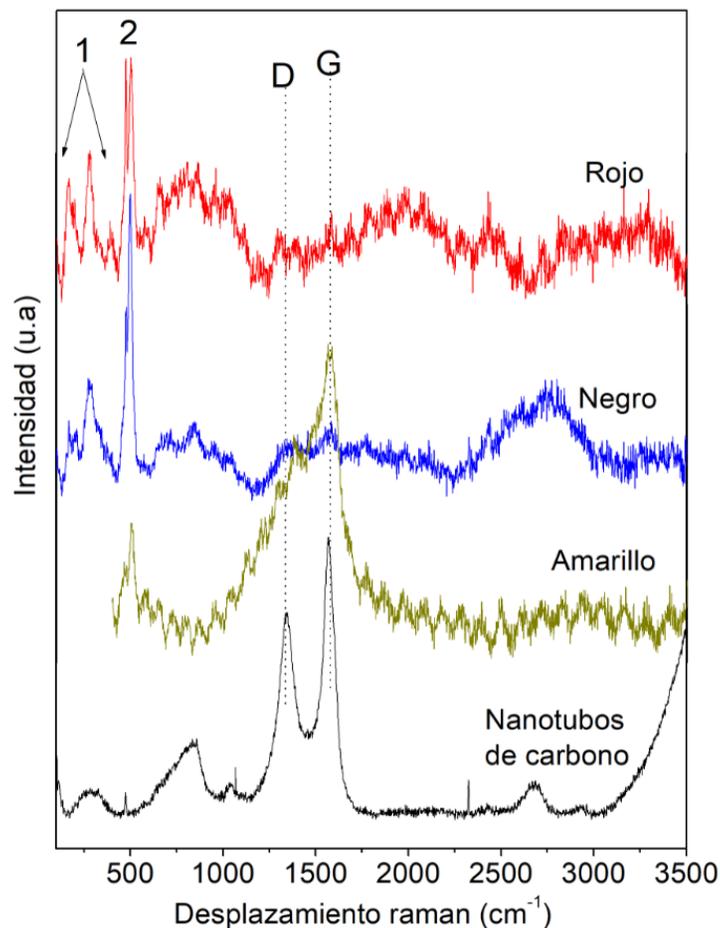


Figura 27. Espectros RAMAN, de tezontle negro, rojo y amarillo.

### 7.1.5. Difracción de rayos X de polvos

La figura 28 presenta los espectros de difracción de polvos de rayos X de tezontle rojo, negro, y amarillo. Estos patrones de difracción presentan distintas fases indicadas con letras: C-cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), A-anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), B-albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y H-óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). En general las muestras presentan las mismas fases entre sí, solo se aprecia una variación en las intensidades, lo cual puede ser atribuido a que los elementos contenidos están en distintas proporciones para cada tipo de tezontle, y esto se puede confirmar por los porcentajes atómicos presentados en la tabla 7. Además estos patrones de difracción son similares a tezontle reportado previamente [32].

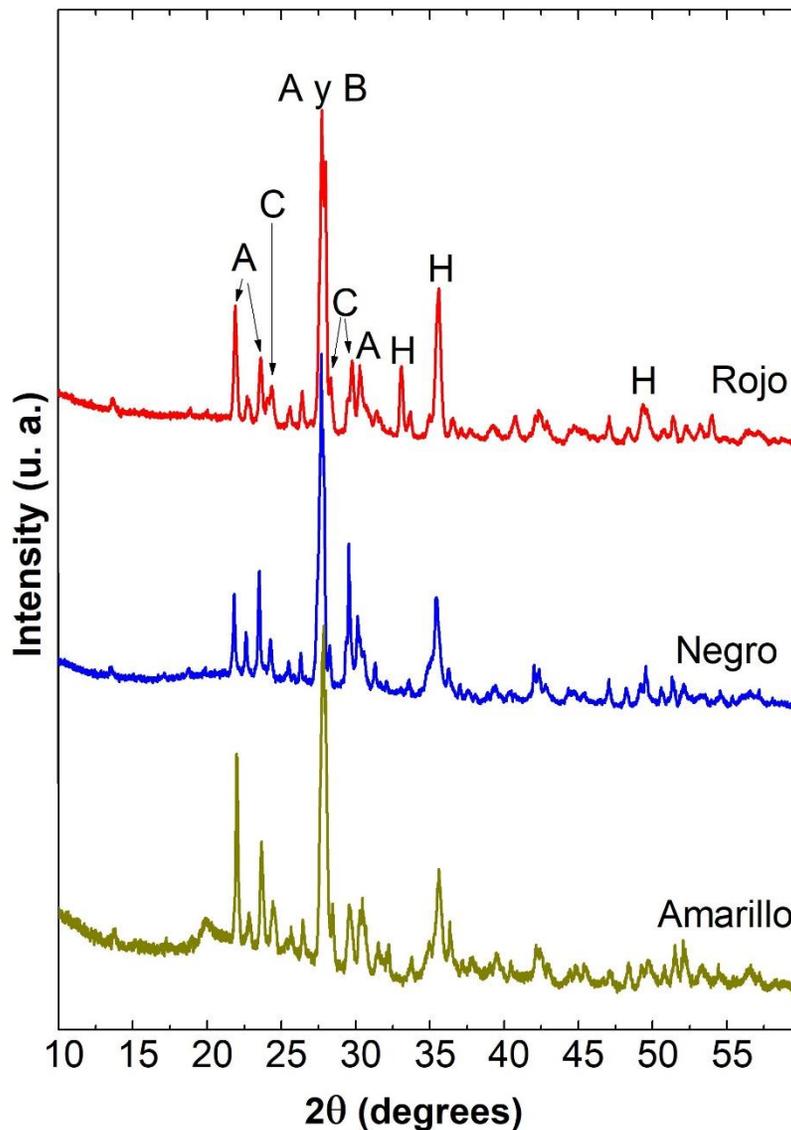


Figura 28. Patrones de difracción de polvos de las muestras de tezontle (a) rojo, (b) negro, y (c) amarillo, en donde se indican de manera general las fases presentes para C-cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), A-anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), B-albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y H-óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

### 7.1.6. Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X

El análisis de espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) para determinar la presencia de carbono  $\text{sp}^2$  y los demás componentes en el tezontle rojo, negro y amarillo se presenta en la figura 29. El espectro general muestra múltiples picos los cuales están asociados a las energías de enlaces de cada uno de los elementos presentes en la muestra. En el análisis elemental se determinó la presencia oxígeno, silicio, carbono, aluminio, magnesio, sodio, calcio, hierro, potasio, y titanio mientras que en XPS se determina las energías de enlace de estos elementos. Los espectros de tezontle rojo, negro, y amarillo exhibieron un pico muy pronunciado para los electrones del orbital 1s del O (~530 eV); también aparecieron los picos de los electrones Auger O KLL (~980 eV) y de los electrones del orbital 2s del O (~24 eV). Con menor intensidad se presentaron los picos de los electrones en el orbital 2s y 2p del Si (153 y 102 eV, respectivamente), de los electrones Auger y de los electrones en los orbitales 2s y 2p del Mg (~306, 89 y 58 eV, respectivamente), en el orbital 2p del Ca (~350 eV), en el orbital 1s del C (~285 eV), en los orbitales 2s y 2p del Al (~120 y ~74 eV, respectivamente), así como de los electrones Auger Na KLL (~498 eV) y de los electrones en el orbital 1s del Na (~1072 eV). Con una mínima intensidad casi imperceptible, se observaron picos de los electrones del orbital 2p del K (~294 eV). La intensidad de los picos de los electrones del orbital 2p del Fe (~712 eV) fue incrementando del rojo hacia el amarillo. Los picos marcados con 1 y 2 corresponden a una característica de pérdida en algunos materiales, y ocurre por una pérdida de energía (o plasmón) debido la interacción entre los fotoelectrones y otros electrones moviéndose en dicha muestra.

En la tabla 8 se presentan los porcentajes de los elementos presentes en la muestra obtenidos por el espectro de XPS. Cabe mencionar que en la medición general de la figura 29 no se relacionó alguno de los picos con alguna señal del titanio, por lo que se puede despreciar el valor observado en el análisis elemental de la muestra. Para todas las muestras el porcentaje de oxígeno está por encima del 60% lo que concuerda con el análisis elemental realizado por microscopía mostrado en la tabla 6. El porcentaje de carbono sigue siendo menor al 10% para las tres muestras, con un porcentaje mayor para el tezontle amarillo, lo cual concuerda con el porcentaje obtenido en el análisis elemental, así como también con la presencia del pico de la banda G en el espectro Raman correspondiente a carbono  $\text{sp}^2$  de la figura 27.

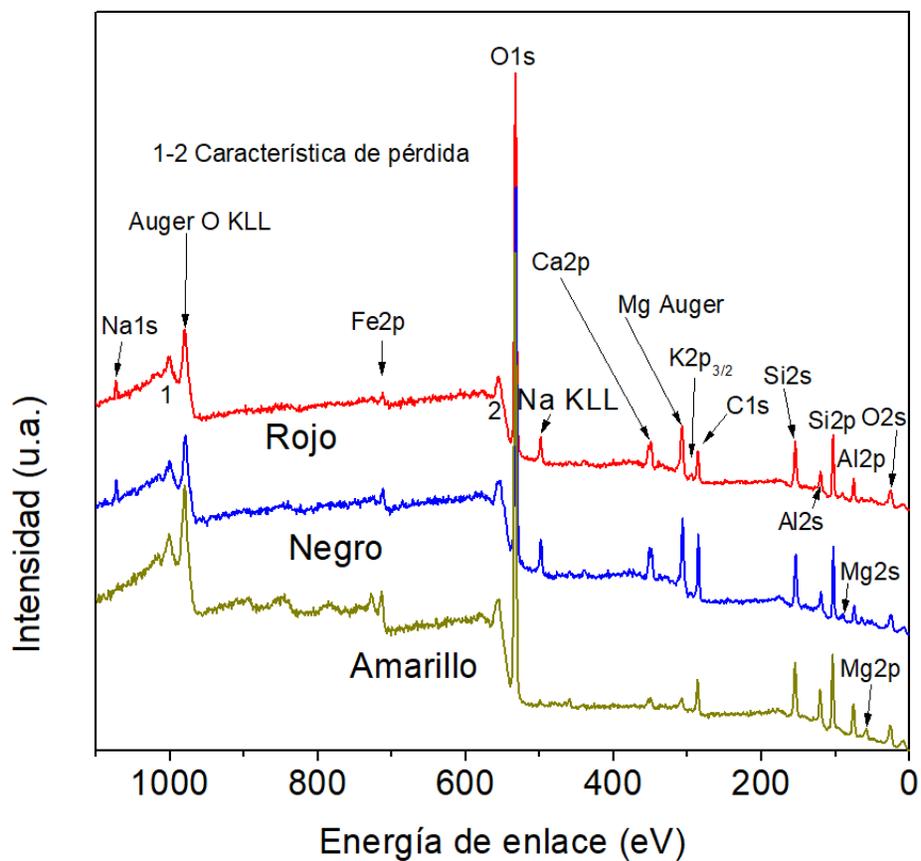


Figura 29. Medición general de la espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS) de tezontle rojo, negro, y amarillo.

Tabla 7. Comparación de la composición elemental del tezontle negro, rojo y amarillo.

Elemento	Tezontle rojo (% en XPS)	Tezontle negro (% en XPS)	Tezontle amarillo (% en XPS)
<b>O</b>	62.86	60.11	62.86
<b>Si</b>	9.73	10.55	10.76
<b>C</b>	5.97	2.69	8.11
<b>Al</b>	3.62	2.91	2.96
<b>Mg</b>	5.02	4.83	3.97
<b>Na</b>	3.33	1.97	2.76
<b>Ca</b>	4.34	5.38	4.49
<b>Fe</b>	3.78	3.08	3.21
<b>K</b>	1.34	1.28	1.05

El pico del orbital C1s del C se presenta en la figura 30 donde se aprecia que ha sido descompuesto en diferentes picos los cuales corresponden al C-C (~284.8 eV) que puede ser atribuido al carbono  $sp^2$  en la muestra, el resto de los picos pueden corresponder a contaminación y/o carbonatos C-O, C=O, y  $(CO_3)^{2-}$  (~286, ~ 287, y 288-289 eV, respectivamente). Los carbonatos pueden ser carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) o carbonato de

calcio-magnesio ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ); aunque el calcio se encuentra en la anortita, una parte también puede existir en forma de carbonato. Así mismo, el magnesio se observó en un porcentaje de 5.02 para tezontle rojo, 4.83 para el tezontle negro, y 3.97 para el tezontle amarillo por lo que forma parte de los carbonatos de calcio-magnesio en la muestra.

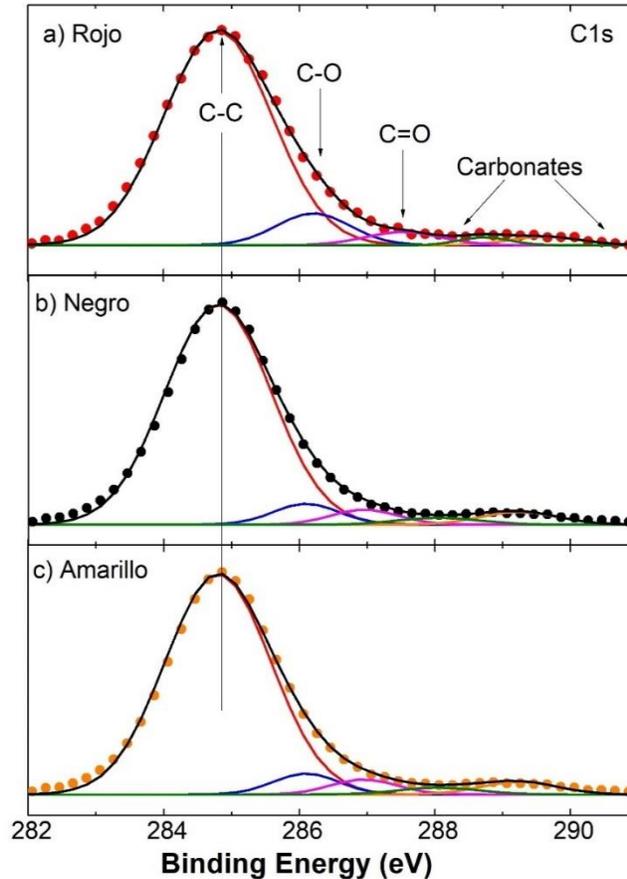


Figura 30. Espectro C1s de las muestras de tezontle (a) rojo, (b) negro, y (c) amarillo, en donde el pico principal corresponde al carbono  $\text{sp}^2$ .

De acuerdo a estudios posteriores se tiene conocimiento que los carbonatos favorecen a la adsorción de algunos metales pesados, entre ellos, el cadmio [100]. Lo que puede favorecer la adsorción de contaminantes que posee el tezontle.

### 7.1.7. BET: Área superficial específica

La muestra de tezontle rojo (0.2295 g) fue analizada por 1047.3 minutos y se registró el isoterma de adsorción de nitrógeno a 77.35 °K, presenta una superficie BET calculada a un punto de  $6\text{m}^2/\text{g}$ , un valor en el orden reportado previamente[38], el cual explica su alta densidad.

## 7.2. Mecanismo de remoción de metales pesados del agua con tezontle

Hay muchos factores que afectan el rendimiento de un adsorbente, como su área de superficie, porosidad, tamaño, forma, composición y grupos funcionales. Todos ellos pueden ser utilizados para optimizar un adsorbente ya sea aumentando el número y la densidad de los sitios de adsorción o mejorando la interacción entre adsorbentes y adsorbatos [101].

En algunos estudios realizados con compuestos de carbono los resultados demostraron que el Carbono modificado tiene una capacidad de sorción mayor por Cr y Cu que otros adsorbentes comerciales [102]. La figura 31 muestra un esquema de interacción de los metales pesados con carbono  $sp^2$ . Al existir una disponibilidad de electrones ocurre que los metales pesados forman enlaces con los electrones libres y favorece a la remoción de metales pesados en agua [103][1].

La presencia de óxido de hierro (II) en el tezontle (figura 32) brinda grupos de oxígeno, enlaces sueltos, y heteroátomos. Debido a que estas zonas implican electrones disponibles para interactuar con el ambiente es posible pensar que, al ser colocados en una solución con iones de metales pesados, podrán formar un enlace químico para la remoción de estos del medio [8]. Los mecanismos de adsorción incluyen interacciones electrostáticas, intercambio iónico, formación de complejos y reacciones redox [101]. La figura 31 muestra de manera gráfica como los metales pesados interactúan con los electrones libres del tezontle. Formando enlaces entre ellos y permitiendo el paso del agua.

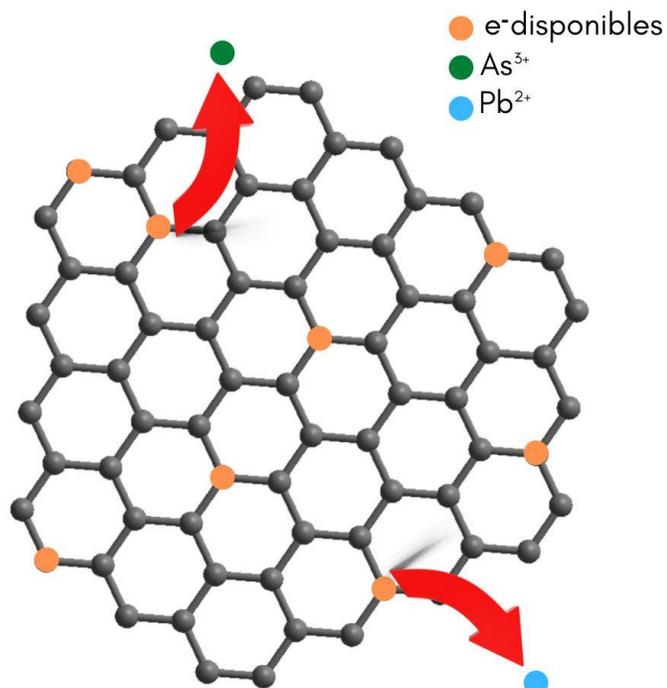


Figura 31. Esquema para el mecanismo de remoción de metales pesados con el tezontle, interacción de carbono  $sp^2$  y metales pesados disueltos en Agua[8].

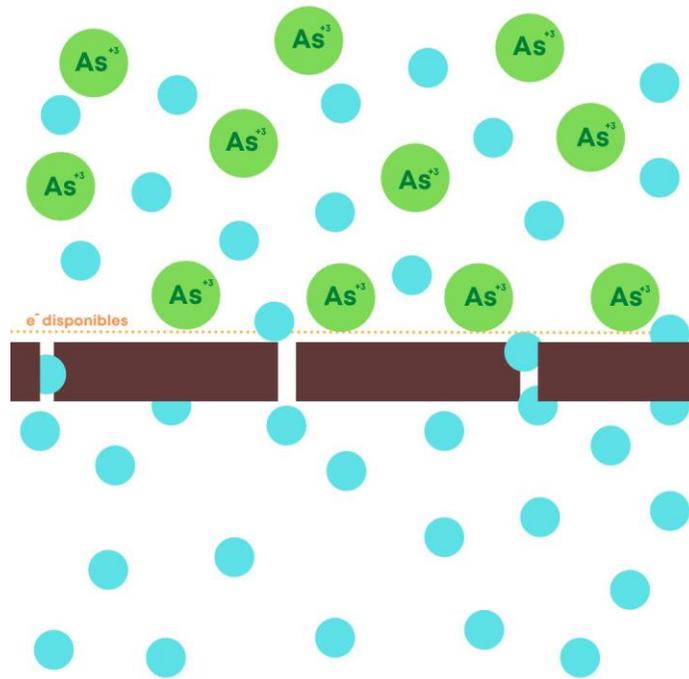


Figura 32. Adsorción de metales pesados y permeabilidad del agua

## 7.3. Propuesta de un filtro de agua

### 7.3.1. Prototipo de filtro utilizando tezontle

Con una botella de plástico, de una capacidad de 600 ml (figura 33), construimos un prototipo de filtro a escala menor para analizar el comportamiento de las capas, el tipo de botella y revisar qué podíamos mejorar.

En la figura 35 las capas que forman el filtro tienen el siguiente orden, de arriba hacia abajo:

1. Piedra de río, formando una capa aproximada de 5 cm de ancho
2. Arena gruesa/grava, formando una capa aproximada de 3 cm de ancho
3. Arena fina, formando una capa aproximada de 3 cm de ancho
4. Tezontle, formando una capa aproximada de 2.5 cm de ancho
5. Carbón Activado, formando una capa aproximada de 2.5 cm de ancho
6. Algodón, formando una capa aproximada de 5 cm de ancho

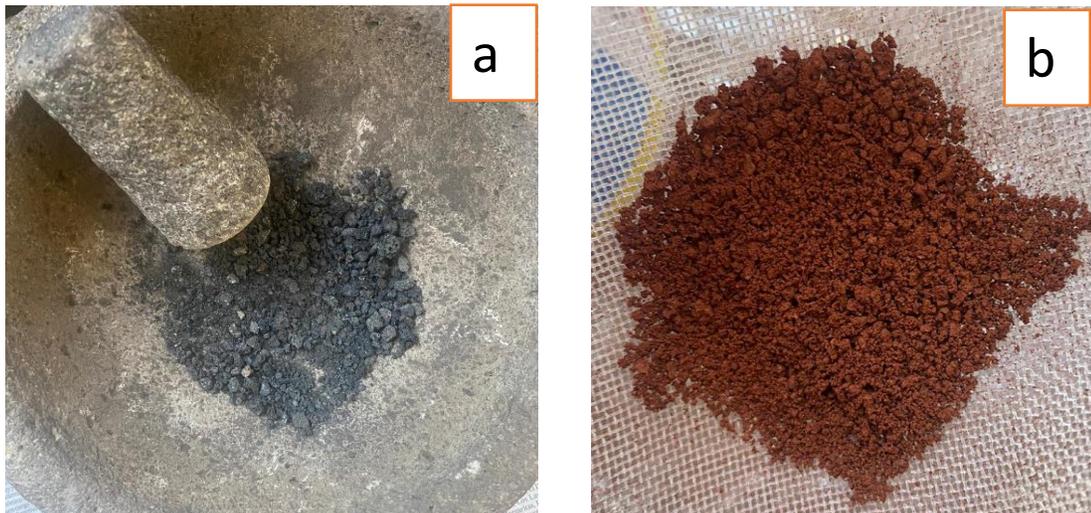
El análisis del primer filtro condujo a los siguientes puntos para su mejora:

- Utilizar una botella lisa que permita que las capas se puedan ver uniformes, ya que al utilizar botellas con textura puede ocasionar que las capas se mezclen por sí solas.
- Utilizar una botella mínima de 1L.
- Comprimir el algodón suficientemente.
- Realizar una molienda óptima para el tezontle (figura 34a)
- Utilizar un tamaño de partícula ideal para el tezontle mediante el cernido del polvo molido (figura 34b). En la tabla 8 se observa el tezontle en roca y el tezontle después de la molienda casera realizada con ayuda de un mortero de roca volcánica y un cedazo convencional, primero se clasificó podemos observar el cambio de tamaño y la diferencia de color, en la cual es notable que, al realizar la molienda, el tezontle se torna más claro y opaco.

- En la capa entre en tezontle y las arenas, utilizar una tela de algodón para que no se mezclen y sean capas uniformes (figura 35).



Figura 33. Primer prototipo de filtro a escala menor.



**Figura 34.** a) Molienda del tezontle con ayuda de un molcajete/mortero. b) Separación del tezontle con ayuda de cernidor de aproximadamente 130-200 micras, cedazo convencional.

Tabla 8. Molienda realizada con un molcajete/mortero de roca volcánica.

	Negra	Roja
<b>Apariencia del tezontle</b>		
<b>Molido en molcajete y separado con cedazo convencional de 150-200 micras.</b>		



Figura 35. Tela de algodón utilizada para separar la capa del tezontle de las arenas.

Todas estas mejoras se tomaron en cuenta para realizar los filtros a escala mayor y obtener el resultado esperado. El primer prototipo a escala menor mostrado en la figura 33 está formado de arriba hacia abajo, por: Piedras, arena gruesa, arena fina, tezontle, carbón activado, algodón. Es importante mencionar que se utilizó un cedazo convencional, que normalmente se utiliza en la cocina, al ser un tamiz no especializado, puede que haya un margen de error en cada poro del cedazo, por lo que hay un promedio entre 100-200 micras. La grava o arena que se utiliza para los filtros de agua convencionales tiene un tamaño de partícula que oscila entre 35 y 130 mm [104] por lo que el tamaño del tezontle podría encontrarse entre los rangos que son utilizados para la elaboración de filtros.

### 7.3.2. Prototipo con Tezontle Rojo

La Figura 36 muestra una fotografía del filtro con una capa de arena, una de carbón activado, y una de tezontle rojo. Algo importante en la molienda fue que se colocó el tezontle rojo dentro de una bolsa y con ayuda del pistilo del molcajete, se golpeó la roca hasta obtener el tamaño deseado, y posteriormente se pasó por el colador. En este proceso, otro de los inconvenientes fue que los gránulos de los materiales se mezclaban entre sí. Para superar este inconveniente, se colocó la una capa de algodón previamente cortada al tamaño de la circunferencia de la botella. El algodón se sujetó con ayuda de un vaso para evitar que se deformara; después se agregó el carbón activado y se colocó el tezontle de tamaño de grano aproximado de 200 micras. La tela de algodón permitió que las capas fueran uniformes. La figura 37 muestra el filtro de agua terminado y siguiendo todas las mejoras descritas.



Figura 36. Construcción del filtro con tezontle rojo.



Figura 37. Filtro con tezontle rojo.

### 7.3.3. Prototipo con Tezontle Negro

La figura 38 muestra el filtro terminado utilizando el tezontle negro como factor de remoción de metales pesados en agua. Se llevó a cabo el resto del procedimiento tal y como se realizó el filtro de tezontle rojo. La molienda del tezontle negro se realizó directamente en un molcajete, lo que fue imprescindible para que la molienda fuera más rápida. Se uso material disponible en casa, ya que se trata de acercar a la situación normal, tomando en cuenta que muchos filtros caseros se llevan a cabo con este tipo de utensilios [48].



Figura 38. Filtro con tezontle negro.

### 7.3.4. Prototipo sin tezontle

Se realizó un filtro sin tezontle (figura 39) siguiendo el procedimiento mencionado en metodología, se construyó sin el composito porque será el blanco. Se define por blanco al agua reactivo o matriz equivalente a la que no se le aplica ninguna parte del procedimiento analítico y sirve para evaluar la señal de fondo [105].



Figura 39. Filtro sin Tezontle.

En general, se observó que para fabricar un filtro es muy importante plantear una metodología que permita llegar al resultado deseado, un paso fundamental que se realizó fue la prueba del primer prototipo de filtro, en el cual se pudo analizar las mejoras a escalas mayores, es decir, a un tamaño más grande. Los filtros de agua se realizaron cumpliendo con el diseño de filtro, y tomando en cuenta todas las mejoras que se observaron al realizar el primer filtro a escala menor.

### 7.3.5. Uso y manejo de los Filtros

Se debe utilizar un recipiente que te permita almacenar el agua que se va a filtrar, en nuestro caso, utilizamos un recipiente con una boquilla cilíndrica lo que permitió que el filtro se acomodara de forma vertical.

Agregamos 1L de agua sucia, el cual fue recolectada del Río San Juan, ubicado en la carretera Iguala-Taxco

Inmediatamente notamos como todo el filtro empezó a humedecerse, hasta que el algodón se humedeció por completo, el agua empezó a filtrarse (en el minuto 1:55) y la filtración fue más rápida. Este procedimiento duró 15 min con 44 segundos, el tiempo fue contado hasta que cayó la última gota filtrada.

El cambio de la coloración del agua fue notorio, el agua antes de ser filtrada tenía una coloración amarilla y algunos solidos suspendidos, después de ser filtrada, el agua no tenía ningún color y no se encontraron solidos suspendidos.

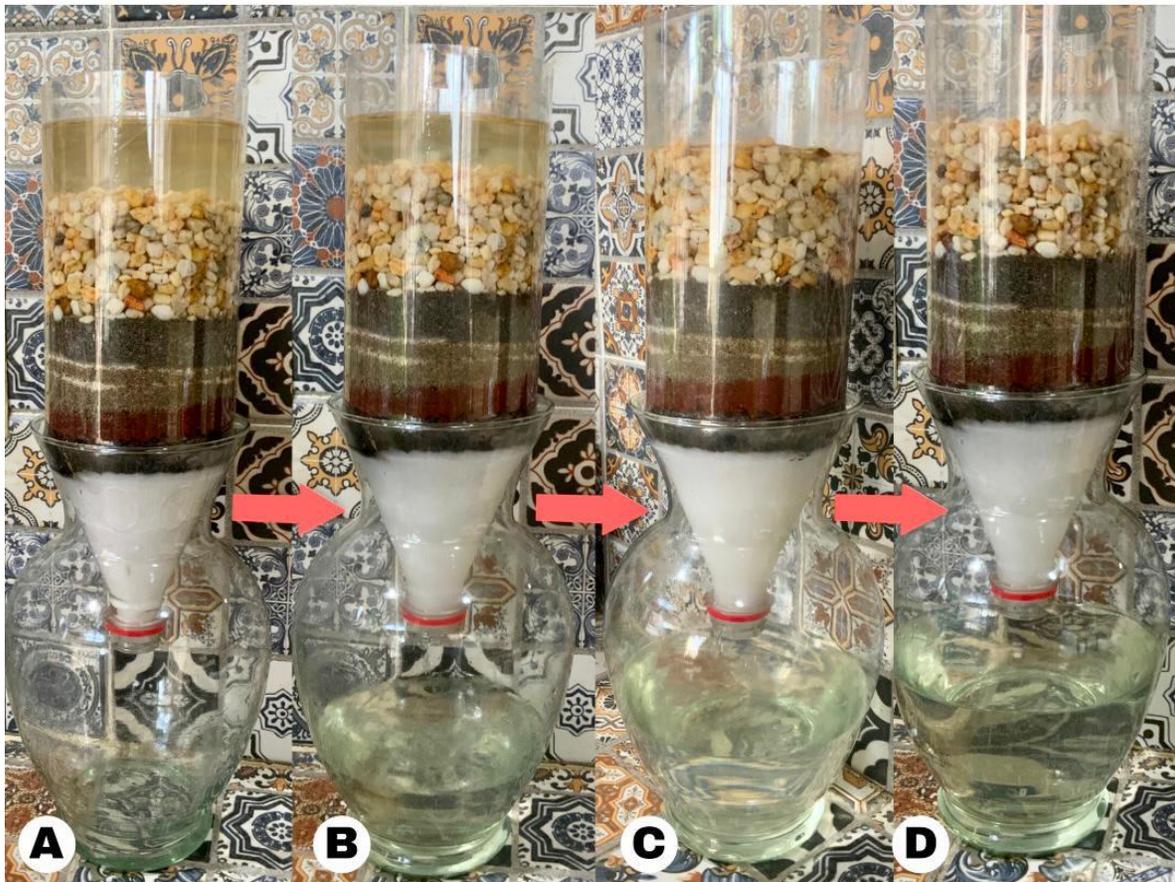


Figura 40. Uso y manejo de los filtros con el paso del tiempo.

El tamaño ideal de partículas que se utiliza en los filtros de agua es de 0.5 y 1mm[98], característica con la que nosotros cumplimos al realizar nuestros filtros.

Después de utilizar el filtro es recomendable colocarlo en algún espacio donde pueda secarse con ayuda del sol, de lo contrario puede crearse humedad el filtro y aproximadamente en 5 meses se empiezan a formar hongos pequeños.

Nuestro filtro es capaz de filtrar de 3.5 a 4.5 litros por hora sin ayuda de alguna energía externa.

Existen diferentes sistemas de filtraciones caseras, los cuales se muestran en la tabla 9 con el tiempo de filtrado de cada uno de ellos. Comparando los tiempos de filtrado de los sistemas comunes con el que nosotros construimos en este proyecto, podemos decir que se encuentra entre el promedio, incluso teniendo un mejor tiempo de filtrado que el Filtro Xilema y SIPP, por lo que tiene un gran potencial para ser utilizado en un futuro.

<b>COSISTEMA DE FILTRACION CASERA</b>	<b>L/h</b>
Bioarena (BSF)	171
Cubos (BF)	167
Vela cerámica (CCF)	6.4
Filtro poroso impregnado de plata Coloidal (SIPP)	3.5
Filtro Xilema	0.16
Filtro de Membrana	9
<b>Filtro construido en este proyecto</b>	<b>3.8</b>

**Tabla 9.** Tasa de filtración promedio para los sistemas de filtración casera comparados con nuestro filtro[73].

Consideramos que un filtro capaz de remover metales pesados en agua es primordial, los metales pesados en agua necesitan ser removidos para que la calidad de vida del ser humano mejore considerablemente, no se le da prioridad a esto, pero existen artículos, libros, investigaciones y reportajes donde se comprueba que los metales pesados producen infinidad de enfermedades[49][47], por lo que el tezontle es un compuesto natural que puede ser utilizado para la remoción de metales y contaminantes, de acuerdo a varios artículos científicos[106].

### **7.3.6. Ventajas y desventajas de los filtros fabricados en este proyecto**

#### **Ventajas**

- Precios y materiales accesibles.
- Las personas en comunidades alejadas, dónde no se tiene acceso a plantas potabilizadoras de agua, podrían construir su filtro para poder retirar este tipo de metales y evitar enfermedades
- Una ventaja de su tamaño es lo práctico que puede resultar este filtro para actividades extremas, como campamentos, incluso podría suministrarse a las fuerzas armadas para que aprendan a elaborarlos y sean utilizados en campo cuando no hay agua potable al alcance. Ya sea en desiertos, montañas, selvas o cualquier ecosistema.
- Una ventaja comercial podría ser para la industria privada, pues los comercios de aguas embotelladas podrían incluir y en algunos casos sustituir otros filtros existentes de mayor costo, para introducir este nuevo filtro, brindando la oportunidad de disminuir sus costos de producción.
- Si se sustituye el carbono activado por el carbón comercial podría ser una ventaja, disminuirá el costo del filtro y sería fácil de conseguir para las personas que viven en zonas rurales. El carbón activado puede hacerse en casa utilizando carbón comercial elevándolo a temperaturas muy altas.

#### **Desventajas**

- Una desventaja, es que el proceso como es artesanal/casero, puede carecer de calidad a la hora de producirlo, ya que sin supervisión o no siguiendo los pasos adecuados podrían no arrojar los resultados esperados.
- Una desventaja es el carbón activo que es menos fácil de conseguir en localidades alejadas.
- A escalas mayores, el transporte del tezontle podría ser un poco costoso.

## 8. Conclusiones

Podemos concluir que el tezontle utilizado en el proyecto, de acuerdo con la caracterización realizada por Difracción de rayos X de polvos es un material compuesto que contiene **Andesina** ( $\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5}\text{O}_8$ ), **Cuarzo** ( $\text{SiO}_2$ ), y **Hematita** ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El análisis Raman confirmó que el carbono es hibridación  $\text{sp}^2$  gracias a la presencia del pico de la banda G en el espectro. El Análisis elemental evidenció la presencia de carbono  $\text{sp}^2$ , en el equipo FLASH 2000: Se obtuvo 0.03 % para rojo, 0.06 % para negro, y 0.03 % para amarillo, el cual puede estar mezclado con el resto de los componentes, y que puede participar en la remoción de metales pesados de acuerdo con el mecanismo de remoción propuesto en el capítulo 7.2 .

De acuerdo al estudio XPS podemos decir que el espectro general muestra múltiples picos los cuales están asociados a las energías de enlaces de cada uno de los elementos presentes en la muestra; también se confirma la presencia de carbonatos, los cuales en base a estudios posteriores están relacionados con la adsorción de algunos metales pesados, por lo que podemos concluir que el tezontle es un material potencial que no requiere preparaciones complicadas para su uso en la remoción de contaminantes[1][38][107].

El tezontle es un compuesto natural compuesto por: cuarzo, albita, hematita y óxido de hierro de acuerdo con difracción de polvos de rayos realizada en este proyecto. Esta piedra volcánica puede ser utilizada en filtración de agua para remover metales pesados, para esto es necesario realizar más estudios especializados para confirmar la adsorción.

En el capítulo 15 se muestra que el filtro construido por nosotros es capaz de filtrar de 3.5 a 4.5 litros por hora sin ayuda de alguna energía externa, comparando los tiempos de los sistemas de filtrado con los resultados obtenidos podemos concluir que se encuentra entre los intervalos de la literatura y que los filtros realizados hasta esta parte del proyecto son una ventana de oportunidad para tener un factor de remoción de metales. Este proyecto brinda una oportunidad de tener un filtro con estas propiedades utilizando un material natural que no necesita ningún proceso químico para poder ser utilizado.

Se requieren más estudios para confirmar y determinar la forma en que se encuentra dispuesto el carbono  $\text{sp}^2$  en el tezontle, como: Análisis de componentes principales (PCA), Raman utilizando el software peakfit y Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS, también abreviada EDX o XEDS), etc

## 9. Perspectivas

- En cuanto a la caracterización del tezontle es importante valorar la composición del tezontle, para poder correlacionar sus propiedades con la remoción no solo de metales, sino también de otros contaminantes. Así como una evaluación sistemática del agua que sea procesada con los filtros.
- El filtro de agua utilizando tezontle como factor de remoción de contaminantes, tiene ventajas y desventajas, las cuales necesitan ser valoradas y analizadas para determinar si es un prototipo factible.
- Para aumentar la eficiencia y eficacia de los filtros caseros en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos, se puede complementar el proceso, implementando técnicas más avanzadas
- Utilizar tamices especiales que nos permitan determinar diferentes tamaños de partícula para los diferentes tipos de Tezontle.
- Hacer experimentos de remoción de metales pesados en agua, tomando en cuenta el pH, dureza del agua, tiempo de contacto.
- Medir el tiempo de adsorción, sorción y elaborar isothermas de adsorción para analizar con profundidad el comportamiento del compósito natural, pues de obtener un buen resultado tendríamos una excelente opción para la remoción de contaminantes, permitiendo reducir el costo de adquisición y que las personas tengan mayor acceso a este tipo de filtros, que normalmente son muy caros.
- Una vez terminado su tiempo de vida es importante encontrar una forma de disposición ideal
- Se pretende que en un futuro puedan elaborarse estructuras modernas y tecnológicas para que podamos tener un filtro con una mejor apariencia en nuestro hogar.

## 10. Productos académicos y publicaciones

Betancourt, M. L. G., Ramirez-Jimenez, S., Gonzalez-Hodges, A. N., **Nunez-Salazar, Z.**, Garcia, I. L. E., & Aparicio, J. R. (2021). Low Dimensional Nanostructures: Measurement and Remediation Technologies Applied to Trace Heavy Metals in Water. *Chapters*.

## 11. Bibliografía

- [1] A.N. Gonzalez Hodges, [1] A. N. Gonzalez Hodges, "Nanotubos de carbono multicapa dopados con nitrógeno crecidos sobre roca volcánica y su aplicación en la remoción de metales pesados," Tesis de Licenciatura, pp. 1–105, 2019. Nanotubos de carbono multicapa dopados con nitrógeno , Tesis de Licenciatura. (2019) 1–105.
- [2] E. Fassbender, Hans W.; Bornemisza, Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina, (1994) 420.
- [3] S.I.R.J. aría Luisa García-Betancourt, Z.E.N.S. Apsahara González-Hodges, I.L. Escalante-García, and J.R. Aparicio, Low Dimensional Nanostructures: Measurement and Remediation Technologies Applied to Trace Heavy Metals in Water, Intech. (2020) 25. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- [4] P. Méndez, G. Ramírez, A. César, R. Gutiérrez, D. Alma, P. García, Plant Contamination and Phytotoxicity Due To Heavy Metals From Soil and Water, Trop. Subtrop. Agroecosystems. 10 (2008) 19–44.
- [5] O. Lesbia Rosa Tirado Amador\*, E.O. , Farith Damián González-Martínez, Odon., Leonardo José Martínez Hernández, Est. Odon., Luis Alberto Wilches Vergara, Est. Odon., José Nelson Celedón-Suárez, Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en la salud, Combust. Explos. Shock Waves. 14 (2015) 1–16. <https://doi.org/10.1007/BF00789163>.
- [6] Ó.R. Mancilla-Villa, H.M. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, E. Uscanga-Mortera, R. Ramos-Bello, A.L. Reyes-Ortigoza, Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México, Rev. Int. Contam. Ambient. 28 (2011) 39–48.
- [7] I.W. TECHNOLOGY, Plantas de tratamiento de agua, (2020). <https://www.plantasdeosmosis.com/productos/25/plantas-de-tratamiento-de-agua/>.
- [8] A.N. Gonzalez Hodges, Nanotubos de carbono multicapa dopados con nitrógeno crecidos sobre roca volcánica y su aplicación en la remoción de metales pesados, Tesis de Licenciatura. (2019) 1–105.
- [9] B.E.L. Muñoz, J.M.D. Blanco, J.L.I. García, M.T.O. Gutiérrez, Uranium sorption on "tezontle" volcanic rock, J. Mex. Chem. Soc. 53 (2009) 239–242.
- [10] S. González Martínez, T. Millán Salazar, Ó. González Barceló, Filtración Aerada De Aguas Residuales Municipales Utilizando Un Medio Filtrante De Bajo Costo, Rev. AIDIS Ing. y Ciencias Ambient. Investig. Desarro. y Práctica. 3 (2011) 132–144.
- [11] Carbotecnia, Absorción y adsorción, (2022).
- [12] U. SEVILLA, Manual Del Carbón Activo, Aula.Aguapedia.Org. (2011) 1–89. [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod\\_resource/content/1/CARBON ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBON ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf).
- [13] J.M.D. Tascón, Materiales de carbono: Estructuras y formas, Opt. Pura y Apl. 40 (2007) 149–159.

- [14] Carbotecnia, Filtración y purificación, (2021).
- [15] QUIMICA.ES, Hibridacion concepto, (n.d.).
- [16] COATCACERES, Permeabilidad, (n.d.) 1–5.
- [17] I.N. DEL CANCER, pH definicion, (n.d.).
- [18] Definicion.de, Prototipo Concepto, (n.d.).
- [19] I. S.C., El Tezontle como Sustrato para la Producción Hortícola, (n.d.) 7.
- [20] M. de C.B. B, Tezontle, (n.d.).
- [21] R. Moliner, Del carbón activo al grafeno: Evolución de los materiales de carbono, Boletín Del Grup. Español Del Carbón. (2016) 2–5.
- [22] L. Pauling, The nature of the chemical bond. Application of results obtained from the quantum mechanics and from a theory of paramagnetic susceptibility to the structure of molecules, *J. Am. Chem. Soc.* 53 (1931) 1367–1400. <https://doi.org/10.1021/ja01355a027>.
- [23] M.L. García, Tipos de hibridación del átomo de carbono, (n.d.).
- [24] U. de Caligary, Tipos de Carbono, (2017). <https://www.tiposde.org/ciencias-naturales/533-tipos-de-carbono/>.
- [25] J. de C. y León, Tipos de Carbono- Energía y minería, (n.d.). <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/tipos-carbon.html>.
- [26] S.D. Pandey, L.C. Rocha, G. Pereira, C. Deschamps, J.L.E. Campos, N. Falcão, A. Prous, A. Jorio, Properties of carbon particles in archeological and natural Amazon rainforest soils, *Catena*. 194 (2020) 104687. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104687>.
- [27] J. Romanyà, P. Rovira, R. Vallejo, Analysis of soil carbon in Spanish agricultural soils. Relevant aspects in relation to the organic farming reconversion in the Mediterranean area., *Ecosistemas*. 16 (2007) 50–57.
- [28] J.L.O. Arredondo, J.Z.C. Ramos, J.J.M. Ramos, P.V. Tapia, S.E. Reyes, G.A. González, L.T. Chávez, Efficiency of soil and tezontle in production systems of tomato under greenhouse, *Rev. Fitotec. Mex.* 31 (2008) 367–374.
- [29] G. Nanotechnologies, ¿Qué es el Grafeno?, (n.d.). <https://www.graphenano.com/que-es-el-grafeno/>.
- [30] D.A.S. Galindo\*, D.A.R. Lucio\*, L.A.R. Mendoza\*, D.L.Y.L. López\*, M.C.J.G.F. Avilés\*\*, D.S.C.E. González\*\*\*, Aplicaciones de nanotubos de carbono, (2017). <https://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/uso-de-nanomateriales-en-polimeros-para-la-obtencion-de-bioempaques-en-aplicaciones-alimentarias>.
- [31] M.S. Dresselhaus, A. Jorio, R. Saito, Characterizing Graphene, Graphite, and Carbon Nanotubes by Raman Spectroscopy, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* 1 (2010) 89–108. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-070909-103919>.
- [32] B. Lira, A. Polo, E. Sánchez, Physical characterization of an extensive volcanic rock in México: “red tezontle” from Cerro de la Cruz, in Tlahuelilpan, Hidalgo, *Acta Univ.* 23 (2013) 9–16.
- [33] T. Sharifi, F. Nitze, H. Reza, C. Tai, M. Mazurkiewicz, A. Malolepszy, L. Stobinski, T. Wa, Nitrogen doped multi walled carbon nanotubes produced by CVD-correlating

- XPS and Raman spectroscopy for the study of nitrogen inclusion, *Carbon N. Y.* 50 (2012) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.03.022>.
- [34] D.I. Caviedes Rubio, R.A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta, I.J. Sandoval Rojas, *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión, Ing. y Región.* 13 (2017) 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>.
- [35] FERREX, *Materiales para construcción*, (n.d.).
- [36] I.T. de C. (ITCAMP), *Características del tezontle o piedra pomez*, (n.d.).
- [37] W. Wedekind, J. Ruedrich, S. Siegesmund, *Natural building stones of Mexico-Tenochtitlán: Their use, weathering and rock properties at the Templo Mayor, Palace Heras Soto and the Metropolitan Cathedral, Environ. Earth Sci.* 63 (2011) 1787–1798. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1075-z>.
- [38] B. Ponce Lira, A. Ortiz Polo, E.M. Otazo Sánchez, E. Reguera Ruiz, O.A. Acevedo Sandoval, F. Prieto Garcia, C.A. Gonzalez Ramírez, *Caracterización física de una roca volcánica abundante en México: “tezontle rojo” proveniente del Cerro de la Cruz, en Tlahuelilpan, Hidalgo, México, Acta Univ.* 23 (2013) 9–16. <https://doi.org/10.15174/au.2013.462>.
- [39] M. Vaca Mier, R. López Callejas, R. Gehr, B.E. Jiménez Cisneros, P.J.J. Alvarez, *Heavy metal removal with mexican clinoptilolite: Multi-component ionic exchange, Water Res.* (2001). [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00270-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00270-0).
- [40] V.M. Mabel, M.C. Laura, S.C. Mónica, M.M. Magdalena, J.C. Blanca, *Tratamiento Terciario De Aguas Residuales Por Filtración E Intercambio Iónico*, n.d.
- [41] L.I. Trejo-téllez, M. Ramírez-martínez, F.C. Gómez-merino, J.C. García-albarado, *Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán \** *Physical and chemical evaluation of volcanic rocks and its use for tulip production Resumen Introducción*, (2013) 863–876.
- [42] P. Vargas-Tapia, J.Z. Castellanos-Ramos, J. de J. Muñoz-Ramos, P. Sánchez-García, L. Tijerina-Chávez, R.M. López-Romero, C. Martínez-Sánchez, J.L. Ojodeagua-Arredondo, *Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México, Agric. Técnica En México.* 34 (2008) 323–331.
- [43] L. (UNAM) Tetzin, *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN UN FILTRO BIOLÓGICO AEROBIO UTILIZANDO TEZONTLE CON DOS DIFERENTES TAMAÑOS DE PARTÍCULA*, (2012).
- [44] U. de Barcelona, *Operaciones básicas de laboratorio*, (n.d.). [https://www.ub.edu/oblq/oblq\\_castellano/index1.html#](https://www.ub.edu/oblq/oblq_castellano/index1.html#).
- [45] F.C. C, *Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola Saccharum officinarum Surface area of activated and modified charcoals obtained from*, 34 (2017) 62–72.
- [46] Carbotecnia, *Carbón Activado*, (n.d.).
- [47] M. Eleonora, B. Pineda, B.M. *Ciencias Biológicas, Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación Heavy metals (Cd, Cr and Hg): impact on environment and possible biotechnological strategies for remediation* ALIDA MARCELA GÓMEZ

RODRIGUEZ, (2015) 82–113.

- [48] J. Leguía, P. Puma, Diseño de filtros de Bioarena para remover metales (As, Cd, Cr, Pb y Fe) en aguas de uso doéstico, (2016) 1–198.
- [49] S. Pabón, R. Benítez, R. Sarria, J. Gallo, Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción., *Entre Cienc. e Ing.* 14 (2020) 9–18. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-83672020000100009&Ing=en&nrm=iso&tIng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672020000100009&Ing=en&nrm=iso&tIng=es).
- [50] FACSA, Metales Pesados, (n.d.).
- [51] R. Apaza, M. Calcina, Contaminación Natural De Aguas Subterranas Por Arsénico En, *Rev. Investig. Altoandina.* 16 (2014) 52.
- [52] 2008. Kumar et al. 2012 Domenech y Peral, *Química ambiental de sistemas terrestres*, 2008.
- [53] J.Z. Castellanos, Intagri, Manejo y corrección de acidez en suelo, (n.d.). <https://www.intagri.com/articulos/suelos/manejo-y-correccion-de-acidez-de-suelo>.
- [54] Quimitube, ¿Qué es la dureza del agua y cómo se determina en el laboratorio?, (n.d.). <https://www.quimitube.com/dureza-del-agua/>.
- [55] CEUPE Magazine, Precipitación Química, (n.d.). <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-precipitacion-quimica.html>.
- [56] TELWESA, Nanofiltración, (2021). [https://telwesa.com/que-es-nanofiltracion/#:~:text=La nanofiltración es un proceso,que necesita \(figura 1\)](https://telwesa.com/que-es-nanofiltracion/#:~:text=La nanofiltración es un proceso,que necesita (figura 1)).
- [57] M.J. Viades Trejo, Fenomenos de superficie: Adsorción y Absorción, *Fenom. Superf. Adsorcion.* (2013) 1–17. [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion\\_23226.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion_23226.pdf).
- [58] O.S. Huerta, Adsorción Planta Piloto de Fermentaciones, *Dep. Biotecnol. -UAM.* (2015).
- [59] Química.es, Adsorción, (n.d.).
- [60] M. Herrejón Figueroa, B. Limón Rodríguez, Cinética e isothermas de adsorción de Pb(II) en suelo de Monterrey, *Ingenierías.* 11 (2008) 4.
- [61] R. RIVERA, Innovación para el Desarrollo y la Cooperación Sur., (2007). <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/diferencia-entre-filtracion-y-purificacion-de-agua/>.
- [62] G. Hernandez-Vargas, J.E. Sosa-Hernández, S. Saldarriaga-Hernandez, A.M. Villalba-Rodríguez, R. Parra-Saldivar, H.M.N. Iqbal, Electrochemical biosensors: A solution to pollution detection with reference to environmental contaminants, *Biosensors.* (2018). <https://doi.org/10.3390/bios8020029>.
- [63] M. Romero, Tratamientos Utilizados En La Potabilización De Agua, *Bol. Electron. Fac. Ing. - Univ. Rafael Landívar.* (2008) 1–12.
- [64] A. Fundación, Cómo hacer un filtro de agua casero, (2020). <https://www.fundacionaquae.org/consejos-filtro-casero-agua/>.
- [65] CAWST, Manual de construcción del filtro de bioarena, (2012). <https://resources.cawst.org/construction-manual/a90b9f50/biosand-filter->

construction-manual.

- [66] D.S. (seecon) Marco A. Bruni (seecon), Filtro Lento de Arena, Gestión de agua y saneamiento sostenible, (n.d.). <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtración-lenta-de-arena>.
- [67] S. LOGSDON, G., KOHNE, R., ABEL, S. and LABONDE, Slow Sand Filtration for small Water Systems., (2002).
- [68] E. Verde, Cómo hacer un filtro de agua casero para beber, (n.d.). <https://www.ecologiaverde.com/como-hacer-un-filtro-de-agua-casero-para-beber-1123.html>.
- [69] Cropaia, Filtracion rapida de arena, Cropaia. (2020). <https://cropaia.com/es/blog/filtracion-rapida-de-arena/>.
- [70] HUMMA, COMO FUNCIONA EL CARBON ACTIVADO, (2019). <https://humma.com.ar/como-funciona-el-carbon-activado/>.
- [71] J.K. Mwabi, F.E. Adeyemo, T.O. Mahlangu, B.B. Mamba, B.M. Brouckaert, C.D. Swartz, G. Offringa, L. Mpenyana-Monyatsi, M.N.B. Momba, Household water treatment systems: A solution to the production of safe drinking water by the low-income communities of Southern Africa, *Phys. Chem. Earth*. 36 (2011) 1120–1128. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.078>.
- [72] M.M. Ahammed, K. Davra, Performance evaluation of biosand filter modified with iron oxide-coated sand for household treatment of drinking water, *Desalination*. 276 (2011) 287–293. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.065>.
- [73] Nubia Esperanza Ibarra Peñaranda, Análisis de Filtros Caseros como Técnica de Potabilización del Agua en el Sector Rural ColombianoColombiano, Tesis de Licenciatura. 27722899 (2016) 75. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/6228/27722899.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [74] D.I. Caviedes Rubio, R.A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta, I.J. Sandoval Rojas, Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión, *Ing. y Región*. 13 (2015) 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>.
- [75] S. Jacques, C.J. Greet, D. Bastin, Oxidative weathering of a copper sulphide ore and its influence on pulp chemistry and flotation, *Miner. Eng.* 99 (2016) 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.09.023>.
- [76] M.S. Soriano Ortiz, Fanny Haydeé. Mg. De la Torre Ramirez, “EFICIENCIA DEL FILTRO DE ARCILLA EN LA PURIFICACIÓN DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN CAJAMARCA, Ucv. (2017) 358.
- [77] T. WATER, Guía de filtros y purificadores de agua domésticos, (n.d.). <https://tappwater.co/es/guia-filtros-purificador-de-agua/>.
- [78] M. Omid, A. Fatehinya, M. Farahani, Z. Akbari, S. Shahmoradi, F. Yazdian, M. Tahriri, K. Moharamzadeh, L. Tayebi, D. Vashae, Characterization of biomaterials, Elsevier Ltd, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100961-1.00007-4>.
- [79] J. Renau, M. Faura, Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido 1.- Introducción, (1994) 20. <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9313/CC->

011\_art\_5.pdf;sequence=1.

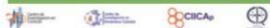
- [80] UNAM, Analisis elemental, (2019). <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/analisis-elemental.html>.
- [81] U. de Alicante, Analisis elemental, (n.d.). <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/analisis-elemental.html>.
- [82] M.A. Pimenta, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, L.G. Cançado, A. Jorio, R. Saito, Studying disorder in graphite-based systems by Raman spectroscopy, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 9 (2007) 1276–1291. <https://doi.org/10.1039/b613962k>.
- [83] M.S. Dresselhaus, A. Jorio, M. Hofmann, G. Dresselhaus, R. Saito, Perspectives on carbon nanotubes and graphene Raman spectroscopy, *Nano Lett.* 10 (2010) 751–758. <https://doi.org/10.1021/nl904286r>.
- [84] M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, A. Jorio, Raman spectroscopy of carbon nanotubes, *Phys. Rep.* 409 (2005) 47–99. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.10.006>.
- [85] D.M.K.U. Dra. M.I. Arriortua, Dr. J.L. Pizarro, Caracterización de Materiales Cristalinos- XDR técnica, (2006). <http://www.ehu.eus/imacris/PIE06/web/directorio.htm>.
- [86] D.D.R. Xrd, M.C. Beatriz, A. Rivera, Bruker D8 Advance SmartLab Rigaku Técnico responsable Detalles más importantes, (n.d.).
- [87] SGM (Servicio Geologico Mexicano), Difraccion de Rayos X, 22/03/2017. (2017). <http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html>.
- [88] D. Briggs, Surface analysis of polymers by XPS and static SIMS, (n.d.).
- [89] P. technology Labs, Particle Technology: BET specific surface area, (1971). <https://doi.org/10.1002/0471238961.partpark.a01.pub2>.
- [90] C. Zubieta, Capítulo 2: Métodos y Técnicas de caracterización, *Repos. Digit. Inst. La Univ. Nac. Del Sur.* (2010) 1–12. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2144/CAP2.pdf?sequence=5&isAllowed=y>.
- [91] S. Tachibana, W. Podrazky, New Schottky FE-SEM , SU5000, *Sci. Instrum. NEWS. Tech. Mag. Electron Microsc. Anal. Instruments.* 6 (2015) 44–47.
- [92] Thermo Fischer Scientific, Organic Elemental Analysis Flash 2000 - Elemental Analyser, ThermoScientific. (n.d.).
- [93] Thermo-Fisher, Thermo Scientific DXR Raman Microscope, (n.d.).
- [94] L.N. de I. en N. y Nanotecnología-IPICyT, Bruker D8 Advance SmartLab Rigaku, (n.d.).
- [95] W. Amelung, K. Kaiser, G. Kammerer, G. Sauer, Organic carbon at soil particle surfaces-evidence from x-ray photoelectron spectroscopy and surface abrasion, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 (2002) 1526–1530. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1526>.
- [96] A. Dobrzańska-Danikiewicz, D. Łukowiec, J. Kubacki, Investigations of electron properties of carbon nanotubes decorated with platinum nanoparticles with their varying fraction, *J. Nanomater.* 2016 (2016) 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/4942398>.

- [97] L.N. de I. en N. y Nanotecnología-IPICyT, ( XPS ) PHI 5000 VersaProbe II, (n.d.).
- [98] S. SOSTENIBLE, Tamaño de partícula, (2014). <http://sudsostenible.com/diseño-de-los-filtros-de-arena/>.
- [99] UNAM, Rocas ígneas- geofísica, (n.d.).  
[http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/Ccias\\_tierra\\_tarbuck-Ch4-Rslg.pdf](http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/Ccias_tierra_tarbuck-Ch4-Rslg.pdf).
- [100] I. Villa, I. Navarro, A. Martín, Elementos Traza, Tratado Nutr. (1999) 229–247.
- [101] G. Yu, Y. Lu, J. Guo, M. Patel, A. Bafana, X. Wang, B. Qiu, C. Jeffryes, S. Wei, Z. Guo, E.K. Wujcik, Carbon nanotubes, graphene, and their derivatives for heavy metal removal, *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 1 (2018) 56–78.  
<https://doi.org/10.1007/s42114-017-0004-3>.
- [102] C. Lee, M. Song, J. Ryu, C. Park, J. Choi, S. Lee, Chemosphere Application of carbon foam for heavy metal removal from industrial plating wastewater and toxicity evaluation of the adsorbent, *Chemosphere.* 153 (2016) 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.034>.
- [103] G. Salazar Quiroz, N.M. Mendoza, J. Carlos, M. Gomero, J. Martín, R. Rodríguez, S.N. Goyanes, J.R. Candal, S.P. Ponce Álvarez, Aplicación de los nanotubos de carbono para la eliminación de metales pesados en aguas, (n.d.).
- [104] J. Pérez López, M. Espigares García, Estudio Sanitario del Agua, (1995) 3.
- [105] Secretaria de Economía, Nmx-Aa-115-Scfi-2001 Análisis De Agua - Criterios Generales Para El Control De La Calidad De Resultados Analíticos Water Analysis - General Criteria for the Quality Control of Analytical Results, D. Of. La Fed. (2001).
- [106] G. Yáñez-Ocampo<sup>1</sup>, E. Sánchez-Salinas<sup>1</sup>, y M.L. Ortiz-Hernández<sup>1</sup>, REMOCIÓN BIOLÓGICA DE PARATIÓN METÁLICO Y TETRACLORVINFOS EN COLUMNA EMPACADA CON TEZONTLE, (2005) 2504. [https://smbb.mx/congresos/smbb/acapulco09/TRABAJOS/AREA\\_IV/CIV-98.pdf](https://smbb.mx/congresos/smbb/acapulco09/TRABAJOS/AREA_IV/CIV-98.pdf).
- [107] G. Yáñez-Ocampo, E. Sanchez-Salinas, G.A. Jimenez-Tobon, M. Penninckx, M.L. Ortiz-Hernández, Removal of two organophosphate pesticides by a bacterial consortium immobilized in alginate or tezontle, *J. Hazard. Mater.* 168 (2009) 1554–1561. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.047>.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

## INSTITUTO DE INVESTIGACION EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



CONTROL ESCOLAR DE LICENCIATURA



### VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaría Ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.  
Presente.

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó la C. **ZANDRA EUNICE NUÑEZ SALAZAR** con número de matrícula **20164009942** cuyo título es:

**“Carbono sp<sup>2</sup> en roca volcánica y su aplicación en filtros de agua para la remoción de metales pesados”**

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **LICENCIADO EN DISEÑO MOLECULAR Y NANOQUIMICA**

Cuernavaca, Mor a 30 de mayo del 2023

Atentamente  
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA  
DRA. MAYRA YANETH ANTÚNEZ MOJICA  
DRA. MARÍA LUISA GARCÍA BETANCOURT  
DR. MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR  
DR. JOSÉ JUAN RAMOS HERNÁNDEZ

(PRESIDENTE)  
(SECRETARIO)  
(VOCAL)  
(SUPLENTE)  
(SUPLENTE). NO PARTICIPA

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3270 / correo IICBA@uaem.mx



UA  
EM

Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

**Sello electrónico**

**MARIA LUISA GARCIA BETANCOURT** | Fecha:2023-06-01 16:20:36 | Firmante  
DBqU6kNOkydS9Gyl2ywaKpE77sd0vt0K64vz4WQd657BcPmouV/RUqbf9/gKH3Zn2N3jsie4BAvRShndomAADONNs4DMIGuzECCLZHvgJ3Q1SRBo69gbVOlVcHuQBMIqRGMj9xzzSqeQy3/600uviLkVG6+grn3yXnN7ks1nUIm/TO6Gh4kwAsW0jpylVWw3n2e0nFH4DDC+2mZIWXMjRit2itHVallpa0sOeQCAOLCIVUoHmiMz9N8quGJRwaa8TV0vJb26SWW BmjxKT2XhdQZ5h23QPNMihBaexNuTtAe3JlxZJTimOuPriadv7+XlR9v+BDZj6Rzy7H9+Zw==

**MAYRA YANETH ANTUNEZ MOJICA** | Fecha:2023-06-02 12:44:54 | Firmante  
XpArdVBek3NhzjKHVoFYhiGiwLRQVHvsrggUKbj0zGNgjIPqP8HD+Jxmy+63P19WhciZvOneGfaLpjdWcjYWIcQLx1WzqTXDBelKSheST5oGJbDzluElkirkH77XlqqhIEfcuAnrs2RLEm24cpYqoaarqnBSjV7ULWmqG4HOcq0Qzkr06jQvLPR+cxFrMxBpHadBHx7pYEYIWU6SxCB8KvbuAUUWdrrsJ/Qx1QRf2VeGrRbsKFDeK6TL+KGeuStDpjoijZP+WZF4f+Ka8MiwU0kPT5/9jwe4QwCpAsprypeJfIB95RYM2nNjisc3IC8EOAnX13UdM+MlcbA==

**HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA** | Fecha:2023-06-02 14:43:32 | Firmante  
eJrV1virwzbdhQS63jcXxz47G0ncGz4yT9DHoR+xvsAtEiFVgSDXX0eF0McTW/48gJsnclgl9VcWSsQTYL0U2AWC+1QPqEVX4tjpUhnFKm4PVZSSWYhpt/xjHdPe4Kh5Wvs5bBb9e9J268ywmTeT6KvATblbjZto36V+grpUN+TOIRGcBS7IMuozcwEmJeoWHmbhcGjTeSxjIXKHLw1GOxdIGdh8zQlCsimulzKfYcwITUJ+TLwYY9COvD4OyszkcEn+hVnApx8Peoc6PhFul0FEqdKNw3CqmgBLZ7E+ByRSLdVUVJ+nniCTWDjcBO/ABUCX4pnBuWLo7e+A==

**MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR** | Fecha:2023-06-05 14:32:28 | Firmante  
PUIUpUwaVmTDb9+glw5snnwUNhB/nR3syqbqz01p2wpE2q+Ql85Ak+EsKGrURal7qW+dKLoTA/E6VqAQxnpBstr3g3Ha/FdWuWfB7KLG67tcYCBN0rJ6F45cC8jx28uJg7akJYaF2ozgNg20auxsYgPnD22w7/LGTyOk83QCR6leyDE7CEMrNuW4BjH8Lr6KJkBB0TUEiaogA47j/G26tCRG0rwYd5g5u51axSmfXQTRb4OBss23l6yF0kD94Q1XVythVfYR0U8M9D2N3zdV12l5ORICWAltW8Npdt1oqFCHI2afRO0gmbPuUq3HoZkIGDVeW1JcCpFA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



K0xOTyrBp

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/42KbJlqDHS0EqWk8lxAJGZzMVfHtmC6>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023