

**PROPUESTA DEL USO DE BIOMASA DE LA INDUSTRIA DEL CAFÉ Y
ASPERGILLUS NIGER EN EL DISEÑO DE UN BIOADSORBENTE PARA LA
REMOCIÓN DE METALES PESADOS**

**DIANA CAROLINA BECERRA RINCÓN
LUISA FERNANDA NIÑO PACHECO**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Orientador
DIANA MILENA MORALES FONSECA
Microbiólogo Industrial. MSc.**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
INGENIERÍA
INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Diana Milena Morales Fonseca
Firma del Director

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D. C. Febrero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

(Dr). MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

(Dr). LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica de investigación

(Dra). MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

(Dr). RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

(Dra). ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de la facultad

(Dr). JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director de Programa

(Dr). NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a Dios por darme la posibilidad y la fortaleza para cumplir esta meta en mi vida, por ser mi guía espiritual y ayudarme a superar cada uno de los momentos difíciles que se presentaron en el camino.

A mis padres y mi hermana Mery , German y Gina por ser pilares fundamentales en mi vida, por guiarme, ayudarme y motivarme a cumplir cada uno de mis sueños, por inculcarme la mejor educación, formarme con valores, buenos sentimientos y ser mi motor y apoyo todos los días.

A mi compañera de tesis Luisa quien fue mi bastón de apoyo a lo largo de la carrera, le agradezco por su colaboración, amistad y confianza

A mis amigos por su apoyo, su amistad, por sus consejos, por compartir conmigo esta etapa de mi vida y por su gran colaboración en este proceso de formación.

A todas las personas que me impulsaron, creyeron en mí y me ayudaron a cumplir con este gran logro.

Diana Carolina Becerra Rincón.

DEDICATORIA

Durante mi tiempo de vida, siempre he tenido personas que han ayudado y me han formado en carácter para ser quien hoy en día soy, su apoyo incondicional dio como resultado la inspiración necesaria para lograr la meta.

Dedico este trabajo a cada una de las personas que estuvieron presentes a lo largo de su desarrollo, en primer lugar al creador de la vida cuyo plan para mí apenas comienza, a mis padres Evangelina y José Luis que siempre están y estarán a mi lado en cualquier situación que atraviese, a mis hermanas Alejandra y Alexandra cuyas almas afines a la mía son la necesidad de ser mejor cada día, finalmente a Diana que más que mi compañera de tesis ha sido una amiga incondicional que sin duda alguna me impulsó para completar no solo este trabajo sino mi carrera en general.

Luisa Fernanda Niño Pacheco.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen:

A Dios, por permitirnos culminar esta etapa en nuestras vidas y darnos todas las posibilidades para no desfallecer a lo largo del proceso.

A nuestra directora del proyecto de grado Diana Milena Fonseca Morales, por su constante y efectiva comunicación, respuesta y dedicación en la guía que nos otorgó para la elaboración del trabajo realizado.

A los Docentes que nos compartieron sus conocimientos y tuvieron la disposición para guiarnos y ayudarnos a crecer académicamente.

A nuestras familias por ser nuestro apoyo constante y darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente.

Las directivas de la universidad de américa, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1 MARCO TEÓRICO	21
1.1 Agua residual	21
1.1.1 Domésticas	21
1.1.2 Industriales	21
1.1.3 Aguas Blancas	21
1.2 Metales pesados	22
1.3 Metales pesados en el ecosistema acuático	22
1.3.1 Plomo	23
1.3.2 Mercurio	24
1.3.3 Cadmio	25
1.3.4 Arsénico	26
1.3.5 Cobre	27
1.3.6 Cromo	27
1.4 Tratamiento químico para la remoción de metales pesados de aguas residuales	28
1.4.1 Filtración por Membrana	28
1.4.2 Intercambio Iónico	33
1.4.3 Adsorción (Convencional)	34
1.4.4 Precipitación química	36

1.4.5	Electrocoagulación	37
1.4.6	Coagulación-Floculación	38
1.4.7	Electrofloculación	39
1.4.8	Flotación	40
1.4.9	Fotocatálisis	41
1.5	Biomasa microbiana para la remoción de metales pesados	42
1.5.1	Aspergillus	42
1.6	Biomasa residual para la remoción de metales pesados	43
1.6.1	Residuos de la industria cafetera	43
1.7	Tratamiento biológico para la remoción de metales pesados de aguas residuales	44
1.7.1	Bioaumentación	44
1.7.2	Bioestimulación	45
1.8	Mecanismos de biorremoción de iones metálicos	45
1.8.1	Procesos químicos	45
1.8.2	Procesos celulares	45
1.8.3	Procesos físicos	46
1.9	Factores que determinan la eficacia de la adsorción	47
1.10	Legislación	47
1.10.1	Resolución 0631 del 17 Marzo de 2015	48
1.10.2	Decreto 1594 de 1989	48
1.10.3	Resolución 1074 de 1997	49
1.10.4	Acuerdo CAR 43 del 17 de octubre de 2006	49
2	ANTECEDENTES	50
3	CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LA PULPA DE CAFÉ	54
3.1	Caracterización bibliográfica	54

3.2 Propiedades de la pulpa de café	57
3.2.1 Composición química	57
3.2.2 Efectos del secado	59
3.2.3 Compuestos orgánicos	60
3.2.4 Minerales	63
3.2.5 Polisacáridos estructurales	64
3.2.6 Aminoácidos	67
3.3 Pulpa de café como sustrato	69
3.4 Conclusión	75
4 CONDICIONES OPERACIONALES PARA EL DESARROLLO DE UN BIOADSORBENTE (PULPA DE CAFÉ Y <i>ASPERGILLUS NIGER</i>)	76
4.1 Caracterización bibliográfica	76
4.2 Identificación morfológica del <i>Aspergillus niger</i>	86
4.2.1 Métodos de identificación	86
4.2.2 Morfología	88
4.3 Remoción de metales pesados	90
4.3.1 Remoción de metales pesados por parte del <i>Aspergillus niger</i> vs otros microorganismos	90
4.3.2 Remoción por <i>Aspergillus niger</i>	96
4.3.3 Remoción de Cr (VI) por <i>Aspergillus niger</i>	99
4.3.4 Remoción de Cr (VI) por pulpa de café	105
4.4 Condiciones óptimas para la remoción de Cr (VI) por <i>Aspergillus niger</i>	107
4.4.1 Efecto del pH	107
4.4.2 Efecto de la temperatura	108
4.4.3 Efecto de la concentración de ion metálico	109
4.4.4 Efecto de la concentración de la biomasa	109

4.5 Características para la asociación entre <i>Aspergillus niger</i> y la pulpa de café	112
4.5.1 Tipo de fermentación	112
4.5.2 Interacción pulpa de café y <i>Aspergillus niger</i>	115
4.6 Conclusión	118
5 PROTOCOLO PARA EL DESARROLLO DEL BIOADSORBENTE ENTRE PULPA DE CAFÉ Y <i>ASPERGILLUS NIGER</i>	120
5.1 Caracterización bibliográfica	120
5.2 Diseño metodológico	124
5.2.1 Caracterización de la biomasa	124
5.2.2 Microorganismo y la preparación del inóculo	126
5.2.3 Fermentación en estado sólido	126
5.2.4 Generación del bioadsorbente	129
5.3 Conclusión	135
6 CONCLUSIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	137
ANEXOS	150

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Documentos por año pulpa de café	55
Figura 2 y 3. Documentos por tipo y área de investigación de la pulpa de café	55
Figura 4. Árbol de decisión búsqueda bibliográfica	56
Figura 5 y 6. Documentos por tipo y área de investigación de la pulpa de café seleccionados	57
Figura 7. Documentos por año morfología <i>Aspergillus niger</i>	77
Figura 8. Documentos por área de investigación del <i>Aspergillus niger</i>	78
Figura 9 y 10. Documentos por tipo y área de investigación del <i>Aspergillus niger</i> seleccionados	79
Figura 11. Documentos por año sobre la biorremediación de metales pesados	80
Figura 12. Documentos por área de investigación sobre la biorremediación de metales pesados	81
Figura 13. Diagrama de flujo para la búsqueda bibliográfica	82
Figura 14 y 15. Documentos por tipo y área de investigación sobre la biorremediación de metales pesados seleccionados	83
Figura 16. Documentos por año sobre la fermentación mediante <i>Aspergillus niger</i>	84
Figura 17. Documentos por área de investigación sobre la fermentación mediante <i>Aspergillus niger</i>	85
Figura 18 y 19. Documentos por tipo y área de investigación sobre la fermentación es estado sólido y sumergidos utilizando <i>Aspergillus niger</i> seleccionados	86
Figura 20. Documentos por año para la asociación entre la pulpa de café y <i>Aspergillus niger</i>	121
Figura 21 y 22. Documentos por tipo y área de investigación para la asociación entre la pulpa de café y <i>Aspergillus niger</i>	122
Figura 23. Árbol de decisión búsqueda bibliográfica para el bioadsorbente	123
Figura 24 y 25. Documentos por tipo y área de investigación seleccionados para la asociación entre la pulpa de café y <i>Aspergillus niger</i> seleccionados	124
Figura 26. Diseño Metodológico	131
Figura 27. Ciclo de vida del <i>Aspergillus niger</i>	132
Figura 28. Generación del inóculo en el sustrato con la cepa	132
Figura 29. Comienzo del crecimiento del microorganismo	133

Figura 30. Crecimiento avanzado del microorganismo	133
Figura 31. Vista del bioadsorbente	134

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales metales pesados utilizados en la industria, hogares y la zona minera	23
Tabla 2. Condiciones de la electrodiálisis en diferentes estudios como técnica para la eliminación de metales pesados	30
Tabla 3. Condiciones de la técnica de osmosis inversa en diferentes estudios	31
Tabla 4. Técnica de Nanofiltración en diferentes estudios	32
Tabla 5. Ultrafiltración en diferentes estudios para remover metales pesados	33
Tabla 6. Condiciones experimentales de intercambio iónico a través de resinas	34
Tabla 7. Condiciones experimentales de algunos carbones	35
Tabla 8. Condiciones experimentales de nanotubo de carbón con otros complementos	36
Tabla 9. Remociones de metales pesados empleando técnicas de precipitación química	37
Tabla 10. Condiciones experimentales para remover metales pesados mediante electrocoagulación	38
Tabla 11. Remoción de metales pesados mediante Coagulación-Floculación	39
Tabla 12. Remoción de metales pesados mediante Electroflocculación	40
Tabla 13. Remoción de metales pesados mediante la técnica de flotación	41
Tabla 14. Fotocatálisis como método para la eliminación de metales pesados	42
Tabla 15. Valores máximos permitidos en el agua para recurso humano	48
Tabla 16. Valores máximos permitidos en el agua para vertimiento en la red de alcantarillado	49
Tabla 17. Composición química de la pulpa de café en porcentaje	58
Tabla 18. Compuestos Orgánicos en la pulpa de café	60
Tabla 19. Otros Compuestos orgánicos en la pulpa de café	62
Tabla 20. Cenizas y minerales en la pulpa de café	63
Tabla 21. Polisacáridos estructurales en la pulpa de café	65
Tabla 22. Afinidad grupos funcionales e iones metálicos	67
Tabla 23. Aminoácidos presentes en la proteína de la pulpa de café	68
Tabla 24. Tabla resumen	71
Tabla 25. Taxonomía del género <i>Aspergillus</i>	88
Tabla 26. Diámetro de colonias y dimensiones de las estructuras de la especie <i>Aspergillus niger</i>	89

Tabla 27. CMI de diferentes microorganismos para 4 tóxicos	92
Tabla 28. Tabla resumen para CMI e IT de diferentes microorganismos para diferentes metales	93
Tabla 29. Tabla resumen para % de remoción en diferentes microorganismos para diferentes metales	95
Tabla 30. <i>CMI e índice de tolerancia del Aspergillus niger frente a metales tóxicos</i>	97
Tabla 31. Porcentaje y capacidad de biorremoción del <i>Aspergillus niger</i>	98
Tabla 32. Capacidad de reducción de Cr (VI) por la cepa de <i>Aspergillus niger</i> a 28°C y pH 6	101
Tabla 33. Capacidad de reducción de Cr (VI) por la cepa de <i>Aspergillus niger</i> muerta a pH 2	102
Tabla 34. Características del <i>Aspergillus niger</i> en estado abiótico	103
Tabla 35. Parámetros de sorción de Cr (VI) mediante el modelo de Langmuir	104
Tabla 36. Datos de sorción de Cr (VI) mediante el modelo de Langmuir	106
Tabla 37 y 38. Tablas resumen para las condiciones que mejora la remoción de Cr (VI) en estado biótico y abiótico mediante <i>Aspergillus niger</i>	110
Tabla 39. Condiciones para favorecer la remoción de Cr (VI) en estado biótico y abiótico mediante <i>Aspergillus niger</i>	112
Tabla 40. Composición porcentual de la pulpa de café sin fermentar y luego de la fermentación sólida, usando <i>Aspergillus niger</i> y la tecnología de fermentación por bandeja	114
Tabla 41. Composición química porcentual de la pulpa de café sin fermentar y fermentada (Base seca)	115
Tabla 42. Enzimas producidas por el <i>Aspergillus niger</i>	116
Tabla 43. Complementos nutricionales para el sustrato	129

RESUMEN

Los metales pesados son los principales precursores de contaminación en los efluentes acuáticos, especialmente el Cr (VI) proveniente en su mayoría de la industria minera y de curtiembres, así mismo se encuentran otros residuos que contribuyen a esta contaminación como lo son los derivados de la industria del café. Una de las tecnologías que puede llegar a remediar este tipo de problemas son las de origen biológico, en donde se resalta el uso de microorganismos capaces de utilizar estos contaminantes como nutrientes para su crecimiento, esto conlleva a realizar una investigación en donde se revisen las condiciones para proponer un bioadsorbente a partir de la asociación entre la pulpa de café y el *Aspergillus niger* para la remoción de metales pesados.

Este trabajo se inicia con una recopilación bibliográfica acerca de las características de la pulpa de café que la convierten en un buen sustrato para el crecimiento del hongo seleccionado, aquí también se resalta su poder como adsorbente de iones metálicos. Posteriormente se identifican las propiedades del *Aspergillus niger* en cuanto a su morfología y su capacidad de remoción de diferentes iones metálicos, seleccionando el Cr (VI) por su gran toxicidad y presencia en cuerpos de agua, a partir de esto se determinan las condiciones que favorecen este proceso de remoción y el estado en el cual se debe encontrar la biomasa fúngica para obtener resultados eficientes. Finalmente teniendo en cuenta la investigación teórica realizada se procede a proponer el protocolo para la elaboración del bioadsorbente tipo filtro prensa en estado tanto biótico como abiótico.

PALABRAS CLAVES: abiótico, *Aspergillus niger*, beneficio húmedo, bioadsorbente, biótico, biotransformación, *Coffea arabica*, concentración mínima inhibitoria, fermentación, índice de tolerancia, metal pesado, morfología, Pulpa de café, remoción, sustrato.

ABSTRACT

Heavy metals are the main precursors of pollution in aquatic effluents, especially Cr(VI) coming mostly from the mining and tannery industry, There are also other residues that contribute to this pollution, such as those derived from the coffee industry. One of the technologies that can remedy this type of problem are those of biological origin, where the use of microorganisms capable of using these pollutants as nutrients for their growth is highlighted, this leads to an investigation in which the conditions for proposing a bioadsorbent are reviewed based on the association between coffee pulp and *Aspergillus niger* for the removal of heavy metals.

This work begins with a bibliographic collection about the characteristics of the coffee pulp that make it a good substrate for the growth of the selected fungus, here also highlights its power as an adsorbent of metal ions. Subsequently, the properties of *Aspergillus niger* are identified in terms of its morphology and its ability to remove different metal ions, selecting Cr (VI) for its great toxicity and presence in bodies of water, the conditions that favour this removal process and the state in which the fungal biomass must be found in order to obtain efficient results are determined. Finally, taking into account the theoretical research carried out, we propose the protocol for the development of the bioadsorbent type filter press in both biotic and abiotic state.

KEYWORDS: abiotic, *Aspergillus niger*, wet benefit, bioadsorbent, biotic, biotransformation, *Coffea arabica*, minimal inhibitory concentration, fermentation, tolerance index, heavy metal, morphology, coffee pulp, removal, substrate.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las actividades industriales dejan como contaminantes los metales pesados que al no ser degradables se acumulan en la atmósfera, el ecosistema terrestre y el acuático. Estas sustancias en altas proporciones son consideradas tóxicas y nocivas para la salud y los ecosistemas, afectando directamente la cadena alimenticia, las fuentes hídricas, la flora y la fauna, por tal motivo se requiere de un tratamiento eficiente que disminuya la cantidad de contaminantes presentes para cumplir con lo establecido en las normas ambientales tanto nacionales como internacionales de los niveles de concentración permitidos de metales en el vertimiento de aguas superficiales y de alcantarillado, como en lo decretado en la resolución 0631 del 2015.

«No solo los metales pesados son el problema, el desperdicio de la pulpa de café por parte del sector cafetero también tiene un gran efecto sobre el ecosistema y el medio ambiente, debido a que por cada millón de sacos de 60 kg de café de almendra que exporta Colombia, se genera 162.900 toneladas de pulpa fresca que en muchos casos al no tener un uso produce contaminación que es equivalente a la generada durante un año en excretas y orina por una población de 868.736 habitantes» [1].

Teniendo en cuenta esta problemática se busca proponer un método capaz de eliminar o de reducir la concentración de los iones metálicos partiendo de la bibliografía, en donde se le dará un valor agregado a la pulpa de café la cual se utilizará como sustrato del *Aspergillus niger* para la formación de un bioadsorbente. Para esto se realizó un análisis bibliográfico, en cual se seleccionaron los parámetros fundamentales para la especificación del protocolo.

Para empezar el desarrollo de este trabajo se realizó una caracterización bibliográfica partiendo de la literatura para identificar la composición fisicoquímica de este potencial sustrato y que sustancias llegaran a ser de utilidad para el crecimiento del microorganismo, de este modo se podrá utilizar un desecho considerado como un contaminante, para la remoción de sustancias tóxicas en los ecosistemas acuáticos. Por otro lado se estudiarán las propiedades del *Aspergillus niger* como microorganismo de interés, el cual se comparará con otras especies para resaltar su viabilidad en los procesos de biorremoción de diferentes metales pesados especialmente del Cr (VI), así mismo se reconocerán las condiciones óptimas para la remoción de este metal y el estado en el cual se encontrará la biomasa fúngica que permita una mayor remoción. Por último se procede a establecer los pasos o protocolo para el desarrollo de dicho bioadsorbente teniendo

en cuenta el acondicionamiento de la biomasa, la inoculación, el tipo de fermentación y la obtención de la geometría final.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer el uso de pulpa de café y biomasa de *Aspergillus niger* en la obtención de un bioadsorbente para la remoción de metales pesados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las características fisicoquímicas de la pulpa de café a través de un análisis bibliográfico.
- Identificar las condiciones operacionales que permitan el desarrollo de un bioadsorbente (pulpa de café y *Aspergillus niger*).
- Especificar un protocolo para el desarrollo del bioadsorbente de pulpa de café y biomasa de *Aspergillus niger* en asociación biótica y abiótica.

1 MARCO TEÓRICO

A continuación se encuentran los principales conceptos que hacen parte del lenguaje de la temática para el tratamiento de aguas residuales.

1.1 Agua residual

Son aquellas aguas y materiales derivados de residuos domésticos o industriales, las cuales no se pueden desechar vertiéndose sin un tratamiento previo, resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos que provienen de residencias, edificios, industrias, actividades agrícolas, clasificadas en [2]:

1.1.1 Domésticas

Residuos humanos que llegan a la red de alcantarillado por medio de descargas e instalaciones hidráulicas, así mismo en residuos originados en establecimientos públicos y comerciales [2]. “Este tipo de agua se compone en un 99,9% de agua potable y un 0,1% de sólidos suspendidos, siendo un 70% orgánicos y un 30% inorgánicos, donde los orgánicos presentan una composición del 40 al 60%, carbohidratos del 20 al 50% y grasas del 6 al 12%. Y entre los sólidos inorgánicos se encuentran arenas, sales y metales” [3]. “Generalmente no contienen elementos peligrosos ni tóxicos, pero presentan gran cantidad de patógenos y agentes infecciosos como los *Coliformes fecales, totales, Escherichia coli*, entre otros, los cuales se deben fundamentalmente a los desechos humanos y animales, donde las sustancias predominantes son el nitrógeno y el amonio de las excretas” [4].

1.1.2 Industriales

“constituyen desechos líquidos procedentes de procesos realizados por fábricas e industrias los cuales contienen aceites, detergentes, ácidos, grasas, antibióticos, subproductos químicos vegetales y animales” [5].

1.1.3 Aguas Blancas

“pueden proceder de la atmósfera como la lluvia, las cuales fluyen desde los techos, calles, jardines y demás superficies del terreno, una parte es drenada y conducida a la red de

alcantarillado y otra queda en la superficie arrastrando tierra, arena, hojas, residuos o riegos y limpieza de los parques, calles y lugares públicos” [5].

Este tipo de aguas traen consigo diferentes inconvenientes que pueden afectar a la salud de los seres vivos y los ecosistemas; como lo son malos olores y sabores dada las sustancias que se encuentran en estas, proliferación microbiana, procesos de descomposición y disminución de sulfatos y sulfitos, acción tóxica por compuestos orgánicos e inorgánicos, entre otros.

1.2 Metales pesados

Se entiende por metales pesados a elementos que están presentes en la naturaleza los cuales cuentan con un alto peso molecular y alta densidad, estos en grandes concentraciones resultan ser tóxicos y contaminantes [6]. «Se distinguen dos grupos fundamentales: el primero son los micronutrientes que son necesarios para el organismo y la vida humana, se requieren en pequeñas cantidades As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, V, Zn y Se, en el segundo grupo encontramos los metales pesados no esenciales los cuales en ciertas cantidades provocan disfunciones en el organismo, estos son Be, Hg, Pb, Sb, Sn, Ti y Cd» [7].

Los metales pesados al no ser degradables, se depositan en los entornos aire, agua y suelo, pero se encuentran presentes principalmente en aguas residuales las cuales proceden de sectores industriales como la minería, refinería, curtiembres, entre otros. Por tal razón se requiere en primera instancia implementar un tratamiento para la remoción de dichos metales.

1.3 Metales pesados en el ecosistema acuático

«Los metales pesados, tales como el cadmio, mercurio, plomo, cobre, zinc, entre otros, son considerados como serios contaminantes de los ecosistemas acuáticos, por su persistencia en el ambiente, toxicidad y habilidad para ser incorporados en la cadena alimenticia. También pueden causar graves daños a nivel celular, dada su capacidad para desnaturalizar proteínas, ser asimilados por el fitoplancton y organismos filtradores, provocando graves alteraciones ecológicas y biológicas al ecosistema [...]. Los metales que entran al mar como producto de las emisiones terrestres pueden disolverse en el agua o ser transportados directamente a los sedimentos acuáticos. Si un metal excede el límite de solubilidad en el agua, puede precipitar como una fase sólida o ser adsorbido en el material en suspensión y finalmente depositarse en los sedimentos. Muchos organismos acuáticos pueden absorber o liberar metales directamente de los sedimentos. Algunos de ellos pueden, también, formar compuestos volátiles debido a la actividad biológica o a cambios en las condiciones redox del agua y de los sedimentos» [8].

Tabla 1.

Principales metales pesados utilizados en la industria, hogares y la zona minera.

Metal	Industria
Cadmio	
Cromo	Industrial y doméstico
Estaño	Industrial metalúrgica y tratamiento de superficies metálicas.
Níquel	Cromo III en curtido de pieles
Zinc	
Cobre	Electricidad, fitosanitarios, pinturas
Plomo	Fabricación y reciclaje de baterías, pinturas, aditivo de combustibles
Selenio	Electrónica, cosméticos
Arsénico	Electroquímica, fluorescentes, termómetros
Cianuro	Industria química, plaguicidas, textiles, plásticos, metal.

Nota: Esta tabla muestra los principales metales pesados utilizados en la industria, hogares y la zona minera. Tomado de EMACSA

1.3.1 Plomo

“Es uno de los metales más abundante en la naturaleza, tiene número atómico 82 y peso atómico 207, densidad específica de 11.4 a 16°C. Presenta color azul, punto de ebullición de 1725°C, punto de fusión de 327.4°C y cuenta con la capacidad de formar sales, compuestos organometálicos y óxidos” [9]. “Entre los minerales de mayor importancia de plomo se encuentra la galena (PbS), la cerusita (PbCO₃), la crocoita (PbCrO₄) y la piromorfita (Pb₅(PO₄)₃Cl)” [10].

Este es utilizado principalmente en la fabricación de acumuladores, soldadura, municiones, elementos de construcción, pigmentos, joyería, cosmetología, aleaciones de cerámica, radiación atómica, insecticidas, forros para cables, fábricas de baterías, uso de gasolina entre otros [11].

La exposición de plomo se lleva a cabo en el proceso de inhalación o vía oral la cual es la más común para la intoxicación, además puede entrar por la comida en (65%), aire (15%) y agua (20%) en este caso la contaminación por plomo se da debido a la corrosión en las tuberías [7]. “Esto causa diferentes problemas en la salud como el retraso mental de los niños, enfermedades cardiovasculares, hipertensión, daño en los riñones, daño en el cerebro, abortos, disminución en

la fertilidad del esperma, anemia, siendo las mujeres embarazadas las principales afectadas” [12].

«En el medio ambiente, las altas concentraciones se encuentran principalmente por la intervención humana especialmente por su uso en combustibles, ya que al ser utilizado en los motores, se genera sales como el cloruro, bromuro y óxidos los cuales son procedentes del plomo quemado. Dichas sales se incorporan a los ecosistemas, donde las partículas de mayor tamaño se precipitan en los suelos y los efluentes hídricos causando envenenamiento de especies presentes en ellos, mientras que las partículas ligeras ascienden a la atmósfera y se distribuyen en el aire provocando contaminación y entrando en la cadena alimenticia. Por otro lado también provienen de diferentes tipos de industria como el petróleo, la combustión de residuos sólidos, pinturas y de aquellas tuberías de plomo que presentan corrosión» [...]. Este metal tiene un gran efecto negativo en los mares dado que altera las funciones del fitoplancton [13].

1.3.2 Mercurio

«Metal noble perteneciente al grupo IIB con número atómico 80, peso atómico 200.59 con punto de fusión de -38.4°C , punto de ebullición 357°C , que presenta color blanco plateado, este existe en diferentes formas como elemental e inorgánico u orgánico. Cuenta con una gran cantidad de isótopos naturales como 202 (29.8 %), 200 (23.13 %), 199 (16.84 %), 201 (13.22%), 198 (10.02 %), 204 (6.85 %) y 196 (0.146 %) y minerales como la corderoíta ($\text{Hg}_3\text{S}_2\text{Cl}_2$), la livingstonita ($\text{Hg Sb}_4\text{S}_7$), la montroidita (HgO), el calomel (HgCl) y el metacinabrio» [14].

“En su forma natural proviene de actividad volcánica, erosión de las rocas o actividad humana siendo esta la principal fuente de emisión” [7].

“Es utilizado en fabricación de pilas, empastes dentales, agricultura, minería de oro, cobre plata y carbón, pinturas, productos farmacéuticos, catálisis, aparatos eléctricos, cremas y jabones, producción de papel, fármacos, termómetros, incineración de residuos peligrosos y biológicos infecciosos” [...]. «La principal ruta de ingreso para a los humanos es la cadena alimenticia ya que los peces que se encuentran en el ecosistema acuático contaminado por mercurio son transmisores de este contaminante y termina finalmente en los seres humanos provocando enfermedades e intoxicación. Entre los síntomas producidos ante exposición constante a este elemento se presenta la taquicardia, gingivitis pérdida de memoria, delirio, cáncer, alucinaciones, excitabilidad, problemas neurológicos, temblores y pérdida de la sensibilidad en las extremidades debido a la neurotoxicidad, además que puede provocar pérdida de visión y audición, espasmo, coma y la muerte, entre otros » [...]. A nivel ambiental tienen

efecto sobre la atmósfera, el agua, el suelo y la biota, los sedimentos y la fauna provocando coagulación de la mucosa digestiva, gastroenteritis, daño en los riñones en el colon y estomatitis, alteración en la presión sanguínea, sistema renal, neumonía, en hembras embarazadas afecta la fertilidad, entre otros [12].

“En el agua, en el suelo y en las bacterias metanógenas, a través de un proceso de metilación, transforman el HgO en MeHg, la forma más tóxica de este metal. Esta modificación lo hace más lipofílico, por lo cual se acumula fácilmente en la cadena trófica animal. El MeHg se une a las proteínas de las algas y del plancton” [15].

“Cuando los valores de pH están entre cinco y siete en las aguas superficiales, las concentraciones de Mercurio en el agua se incrementarán debido a la movilización del Mercurio en el suelo, acumulándose en las plantas y champiñones” [13].

1.3.3 Cadmio

«Elemento químico perteneciente al grupo IIB con número atómico 48, peso atómico de 112.40, punto de fusión de 310.9°C y de ebullición 765°C, este es difícil y raro de encontrar razón por la cual se asocia al zinc. Es un metal dúctil, maleable y blando, presenta un color blanco con matiz azul, es divalente en todos sus compuestos estables y su anión incoloro, con ocho isótopos estables y once radioisótopos inestables de tipo artificial. Este metal es muy tóxico, tiene efectos similares a los ocasionados por el mercurio» [7].

“Es utilizado en plásticos, pilas, pinturas, abonos, batería, soldadura, farmacéutica, vidrio, fotografía, pigmentos, asbestos, abono, estabilizadores de plástico, galvanización, porcelana, quema de combustible fósil, fabricación de baterías níquel-cadmio, entre otros” [7].

“La principal fuente de exposición son los alimentos y el agua, se estima que alrededor de 25000 toneladas de cadmio se vierten anualmente en los ríos” [16]. “La absorción de cadmio por el aparato respiratorio produce lesiones en el pulmón las cuales pueden ser mortales, otros efectos son enfermedades renales, aumento de la presión sanguínea, enfermedades en el hígado, lesiones en el cerebro y en los nervios, diarrea, daños en el sistema inmune, desorden psicológico, desarrollo de cáncer, fractura en los huesos, entre otros” [...]. «A nivel ambiental, este elemento se encuentra en el agua y suelo, se adhiere fuertemente a las partículas de la tierra y se incorpora en la flora y fauna, las especies vegetarianas son las que más ingieren cadmio y presentan los mismos

síntomas y enfermedades que los humanos. Especialmente al ingerir hongos los cuales son los que acumulan en mayor proporción cadmio procedente del ambiente» [12].

«El cadmio que es liberado al ecosistema acuático se da principalmente por la descomposición de rocas y por actividad industrial como la producción de zinc, minerales de fosfato y bioindustrias de estiércol, al igual que los fertilizantes los cuales quedan retenidos en los suelos y en el agua. Así mismo estos se encuentran en la atmósfera provenientes de fuegos artificiales y volcanes, quema de combustibles fósiles y residuales. De igual manera se debe tener en cuenta que este metal es altamente tóxico en los suelos ya que es adsorbido por medio de las plantas especialmente si el suelo es ácido, esto ocasiona que los animales que se encuentran en el ecosistema al ingerir dichas plantas presenten un proceso de envenenamiento, causando daños potenciales en pequeñas concentraciones» [13].

1.3.4 Arsénico

«Elemento químico con número atómico 33, peso atómico de 74.922, con 17 nucleótidos radioactivos. Se encuentra naturalmente como mineral de cobalto y en rocas combinada con azufre y metales como Co, Fe, Ag, Mn, Sn, Ni. Se utiliza en productos agrícolas, tratamiento de madera, refinación de petróleo, anticorrosivos, cerámica, vidrio, bronceador de piel, pigmento, pintura, medicamentos, industria de minería y fundición, entre otros» [12].

“Es uno de los elementos más tóxicos, su principal fuente de exposición es el agua, aire y la comida, en los alimentos se encuentra de forma inorgánica y orgánica como arsenobetaina, arsenocolina, arsenoazúcares y lípidos” [17]. “La exposición al arsénico inorgánico puede causar cambio en la piel, irritación en los pulmones, disminución de glóbulos blancos y rojos, irritación estomacal e intestinal, cáncer en la piel, los pulmones y el hígado, infertilidad, disminución de defensas, daños en el corazón y el cerebro, entre otros” [12].

A nivel ambiental, se puede encontrar en la tierra, el aire y el agua, causando daños en la salud de los animales, alterando el material genético de los peces y los animales que se alimentan de estos, así mismo de las plantas.

«En los medios acuáticos, existe en forma de arseniuros y arseniatos. En los sedimentos y los suelos, los arseniatos son absorbidos de forma rápida y de hierro o de hidróxido de aluminio, reduciendo la capacidad y velocidad de percolación y la disponibilidad para los sistemas biológicos. En los microorganismos, las plantas y los animales, existe metilación y reducción de los compuestos del arsénico. Permitiendo la producción de compuestos del arsénico estables fisicoquímica y biológicamente» [...]. “Las plantas absorben Arsénico bastante fácil, es por esto que las concentraciones en altos rangos pueden estar presentes en la comida de los organismos de las aguas dulces consumidores

de estas, las aves comen estos peces con altas cantidades de Arsénico y mueren como resultado del envenenamiento por la descomposición de este en sus cuerpos” [13].

1.3.5 Cobre

“Elemento químico con número atómico 29, metal de transición no ferroso, es abundante y utilizado por sus propiedades físicas, químicas mecánicas y eléctricas. Cuenta con dos isótopos naturales estables y nueve inestables (radiactivos). La mayoría de cobre se obtiene de sulfitos minerales como los son calcocita (Cu_2S), covelita (CuS), calcopirita (CuFeS_2), bornita (CuFeS_3) y enargita (Cu_3AsS_4)” [...]. “Es utilizado en máquinas industriales, equipos eléctricos, monedas, joyería, aleaciones de bronce, latón níquel, pinturas, maquillaje, techos, tuberías, clavos, instrumentos musicales, medios de transporte, entre otros” [...]. “Se encuentra presente en el agua, aire y el suelo, a altas exposiciones pueden causar dolor de cabeza, mareo, vómito, diarrea, daño en el riñón, daño en el hígado, puede ser cancerígeno, causar necrosis hepática y la muerte, entre otros” [12].

“A nivel ambiental se encuentra presente en el aire por un largo periodo de tiempo, esto se da por la liberación durante la combustión de fuel posteriormente termina en los suelos mediante la lluvia, así como en el agua superficial el cual viaja por largos trayectos, pasando a las plantas y a los animales dañando la salud de estos” [...]. «Este metal es liberado al medio dado a los procesos naturales como el polvo, descomposición vegetal, incendios forestales, tormentas y aerosoles marinos. Por otro lado proviene de la intervención humana por actividades como minería, producción de metal, madera y fertilizantes fosfatados. El cobre es una fuente potencial de contaminación para la fauna y flora dado que la vegetación no puede crecer en suelos con presencia del metal y al no descomponerse en el ambiente se acumula en los animales dañando su salud y causando envenenamiento a bajas concentraciones» [13].

1.3.6 Cromo

“Elemento químico con número atómico 24, peso atómico 51.996, presenta color blanco plateado duro y quebradizo, no se encuentra en la naturaleza, está libre de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno, siendo muy dúctil con cuatro isótopos. Los estados de oxidación más importantes son II (cromosos) que es un estado básico, III (crómicos) que es anfótero y VI (Cromatos) es ácido” [...]. “Se utiliza para la elaboración de anticorrosivos, fabricación de

pigmentos, conservación de madera, fabricación de vidrios, esmaltes de color y recubrimientos para galvanizado. El cromo en estado de oxidación $+6$ es el que cuenta con mayor aplicación a nivel industrial debido a la capacidad para formar sales coloreadas e insolubles”[18].

«Las personas están expuestas por la alimentación, al respirarlo y por contacto con la piel, siendo el cromo (VI) el más peligroso para la salud ya que puede causar alergia, erupciones cutáneas, irritación en la nariz, sangrado, malestar estomacal, úlcera, problemas respiratorios, daño en los riñones e hígado, cáncer de pulmón, alteración genética, muerte. En animales puede causar enfermedades respiratorias, defectos de nacimiento, tumores, infertilidad» [12].

«El Cromo entra en el aire, agua y suelo en forma de Cromo (III) y Cromo (VI) a manera general se encuentra en los cultivos que pueden regular la adsorción, pero cuando la cantidad de Cromo en el suelo aumentan las concentraciones en los cultivos, las plantas usualmente absorben solo Cromo (III) que es esencial, pero cuando las concentraciones exceden el valor, se presentan efectos negativos [...]. No es conocido que el Cromo se acumule en los peces, pero altas concentraciones de Cromo, debido a la disponibilidad de metales en las aguas superficiales, pueden dañar las agallas de los peces que nadan cerca del punto de vertido. En animales el Cromo puede causar problemas respiratorios, una baja disponibilidad puede dar lugar a contraer las enfermedades, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores» [13].

1.4 Tratamiento químico para la remoción de metales pesados de aguas residuales

Estos tipos de tratamientos son los más utilizados para la remoción de metales pesados, sin embargo presentan bajas eficiencias, generan residuos tóxicos y presentan un alto costo para su implementación. Por este motivo los tratamientos biológicos resultan más atractivos para estos procesos, por la simplicidad del proceso, las altas eficiencia y la fácil adquisición de la materia prima.

Entre las técnicas más utilizadas se encuentran:

1.4.1 Filtración por Membrana

“En la filtración por medio de membranas se emplea el uso de una barrera selectiva que limita el paso de determinados compuestos al otro lado de ella” [18]. “Se ha utilizado en varios sectores de la industria química, en la quiebra de azeótropos de mezclas de solventes orgánicos y en el área médica, como en la hemodiálisis y en la dosificación controlada de remedios, pasando por la

biotecnología, industria alimenticia, farmacéutica y en el tratamiento de aguas industriales y municipales” [...]. “Este tipo de separación trata y recupera las sales metálicas y las membranas se llegan a clasificar de acuerdo al tamaño de los poros, para osmosis Reversa: < 0,002 μm ; Nanofiltración: < 0,002 μm ; Ultra filtración: 0,2 a 0,02 μm y Micro filtración: 4 a 0,2 μm ” [19].

Entre las ventajas cabe resaltar las altas eficiencias de separación, funcionamiento a temperatura ambiente, bajo consumo energético y la facilidad para combinarse con otras técnicas. Como desventajas se encuentran los altos costos en cuanto a la membrana, es una técnica que no elimina el contaminante si no que únicamente lo concentra y genera grandes corrientes de residuos a la cual se le debe realizar otro tratamiento [13].

- Electrodiálisis: “Aquí se emplea un filtro tipo prensa de compartimientos delgados entre electrodos generando una diferencia de potencial permitiendo el movimiento de los iones para el intercambio catiónico y aniónico” [20]. Esta técnica puede remover iones hasta de 0.0001 μm [21]. Esta técnica puede utilizar varias fuentes de energía lo cual sería una ventaja, sin embargo se requiere de gran cantidad de energía para que el proceso se lleve a cabo, además de que se debe operar bajo el límite de densidad de corriente [13].

Tabla 2.

Condiciones de la electrodiálisis en diferentes estudios como técnica para la eliminación de metales pesados.

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Cu ⁺²	7	0.12 g/L; 0.11 g/L; 0.09 g/L	2h	25	Electrodiálisis de intercambio iónico híbrido, con un DVB entrecruzado grado variable de 2,4 y 8%.	41, 33 y 31
Co ⁺²	6	0.06 - 3.0 g/L	3h	25	Membrana líquida Hybrid de 20 – 30 µm- Electrodiálisis – Proceso de electrólisis.	>75
Cu ⁺² Fe ⁺²	NA	9.0 g/L; 0.5 g/L	4 y 24h	25	Electrodiálisis para la separación de metales compartimiento de 5 celdas de 14 mm de espesor.	96.6 y 99.5
Mo	3-8	0.3 g/L	1-39min	25	Separación de especies de Mo por electrodiálisis.	45.2 – 66.6

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante electrodiálisis. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

- Osmosis Inversa: “Proceso en donde un disolvente fluye a través de una membrana, dejando una parte de la disolución concentrada y la otra diluida, el disolvente va hacia la disolución más diluida logrando separar el soluto por presión mayor que la osmótica” [19]. La capacidad de selección es este proceso es de 0.0001mm [21]. Entre las ventajas más notorias de esta técnica están su simple operación, altas eficiencias y el uso de diferentes fuentes energéticas, más sin embargo esta requiere gran cantidad de energía, el costo de la membrana es alto y solo se puede utilizar en efluentes con agua de alta dureza [22].

Tabla 3.

Condiciones de la técnica de osmosis inversa en diferentes estudios.

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
B	9	7000 - 15000 mg/L	NA	25	Ósmosis inversa en aplicación de desalación de agua de mar. Membrana de 20 µm.	25
Fe ⁺²	5.5-8.5	20 mg/L	4h	12 – 29	Ósmosis inversa (membrana AG2521TF 10 µm) y la oxidación del concentrado por energía solar foto-fenton.	30 - 40
Ni, Co	7	240 mg/L	NA	25	Proceso de separación por membrana Dow Chemical.	99.6

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante osmosis inversa. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

- Nanofiltración: “Técnica resiente que emplea membranas con poros <1 nm de 10 a 15 bar, capaz de retener especies neutras con peso molecular <200 a 300 g/mol, y también para rechazar iones inorgánicos por exclusión de tamaño, suele presentar mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes” [20]. Entre sus principales ventajas se destacan la reducción de metales pesados, nitratos, sulfatos, taninos y la turbidez y dentro su operación no requiere el uso de sustancias químicas. Sin embargo requiere de gran cantidad de energía, algunas veces de tratamientos previos y su costo de implementación es alto [13].

Tabla 4.*Técnica de Nanofiltración en diferentes estudios.*

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Pb ⁺² Cd ⁺²	5.8	150 mg/L; 40 mg/L	10h	25	Nanofiltración, recubrimiento de poliamida aromática en sustrato de polisulfona con poros 0.262 nm.	98.5- 96
Fe ⁺² Al ⁺² Mg ⁺²	6-7	4920 mg/L; 3050 mg/L; 3400 mg/L	36h	25	Purificación de ácido fosfórico por Nanofiltración. Membrana DS5 DL 0.5nm.	98 - 96
Cd ⁺² Zn ⁺²	2-11	80 mg/L	4 y 24h	20 – 22	Tartrato de sodio y potasio (PST) en un proceso de Nanofiltración con membrana Ge Osmosnic en poliamida aromática.	95.5- 98
Mg ⁺² Li ⁺	6-7	2000, 8000 mg/L	NA	20	Recuperación de Li en alta relación de salmuera con membrana NF 90.	80.1 – 85

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante Nanofiltración. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

- Ultrafiltración: “Método de filtración en flujo transversal que posee similitud con la osmosis inversa pero a presiones más bajas, elimina partículas de tamaños entre 0.002 a 0.1 micras (µm) y rechaza sustancias orgánicas de peso molecular mayor que 1,000” [23]. En esta técnica se resalta su fácil uso, cortos tiempos de operación y los bajos costos operacionales, pero sus principales desventajas radican en el uso de altas presiones y el requerimiento de agentes químicos para su limpieza [22].

Tabla 5.*Ultrafiltración en diferentes estudios para remover metales pesados.*

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Cd ⁺² Fe ⁺² Cu ⁺² Zn ⁺² Ni ⁺²	6.5	20 mM	2.5h	Amb	Nanofiltración micelar mejorada con nonaoxietileno oleiléter RO90 en contraste con dodecilsulfato de sodio (SDS).	>95
Cd ⁺² Cu ⁺²	3.5 - 4.5	0.4-0.7mg/L; 0.4-0.6mg/L	NA	25	Separación de Cd y Cu de aguas ricas en fosforo por ultrafiltración micelar mejorada, membrana Amicon 8400 stirred cell, Milipore.	84.3 y 75
Cd ⁺²	2-3	50 mg/L	NA	5 - 45	Evaluación micelar mejorada ultrafiltración con agentes tensoactivos mixtos.	98

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante Ultrafiltración. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.2 Intercambio Iónico

«Es un proceso físico donde los iones de la solución son transferidos en un matriz sólido conocido como resina de intercambio en donde se captan cationes o aniones, con el fin de separar sales del agua. Este tratamiento reduce la concentración de los metales pesados y se utiliza cuando esta no es tan alta dado que el costo de su implementación es demasiado elevado. Las principales ventajas de intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas» [21]. Entre las ventajas de esta técnica se encuentran la eliminación de iones, costos energéticos bajos, larga duración y rendimientos del 98%. Como desventajas esta requiere de agentes químicos para su limpieza y grandes desperdicios de agua para su regeneración [22].

Tabla 6.

Condiciones experimentales de intercambio iónico a través de resinas.

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Fe ⁺² Cu ⁺² Zn ⁺² Cd ⁺² Pb ⁺²	4.5	24 – 58 mg/L	4h	25	Resina THQSA sintetizada por reacción de epoxi propil éter de tamarindo con ácido 8-hidroxiquinolina-5-sulfónico.	60 - 90
Cd ⁺²	3	30 mg/L	24h	26	Adsorción y desorción de Cd (II) con resina D001.	185.8 mg/g
Cr ⁺³ Ni ⁺² Cu ⁺² Cd ⁺² Co ⁺²	5-6	0.5- 20 mM	24h	26	Resina sintetizada en la reacción de poli metil vinil éter <i>alt</i> anhídrido maleico (MVE-alt-MA), polímero con una base de Schiff.	29.95-157.25 mg/g

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante el intercambio iónico a través de resinas. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.3 Adsorción (Convencional)

“Esta técnica presenta una amplia variedad para la remoción de contaminantes, es dependiente del tipo de adsorbente y de este también depende su rendimiento, por su estructura física” [20]. Es una técnica bastante robusta y eficiente con los contaminantes prioritarios como la materia orgánica, fármacos y endocrinos [20].

- **Carbón Activado:** «Proceso donde un sólido (el carbón activado) se utiliza para remover una sustancia soluble del agua. El carbón activo posee una superficie interna muy grande (entre 500 a 1500 m²/g) lo que conlleva a una ideal adsorción, viene en dos variaciones: Carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado granular (GAC). La versión de GAC se utiliza sobre todo en el tratamiento de aguas por su facilidad de fijar sustancias» [21]. En cuanto a esta técnica no se requiere de gran espacio, se puede incorporar a cualquier instalación de tratamiento de agua residual y son menos exigentes que otros tratamientos [13].

Tabla 7.*Condiciones experimentales de algunos carbones.*

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Pb ⁺² Zn ⁺² Cu ⁺² Cd ⁺²	5	10-180 mg/L	24h	20	Carbón mesoporoso ordenado CMK-3.	29 mg/g de Zn ⁺² a 177 mg/g de Pb ⁺²
Cr	7.8	0.12 mg/L	2min	Amb	Fe-BC (hierro a base de carbón de bambú).	>0.05 mg/L
Pb ⁺²	4	100 mg/L	6h	Amb	Carbón activado procedente de huesos de vaca.	50%
Cu ⁺² Ni ⁺² Zn ⁺²	5.5	10-100 mg/L	5min-20h	20-40	Carbón activado producido a partir de piedras tunecinas.	18.65 mg/g de Cu, 16.12 mg/g de Ni y 12.19 mg/g Zn

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante algunos carbones. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

- Nanotubos de carbono: “Han despertado una amplia atención como un nuevo tipo de adsorbentes debido a su capacidad excepcional para la eliminación de diversos contaminantes inorgánicos, orgánicos y radionucleidos a partir de grandes volúmenes de aguas residuales” [21]. Entre sus ventajas se destacan las altas eficiencias atómicas y la baja generación de residuos. Como desventajas requiere precursores volátiles y tóxicos como el ferroceno y requiere altas temperaturas [13].

Tabla 8.*Condiciones experimentales de nanotubo de carbón con otros complementos.*

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Co ⁺² Ca ⁺² Mg ⁺² Zn ⁺² Fe ⁺³	6	0.8 mg/L; 40 mg/L; 23 mg/L; 0.2 mg/L y 0.33 mg/L	10min	Amb	Diatomita tierra compuesto por el método de deposición de vapor químico.	91.3
Zn ⁺²	10	1.1 mg/L	120min	Amb	NCT (nanotubos de carbón funcionalizado) y BM (Biocarbón magnético)	99 NCT y 75 BM
Zn Cu Ni	5	60 mg/L; 50 mg/L y 40 mg/L	NA	Amb	Nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) impregnado con di-(2-etil hexilo ácido fosfórico) (D2EHPA) y óxido de fosfina de tri-n-octilo (TOPO).	4.9 mg/g de Cu, 4.78 mg/g de Ni y 4.8 mg/g de Zn

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante nanotubos de carbón. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.4 Precipitación química

«Este proceso es utilizado para la obtención del sólido ya sea por un proceso de evaporación de un disolvente, enfriamiento del disolvente o reacciones químicas. Este tipo de técnicas es muy utilizado dada su sencillez, sin embargo el mantenimiento es demasiado costoso por la generación de lodos. Se han empleado precipitación por sulfuros con solubilidad baja y precipitados no anfóteros por lo que puede lograr altos rendimientos y sustancias quelantes pero estas no tienen eficiencias muy altas y producen un riesgo al medio ambiente» [21].

Tabla 9.

Remociones de metales pesados empleando técnicas de precipitación química.

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Ni Zn Al	12	22 mg/L	1h	Amb	Precipitación por galvanoplastia Ni servoasistida por LDH.	80 - 90
Hg ⁺²	4.7- 6.4	65.6 µg/L	1h	Amb	Precipitación con 1.3-benzenediamidoethanet hiolate.	>99.9
As ⁺² Cu ⁺² Cd ⁺² Pb ⁺²	1	6.080 mg/L; 70 mg/L; 95 mg/L y 45 mg/L	1h	Amb	Reactor con distribuidor multiarranque sumergido para la alimentación de sulfuro.	>99.9
Cd Cr Cu Pb Zn As Hg	4	1 mg/L	5min	Amb	Nanocompuestos como micropartículas superparamagnéticas que actúan como semillas para precipitados de hidróxido de hierro.	95 - 99

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante precipitación química. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.5 Electrocoagulación

“Se utiliza la electricidad para eliminar contaminantes suspendidos, disueltos o emulsificados. Consiste en inducir una corriente eléctrica mediante placas metálicas de diversos materiales. Esta corriente eléctrica proporciona fuerza electromotriz que induce las reacciones químicas que desestabilizan los contaminantes que se encuentran presentes. De esta manera los contaminantes forman agregados hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente” [24].

Tabla 10.*Condiciones experimentales para remover metales pesados mediante electrocoagulación.*

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Cu ⁺²	4-8	12 ppm	30 min	Amb	Después de la electroquímica, los líquidos dosificados se llevaron a floculación y sedimentación.	95
Ni ⁺² Pb ⁺² Cd ⁺²	1-7	1 ppm	0-10 min	Amb	Potasio clorhídrico fue adicionado para incrementar la conductividad de la solución.	99 98.3 96.8
Cu ⁺² Cr ⁺³ Ni ⁺² Zn ⁺²	9.5	93 ppm; 33 ppm; 57 ppm y 20 ppm	45min	26	Un electro-reactor con electrodos de acero de carbono de configuraciones monopolares.	>97

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante electrocoagulación. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.6 Coagulación-Floculación

«Con este método se busca la desestabilización del coloide y su posterior aglomeración. Inicialmente el coagulante se encarga de eliminar la capa eléctrica que caracteriza al coloide y mediante una floculación se aglomera los coloides por la atracción de las partículas. Se debe tener en cuenta la dosis química, el efecto energético de la mezcla y el tiempo de mezcla. Los coagulantes químicos que se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales incluyen alumbre (Al₂(SO₄)₃·18H₂O), cloruro férrico (FeCl₃·6H₂O), sulfato férrico (Fe₂(SO₄)₃), sulfato ferroso (FeSO₄·7H₂O) y cal (Ca(OH)₂. Con respecto a los floculantes se encuentran los catiónicos para partículas de origen orgánico, aniónicos utilizados para partículas minerales y el no iónico que se utilizan en partículas orgánicas e inorgánicas» [21]. Unas de sus principales ventajas es la variedad de coagulantes y floculantes naturales y artificiales que se pueden encontrar y la remoción de especies químicas disueltas, y como desventaja esta técnica afecta el pH del agua tratada [22].

Tabla 11*Remoción de metales pesados mediante Coagulación-Floculación.*

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Fe	7	15.2 mg/L	30 min	Amb	Se utilizaron 3 coagulantes (alumbre, cloruro férrico y cloruro de polialuminio) y poliacrilamida aniónico como floculante.	98
Zn		5.8 mg/L				83
Ni		6.7 mg/L				63
Mg	8-9	308.7 mg/L	2-15 min	28	Se utiliza como coagulante Ca(OH) ₂ .	91.3
Fe		145.6 mg/L				100

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante coagulación-Floculación. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.7 Electrofloculación

“Proceso de formación de hidróxidos de hierro o aluminio, que actúan como gel con gran área superficial, con la función de atrapar a las especies contaminantes previamente desestabilizadas, separándolas de la fase acuosa. Las especies solubles como iones metálicos también se separan mediante la adsorción o por la formación de complejos durante la disolución anódica del hierro” [25].

Tabla 12.*Remoción de metales pesados mediante Electrofloculación.*

Especie	Condiciones					% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)	Método y complemento	
Pb	NA	Salinidad de 0.4 a 1.2%	NA	Amb	Electrofloculación.	94.4
Ni						92.8
Cd						64.4
Co						35.5
Cd	11	1 %	30 min	Amb	Electrofloculación 2v.	100
Zn						99
Pb						95.5
Cu						98.6
Cd	7.3	0.02%	5 min	50	Electrofloculación monopolar.	100

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante Electrofloculación. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.8 Flotación

«Este método es utilizado para la separación de minerales a partir de sus propiedades superficiales, según su comportamiento hidrofóbico e hidrofílico. Existen diferentes tipos como son: la flotación no selectiva de aceite, flotación de película, flotación de espuma y flotación de iones, siendo estas dos últimas las más utilizadas [...]. 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 [...]. La flotación de espuma es una técnica de separación en la cual se adhiere la partícula hidrofóbica a una burbuja gaseosa de aire, la cual asciende a la superficie formando la espuma para su posterior remoción» [21]. Entre sus ventajas esta se puede utilizar como sedimentación primaria disminuyendo los sólidos suspendidos, y como desventajas, esta requiere gran cantidad de aire comprimido y grandes espacios de instalación [22].

Tabla 13.*Remoción de metales pesados mediante la técnica de flotación.*

Especie	Condiciones				% eficiencia de remoción
	pH	C ₀	t _{Tr}	T (°C)	
Cu ⁺²	NA	1763 mg/kg	2h	Amb	Flotación en sedimentos degradados. 60.1-70.4
Fe		8.542 mg/L			Ensayos de flotación por 37.4
Cu		0.063 mg/L			aire disuelto (FAD) con 43.2
Ni	1-3;	0.349 mg/L			300 mg/L de cloruro 25.7
Mn	10-	0.142 mg/L	2h	Amb	férrico como coagulante y 24.3
Cd	12	0.00138mg/L			3 valores de pH ácidos y 3 84.6
Pb		0.025 mg/L			alcalinos. 90.1
Zn		0.599 mg/L			52.1

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante flotación. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.4.9 Fotocatálisis

«Se basa en 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, degradando moléculas orgánicas colorantes y metales pesados. La fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio no es selectivo, razón por la cual puede tratar mezclas con contaminantes complejos. Sin embargo esta técnica es costosa y puede presentar un sobrecalentamiento en el agua» [21]. Entre algunas de sus ventajas se destacan su escasa o nula selectividad hacia los contaminantes y la descomposición de reactivos usados como oxidantes en productos inocuos. Entre sus desventajas se encuentran la opacidad que presenta al paso de la luz lo cual limita el diámetro de los tubos empleados y su alto costo de implementación [26].

Tabla 14.

Fotocatálisis como método para la eliminación de metales pesados.

Especie	Condiciones				Método y complemento	% eficiencia de remoción
	Ph	C ₀	t _{Tr}	T (°C)		
Cr ⁺⁶ Cr ⁺³ Cr (T)	5	10 mg/L	90min	20-75	Sinergia de la fotocatalisis y de adsorción para la eliminación simultanea de Cr ⁺⁶ y Cr ⁺³ con el TiO ₂ y nanotubos de titanio.	98.38 99.71 98.09
Ag ⁺¹ Pb ⁺² Hg ⁺² Cu ⁺² Cr ⁺⁶ Fe ⁺³ Fe ⁺²	10 excepto el Cr, que es 3	2 mg/L	20min	30	Eliminación de iones metálicos tóxicos de las aguas residuales por fotocatalisis de semiconductores.	14.1 10.5 13.3 7.1 28.3 95.2 6.4
Cr ⁺⁶	2	150 mg/L	25min	25	Fotocatálisis en el nuevo sistema hetero- <i>p</i> -CuCO ₂ O ₄ / <i>n</i> -TiO ₂ en presencia de ácido tartárico.	76 - 91

Nota: Esta tabla muestra las condiciones de remoción y su % de eficiencia de diferentes metales pesados mediante fotocatalisis. Tomado de Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión.

1.5 Biomasa microbiana para la remoción de metales pesados

1.5.1 *Aspergillus*

«El género *Aspergillus* es una estructura unicelular que pertenece al reino fungí, de la clase *Eurotiomycetes* del orden *Eurotiales*, en la familia de los *Trichocomaceae*, es un género mitospórico que se caracteriza por la producción de hifas especializadas, denominadas conidiógenas que originan las esporas asexuales o conidios. La clasificación del género *Aspergillus* en subgéneros y secciones está basada fundamentalmente en cuatro características: presencia de teleomorfo, presencia o ausencia de mótulas, disposición de mótulas o fiálides sobre la vesícula y coloración de las colonias» [27].

1.5.1.1. Aspergillus niger. «Es un hongo micelial ambiental, formado por hifas hialinas tabicadas, es ubicuo de distribución mundial de vida saprofita (su ciclo de vida es en la naturaleza), sus colonias crecen rápido y se reconocen por su aspecto polvoriento, su micelio es blanco que luego se torna oscuro hasta

otorgar diversos colores. A nivel microscópico posee un conidióforo liso ligeramente granular que mide 1.5 a 3 mm de largo, con una pared gruesa. Suelen tener vesículas hialinas o pardas que miden 75 μm de diámetro. Sus beneficios son a nivel de saneamiento ambiental, degradando desechos industriales, que luego son utilizados para elaborar productos de provecho» [28].

1.6 Biomasa residual para la remoción de metales pesados

1.6.1 Residuos de la industria cafetera

Durante el proceso de obtención del café se generan gran cantidad de residuos, entre ellos están los tallos, las hojas, los granos no aptos para la producción, compuestos de la semilla (mucilago, pulpa, pergamino y película plateada) y la borra. De estos residuos se destaca la pulpa de café que representa de un 29% al 45% del peso del fruto y la borra que es lo resultante de la preparación de la bebida después de tostar el café, este representa un 10% del peso del fruto [29].

Entre los posibles residuos que tienen un potencial de remoción de los metales pesados se encuentran:

- Pulpa de café: es el mesocarpio externo del café, se obtiene principalmente por beneficio húmedo y está compuesta en su mayoría por pectinas ligninas y celulosa, las cuales presentan grupos funcionales como los OH, COOH y OCH₃, que poseen gran afinidad hacia los iones metálicos favoreciendo el intercambio catiónico [29].
- Borra del café: es el subproducto de la preparación del café, esta se obtiene después de la filtración. Al ser un desecho agrícola este cuenta con materiales lignocelulósicos, como la celulosa, hemicelulosa y lignina, donde esta última posee grupos funcionales como alifáticos, fenólicos, metoxil y carboxil los cuales enlazan a los metales mediante la donación de un par de electrones de oxígeno [30].
- Cascarilla del café: es la piel que cubre el hemisferio normalmente es conocida como el pergamino, está compuesta por grupos funcionales como los carboxilos, anhídrido carboxílico, lactona, hidroxilos y carbonilos, los cuales permiten el intercambio con los iones positivos del metal [31].

1.7 Tratamiento biológico para la remoción de metales pesados de aguas residuales

“El tratamiento biológico aprovecha el metabolismo y tasa de crecimiento de microorganismos en procesos naturales, colocándolos en situaciones controladas para optimizar los resultados deseados. Los sistemas de tratamiento dependen generalmente de comunidades complejas de microorganismos” [32].

«Dentro de los tratamientos para la remediación de las aguas residuales se encuentra los tipos de biorremediación de metales para disminuir la carga de iones. La biorremediación es la tecnología que tiene como objetivo acelerar la biodegradación natural que es la capacidad metabólica de los organismos para transformar o mineralizar contaminantes orgánicos en compuestos menos peligrosos y en menor cantidad. De tal manera que puedan integrarse fácilmente a los ciclos biogeoquímicos naturales de los compuestos orgánicos que han sido vertidos intencional o inadvertidamente al ambiente, mediante la optimización de las condiciones limitantes de tal proceso» [33].

Entre los tipos de biorremediación que utilizan microorganismos se tienen:

1.7.1 Bioaumentación

“Es la adición de microorganismos nativos, externos o genéticamente modificados al medio debido a la baja densidad de los microorganismos nativos o a la falta de capacidad metabólica para la degradación. La bioaumentación en un suelo contaminado se puede determinar caracterizando las poblaciones de microorganismos y evaluando cuáles de ellos son aptos para colonizar y degradar los contaminantes” [34]. «Esta técnica funciona en condiciones de laboratorio o biorreactor, pero en ambientes externos (suelo o agua) su implantación depende de una serie de factores. Presencia de toxinas, nutrientes y condiciones ambientales, movilidad y/o distribución de los microorganismos y la presencia de abundante materia orgánica. Los microorganismos añadidos deben sobrevivir a los depredadores y competir con éxito con la población autóctona antes de ocupar los nichos potenciales. En general, los ambientes más selectivos y la utilización de consorcios microbianos favorecen la bioaumentación. Entre sus ventajas se encuentra que no requiere área adicional para llevar a cabo el tratamiento, ni el uso de maquinaria pesada, pero el tamaño de la población de microorganismos degradadores crece rápidamente como respuesta a la contaminación del medio y es muy difícil, si no imposible, incrementar la población microbiana más allá de esos valores» [35].

1.7.2 Bioestimulación

“Es una técnica en la cual se adicionan macro y micro nutrientes al suelo para estimular el crecimiento microbiano y así aumentar la población de microorganismos” [36]. “En este proceso se estimula la actividad natural de los microorganismos en el suelo por medio de la circulación de soluciones con nutrientes y oxígeno u otro aceptor de electrones” [34].

1.8 Mecanismos de biorremoción de iones metálicos

«Cuando se lleva a cabo un proceso de biorremediación, a manera general se encuentran dividido en tres: procesos químicos, celulares y físicos.

1.8.1 Procesos químicos

Proceso capaz de convertir radionucleidos como el uranio (U), el tecnecio (Tc), y el cromo (Cr) de su forma oxidada (soluble y móvil) a su forma reducida (insoluble e inmóvil y por lo tanto precipitable) llevado a cabo por organismos se denomina biotransformación» [37]. «El objetivo, es modificar los compuestos xenobióticos o tóxicos a través de procesos bioquímicos que los transformen en sustancias más ionizadas, hidrosolubles y fácilmente eliminables, a través de una serie de enzimas no integradas en las vías del metabolismo energético o intermediario del organismo. En términos generales, las reacciones de biotransformación generan metabolitos inactivos, más polares e hidrosolubles para su eliminación» [38].

Tipos de biotransformación:

- Directa: “La acción directa incluye el metabolismo de la bacteria que, con la ayuda de electrones procedentes de componentes orgánicos no peligrosos como acetato o lactato, es capaz de reducir metales y radionucleidos que posteriormente precipitarán disminuyendo su biodisponibilidad” [37].
- Indirecta: “En este caso, el microorganismo no intervendrá directamente y será a través de una serie de reducciones y oxidaciones por medio del hierro, manganeso y sulfato como podrá transformar el uranio, tecnecio y cromo en compuestos menos biodisponibles” [37].

1.8.2 Procesos celulares

“procesos dentro de los cuales el microorganismo (a través del tejido graso en animales, vacuolas y paredes celulares en hongos y plantas), acumulan compuestos como derivados del

petróleo o metales pesados, como cadmio, plomo y mercurio, sin efectos notorios en su organismo, a menos que sobrepasen los límites tolerables” [38].

- **Biosorción:** Es la remoción de metales pesados contenidos en soluciones acuosas mediante la unión a biomasa [39]. «La cual consiste en el secuestro de iones metálicos cargados positivamente por la pared celular o por el glucocálix, conjunto de exopolisacáridos y proteínas que se acumulan en el exterior de la pared. Este proceso se basa en la afinidad entre el sorbente y la sustancia contaminante mediante la interacción bioquímica entre los metales y los grupos funcionales presentes en las paredes celulares» [40].
- **Bioacumulación:** “técnica basada en la absorción (sorción al interior) de las especies metálicas mediante los mecanismos de acumulación al interior de las células de biomasas vivas; varios estudios incluyen el uso de bacterias Gram⁺, Gram⁻, algas marinas, entre otros” [41]. “La bioacumulación se entiende como el incremento en la concentración de un producto químico en un organismo biológico a través del tiempo, comparado con las concentraciones químicas en el ambiente. Los compuestos se acumulan en los seres vivos y son almacenados más rápidamente de lo que pueden metabolizar” [42].

1.8.3 Procesos físicos

Existe en la biorremoción un proceso físico la quelación.

- **Quelación:** «Un agente quelante es un compuesto orgánico que forma complejos a través de dos o más enlaces de coordinación con un ion metálico central. El producto es un anillo heterocíclico con el átomo de metal central como parte del anillo. La quelación más habitual es a través de sideróforos. Los sideróforos son moléculas peptídicas de bajo peso molecular quelantes del hierro secretadas por microorganismos. Su función es captar hierro y transportarlo al interior de la célula en un proceso dependiente de energía» [37]. «La quelación implica inmovilizar un ion metálico con ligandos de bajo peso molecular para crear un complejo o una molécula químicamente estable. Algunos de los sideróforos o quelantes, son el catecol y el ácido oxálico. El catecol moviliza hacia el interior de la célula fúngica el hierro y el ácido oxálico es capaz de inmovilizar iones metálicos para formar sales de oxalato en forma de cristales disminuyendo la solubilidad por ende la disponibilidad de estos en el medio» [43].

1.9 Factores que determinan la eficacia de la adsorción

«El potencial biorremediador de los organismos vivos reposa básicamente en su dotación genética. Se ha encontrado que ellos se adaptan a las condiciones del entorno, produciendo enzimas específicas en función de los sustratos presentes y además producen cambios genéticos, que les proporciona una capacidad metabólica nueva para degradar sustancias nocivas para el medio ambiente.

Para que un proceso de biorremediación sea efectivo, debe tenerse en cuenta que gran parte de los microorganismos aislados deben pasar por un proceso de adaptación. Comúnmente se prueban los límites de tolerancia y la capacidad de biodegradación en condiciones específicas de laboratorio para luego ser usados en condiciones de campo, lo que causa una disminución o eliminación de su potencial metabólico» [38].

Entre los factores del medio se encuentran:

- pH: este factor es importante en las soluciones ya sea por la adsorción de cationes o aniones, en donde los cationes se favorecen en pH de 4.5 y los aniones de 1.5 a 4. La adsorción depende de la naturaleza del adsorbente y la distribución del ion metálico en la solución [44].
- Presencia de otros iones: cuando se encuentran varios iones disueltos en la solución se puede presentar la competencia con el metal de interés por un sitio en el adsorbente [44].
- Temperatura: esta variable es fundamental dado que se pueden presentar cambios en la textura del sorbente y al presentarse un aumento en la variable, puede causar deterioro y la pérdida de la capacidad de sorción [44].
- Tamaño de la partícula: la zona en donde se realiza la adsorción es en el interior de la partícula sobre las paredes, la adsorción depende del volumen y así mismo del área superficial. El tamaño es importante debido a que las partículas pequeñas cuentan con mayor área superficial dado a la cantidad de poros por unidad de masa [44].

1.10 Legislación

Entre las normas legales para establecer los parámetros y valores máximos permitidos en el vertimiento puntual a cuerpos de agua superficial y a sistemas de alcantarillado, encontramos la resolución 0631 del 17 marzo de 2015. Así mismo existen normas internacionales y nacionales para la concentración permitida de metales las cuales se encuentran el decreto 1594 de 1989, la resolución 1074 de 1997 y el Acuerdo CAR 43 del 17 de octubre de 2006.

1.10.1 Resolución 0631 del 17 Marzo de 2015

Se relacionan actividades industriales, comerciales o de servicio para el vertimiento puntual en aguas marinas y suelos. En la presente resolución se establecen parámetros fisicoquímicos y valores permisibles puntuales tanto de agua residual doméstica como de agua residual industrial, comercial o servicio tanto al alcantarillado como a cuerpos de agua superficiales. Entre los parámetros controlables se destaca el pH, DQO, DBO, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentados, hidrocarburos, compuestos de fósforo, compuestos de nitrógeno, iones, metales, metaloides y otros parámetros físicos. Se tiene en cuenta sectores como la ganadería, la minería, actividad de Hidrocarburos, productos alimenticios y bebidas, fabricación y manufactura de bienes, entre otros. Estos parámetros se toman en cuenta en el balance de materia o masa de la caracterización de las sustancias [45].

1.10.2 Decreto 1594 de 1989

Artículo 38: Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional [46]:

Tabla 15.

Valores máximos permitidos en el agua para recurso humano.

SUSTANCIA	SÍMBOLO	VALOR(mg/L)
Arsénico	As	0.05
Cadmio	Cd	0.01
Zinc	Zn	15
Cobre	Cu	1.0
Mercurio	Hg	0.05
Nitratos y Nitritos	N	0.002
Plata	Ag	10
Plomo	Pb	0.05
Selenio	Se	0.01
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	0.002

Nota: Esta tabla muestra los principales metales pesados y su valor máximo permitido en el agua para el consumo humano.

Tomado del Decreto 1594/84.

1.10.3 Resolución 1074 de 1997

Artículo 3°.- Modificado por la Resolución del DAMA 1596 de 2001. Todo vertimiento de residuos líquidos a la red de alcantarillado público y/o a un cuerpo de agua, deberá cumplir con los estándares establecido a continuación [47]:

Tabla 16.

Valores máximos permitidos en el agua para vertimiento en la red de alcantarillado.

SUSTANCIA	SÍMBOLO	VALOR(mg/L)
Arsénico	As	0.1
Cadmio	Cd	0.003
Zinc	Zn	5.0
Cobre	Cu	0.25
Mercurio	Hg	0.02
Níquel	Ni	0.02
Plata	Ag	0.5
Plomo	Pb	0.1
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	0.5

Nota: Esta tabla muestra los principales metales pesados y su valor máximo permitido para el vertimiento en las redes de alcantarillado. Tomado de la Resolución 1074 de 1997.

1.10.4 Acuerdo CAR 43 del 17 de octubre de 2006

“Por el cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020” para usos de aguas clase III, que corresponde a los valores asignados a la calidad de los embalses, lagunas, humedales y demás cuerpos lénticos de aguas ubicados dentro de la cuenca del río Bogotá se asigna valores máximos de 0,002 mg/l de mercurio (Hg), 0,05 mg/l de Cromo Cr⁺⁶, 0,05 mg/l de Plata (Ag) 0,05 mg/l de Plomo (Pb) [48].

2 ANTECEDENTES

El artículo científico Biosorción de plomo (II) en solución por diferentes biomásas fúngicas de la revista latinoamericana de recursos naturales, de los autores Cárdenas, Moctezuma, Acosta y Martínez en el 2013, se realizó el estudio de la bioadsorción del plomo por medio de 15 tipos de biomásas fúngicas, en donde se determinaba la eficiencia de cada una de ellas por medio del porcentaje de remoción, a unas condiciones de pH, Temperatura y tiempo de residencia óptimas para estas cepas en soluciones de plomo de 100 mg, determinando que estas biomásas remueven eficientemente el plomo. Este artículo proporciona información acerca de las especies más opcionadas para la remoción del plomo en general, concluyendo que aunque todas las especies evaluadas son eficientes, las especies de *Aspergillus* no son las mejores para este metal, puesto que la levadura *C. albicans* presenta 3 veces más capacidad de remoción que la cepa anterior, para la investigación podemos concluir que si el agua residual sintética tiene grandes trazas de este metal, la remoción será ineficiente, con respecto a otros metales [49].

Para el estudio de Aislamiento e identificación de *Aspergillus niger* y evaluación de su tolerancia a metales tóxicos realizado por Ana Gloria Villalba Villalba y Grecia Vianey Azuara Gómez en la Universidad Estatal de Sonora en el año 2018, se realizó un aislamiento de *Aspergillus niger* y se identificó su tolerancia a metales tóxicos como mercurio, cobre, plata, cadmio, plomo, zinc y cromo, en el cual se determinó que este hongo tiene potencial de biorremediación y es tolerante a los contaminante mencionados. El aislamiento del hongo se realizó a partir del suelo de una mina, se procedió a la esterilización y a la siembra en una placa de Petri con PDA, seguido de una preparación de suspensión de esporas para finalmente determinar la tolerancia del hongo con respecto a los metales y la determinación de la concentración mínima inhibitoria. En la presente investigación este artículo brinda una perspectiva clara para identificar los tipos de metales pesados que se pueden remover por *Aspergillus niger* y con base a las concentraciones empleadas identificar qué tipo de metal presenta gran tolerancia y de este modo poder obtener un grado de remoción mayor [50].

En la investigación realizada por Pablo Cubides Guerrero y José Herney Ramírez Franco titulada Adsorción de Cr VI sobre residuos de café en la Universidad Nacional de Colombia en el año 2014, se realizó un estudio de adsorción de este metal por tres tipos de adsorbentes

diferentes como lo son el carbón activado, carbón activado preparado con residuos de café y la borra de café, el cual se analizó por espectrofotometría y por absorción atómica la prueba de cromo total. Por medio de esto se determinó que con los residuos de café se logró una remoción del 95% de cromo VI. En la presente investigación este artículo brinda información importante para la remoción de metales pesados y contaminantes como lo es el cromo, así mismo se identifica como un residuo que es desechado en rellenos sanitarios, cuenta con la capacidad de una remoción significativa de metales pesados [51].

Los autores Candelaria Tejada, Ángel Villabuena y Luz Garcés en su artículo científico Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico publicado en enero del 2015, realizaron la adsorción de iones de metales pesados en aguas residuales por medio de biomazas inertes, vivas y muertas con la característica de que sus estructuras son capaces de permitir la unión de iones metálicos en sus sitios activos los cuales se ven influenciados por la temperatura, el pH y el tamaño de la partícula. Según esta investigación aportó que los principales metales presentes en los efluentes son el cadmio, zinc, cromo, níquel, mercurio y plomo, los cuales se pueden remover utilizando la adsorción por flora microbiana y biomasa residual que son alternativas económicas en comparación con las técnicas convencionales y se determina que el utilizar biomasa viva presenta una variedad más amplia de mecanismos para esta bioacumulación pero puede ser afectado seriamente por las altas concentraciones de estos iones, problema que no presenta la biomasa muerta por sus propiedades físicas, bajo costo y mantenimiento al no necesitar nutrientes y sin interrupciones por la inactivación por las altas concentraciones [44].

Para identificar el potencial que poseen los residuos del café pretratado en la remoción de metales pesados el autor Nancy Elizabeth Dávila Guzmán en su tesis Caracterización del proceso de biosorción de metales pesados mediante residuos sólidos de café realizada en la Universidad Autónoma de Nuevo León en el año 2012, se realizó un estudio de la potencia que tiene los residuos del café pretratados en la remoción de metales pesados presentes en una solución acuosa donde se presentó la biosorción de Cd(II), Cu(II) y Pb(II) en la cual está se incrementó al aumentar la velocidad de agitación así como el aumento de la concentración de los metales, presentando una desorción mayor al 90% de estos metales. En el caso de biosorción en columnas se obtienen eficiencias del 43% a volúmenes bajos y en el caso del lecho fijo al aumentar la

altura también aumenta la eficiencia siendo superior al 50%. En la presente investigación se identificó la capacidad de remoción del residuo de café en un 80% para tres metales pesados y las condiciones a las cuales se puede aumentar su eficiencia, del mismo modo se determina que al incrementar el pH también aumentará la capacidad de adsorción, de otra manera se infiere que del estado en el que se encuentre el café ya sea molido, triturado o sin ningún tratamiento dependerá el porcentaje de remoción [52].

Mediante el uso de 4 cepas fúngicas correspondientes a los géneros *Aspergillus*, *Pudocamarosporium*, *Penicillium* y *Alternaria* el autor Carlos Aymara en la tesis de Biorremediación de metales ecotóxicos mediante cepas fúngicas nativas aisladas de efluentes industriales en un sistema de biorreactores en serie de agitación continua realizada en el 2018, explora el uso de microorganismos en la biorremoción de ciertos metales, identificando el potencial del más alto en un sistema de biorreactores de agitación continua. La información muestra que el optar por esta técnica es una de las mejores opciones por ser un proceso rápido, con subproductos no tóxicos, de bajo costo y bastante simple, en el cual se destaca la capacidad y versatilidad de los hongos al crecer en condiciones diversas y extremas de pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes, y altas concentraciones de iones metálicos, seleccionando el *Aspergillus* al poseer la mayor concentración mínima inhibitoria por encima de los 500 ppm y con unos altos porcentajes de remoción de los metales como el plomo, el cromo, el boro y el hierro, convirtiéndolo en la mejor cepa para el proceso [9].

Para la Remoción de cromo VI por una cepa de *Aspergillus niger* resistente a cromato, investigación realizada por los autores Eduardo Rivera, Juan Cárdenas, Víctor Martínez e Ismael Rodríguez en el 2015, se analizó la remoción de cromo VI utilizando una cepa de *Aspergillus niger* por calorimetría de la Difenilcarbazida a diferentes concentraciones de biomasa con las cuales se evidencio una remoción total del metal, además de una reducción de cromo VI a Cromo III, eliminando la contaminación. En la presente investigación se determina las técnicas para llevar a cabo la remoción del cromo VI y como al aumentar el pH, aumentará la remoción, así mismo se identifica que al incrementar la concentración del ion, la remoción disminuye debido al incremento en el número de iones que compiten por los grupos funcionales disponibles en la biomasa. De igual manera se evidencia que según la fuente de carbono que se suministre se verá la eficiencia en la remoción [53].

Para identificar las condiciones óptimas para la remoción de Cr (VI), en el artículo Bioadsorción de Cromo (VI) en solución acuosa por *Aspergillus Níger* de la revista Internacional de Investigación e Innovación tecnológica realizado por los autores Acosta Rodríguez, Bravo Reyna, Martínez Juárez, Cárdenas González y Moctezuma Zárate en el 2015, se efectuó un análisis de que tan eficiente es la remoción del cromo (VI) por la cepa de *Aspergillus niger*, a diferentes concentraciones del ion metálico, pH y temperaturas de la biomasa, y de esta manera seleccionar las mejores condiciones en la que se obtiene los mayores porcentajes de remoción. La información expuesta en los resultados del experimento evidencian que la cepa presenta una capacidad amplia en la absorción del ion metálico con tan solo 30 min de incubación a temperaturas normales, además de un porcentaje de 60 a 70 % de remoción con 7 días de incubación con tan solo 5 g de la biomasa por 100 ml de agua contaminada, de esta manera concluimos que la cepa escogida tiene uno de las más altos porcentajes de remoción para este metal en específico, es una de las mejores alternativas para tratar las aguas residuales industriales [54].

3 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LA PULPA DE CAFÉ

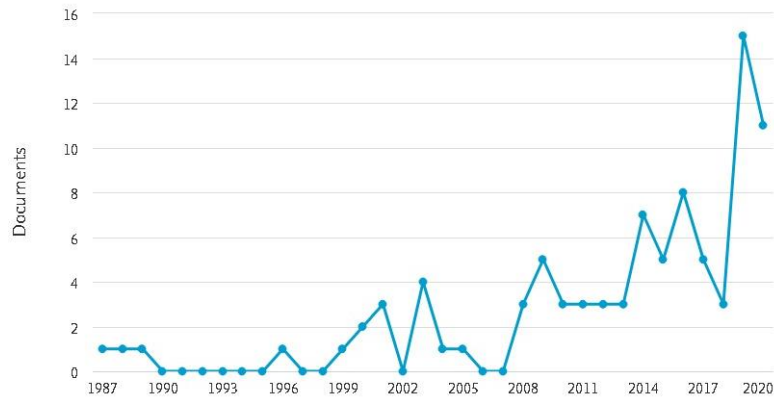
Desde la antigüedad el café ha sido uno de los productos con mayor comercialización y más rentable en América Latina, existen una gran variedad de especies, sin embargo solo dos de estas son las de mayor relevancia para el comercio, entre las cuales se identifican *canephora* y *arabica*, siendo esta última el objeto de estudio. En la producción del café se generan varios residuos entre ellos la pulpa, a la cual no se le ha dado un uso correcto, si no por el contrario es un subproducto que contribuye a la contaminación ambiental por su vertimiento en los ecosistemas acuáticos o su residencia sobre suelos. Colombia al ser un país cafetero cuenta con un gran volumen de producción generando gran cantidad de biomasa residual, a la cual se le puede dar un valor agregado, sirviendo como medio de sustrato para el crecimiento de microorganismos. En este capítulo se identificaran las principales características y la composición de la pulpa, como lo son: composición química, compuestos orgánicos, minerales, constituyentes de la pared celular, polisacáridos y aminoácidos. Esto con el fin de identificar las ventajas que representa este subproducto.

3.1 Caracterización bibliográfica

Se realizó una caracterización bibliográfica de la pulpa del café para ser utilizada como bioadsorbente en la eliminación de metales pesados de aguas residuales. Se realizó una revisión de un total de 90 artículos con ayuda de herramientas de bibliometría como lo fue Mendeley, Refworks, Nube de palabras, Legible, Sentigem, Grammarly y Scopus con el fin de identificar la información de mayor relevancia para el objeto de estudio. Por medio de un análisis estadístico se agruparon los documentos según el año, tipo y área de investigación. En la Figura 1 se presenta el número de documentos clasificados por año, en la Figura 2 se encuentran los tipos de documentos en donde los artículos ocupan mayor porcentaje y en la Figura 3 se clasifican los documentos por área siendo la agricultura y el medio ambiente los que presentan mayores investigaciones en lo relacionado con la pulpa de café.

Figura 1.

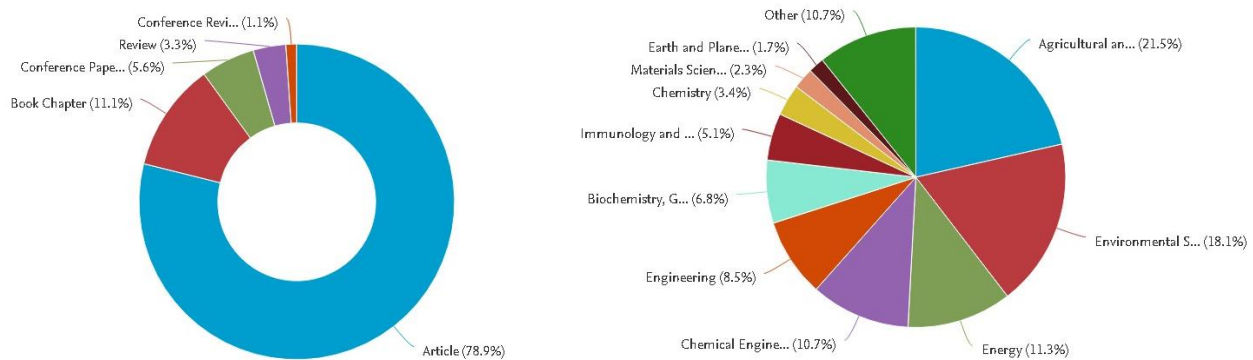
Documentos por año pulpa de café.



Nota: La figura representa el número de documentos que se ha publicado por año de los residuos de café (pulpa de café). Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Figura 2 y 3.

Documentos por tipo y área de investigación de la pulpa de café.

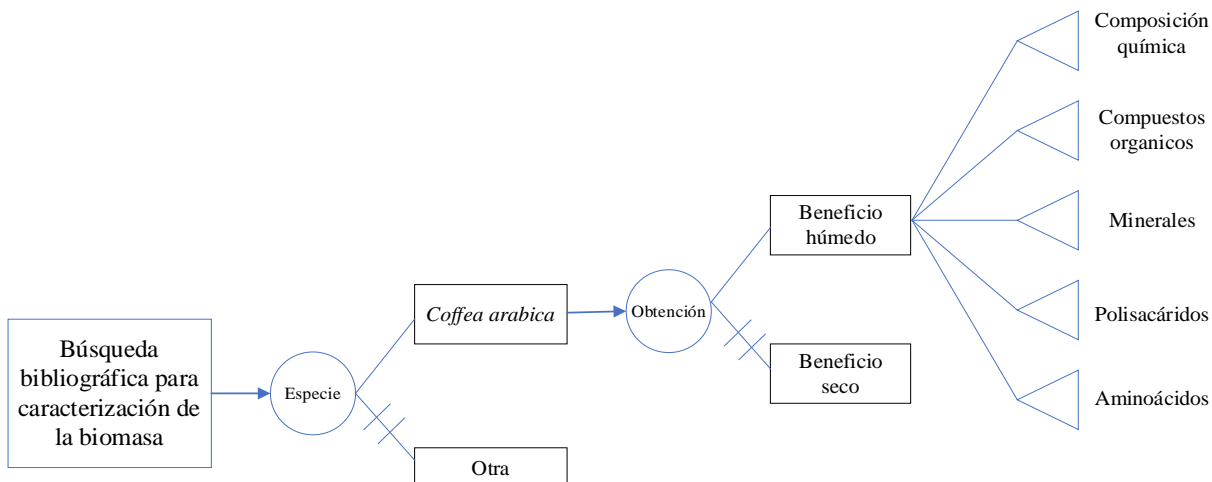


Nota: Las figuras 2 y 3 representan el total de documentos que se ha publicado por tipo y área de investigación de los residuos de café (pulpa de café). Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

A partir de estos documentos con ayuda de la bibliometría se realizó un segundo filtro dejando como resultado 20 artículos. En la Figura 4 se presentan los aspectos tenidos en cuenta para la selección de los artículos que cumplen con las características necesarias para realizar el análisis.

Figura 4.

Árbol de decisión búsqueda bibliográfica.

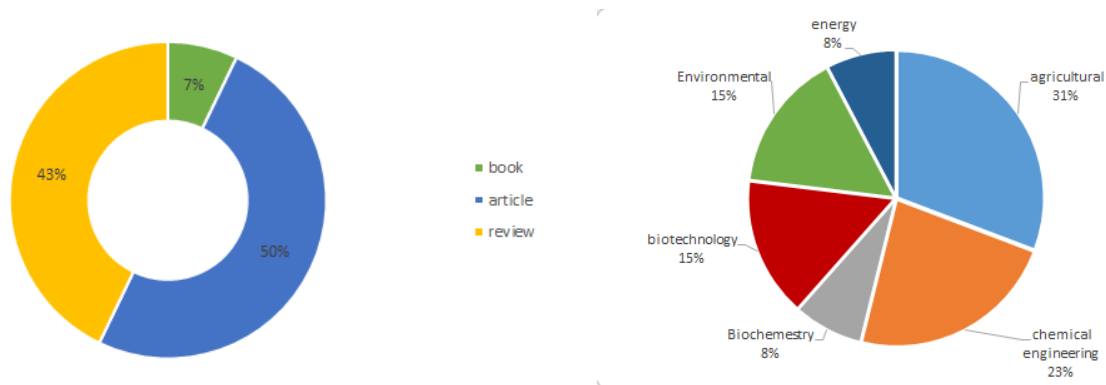


Nota: La figura representa el árbol de decisión para la búsqueda bibliográfica en la caracterización de la biomasa.

De los 20 artículos se analizaron 14 de ellos que brindaban la información necesaria para el desarrollo del capítulo, el rango de tiempo en donde se realizaron las publicaciones va desde 1973 al 2019, encontrados en revistas como información tecnológica, ingenierías USBMed, Agroproductividad, publicaciones sobre el centro internacional de investigación para el desarrollo y repositorios, clasificados por área de investigación, siendo la ingeniería química uno de los campos donde se ha utilizado este residuo actualmente como tema de interés (Figuras 5 y 6). Finalmente para la búsqueda bibliográfica se utilizaron como palabras claves composición, pulpa de café, *coffea arabica*, beneficio húmedo, caracterización y sustrato.

Figura 5 y 6.

Documentos por tipo y área de investigación de la pulpa de café seleccionados.



Nota: Las figuras 5 y 6 representan el total de documentos seleccionados por tipo y área de investigación para la caracterización de la pulpa de café.

3.2 Propiedades de la pulpa de café

El procesamiento del fruto del café se puede obtener mediante dos vías, beneficio en base seca o en base húmeda, cuando se obtiene mediante base húmeda deja como subproducto la pulpa del café, mucilago y aguas de desecho; la pulpa representa aproximadamente entre el 29% y el 45% del peso total en base seca del fruto dependiendo de las condiciones de cultivo, zona y tamaño del fruto, es el subproducto de mayor volumen. Según la bibliografía recopilada en donde se realizaron diversos experimentos, se evidencia una comparación de las características dependiendo de las condiciones en las que se encuentra.

3.2.1 Composición química

En el documento del Instituto de nutrición de Centro América y panamá (INCAP) se realizó una comparación entre pulpa fresca, pulpa deshidratada y pulpa fermentada naturalmente y deshidratada [55], los resultados obtenidos se muestran en Tabla 17.

Tabla 17.*Composición química de la pulpa de café en porcentaje.*

	Fresca	Deshidratada	Fermentada naturalmente y deshidratada
Humedad	76.7	12.6	7.9
Materia Seca	23.3	87.4	92.1
Extracto etéreo	0.48	2.5	2.6
Fibra Cruda	3.4	21.0	20.8
Proteína Cruda N x 6.25	2.1	11.2	10.7
Cenizas	1.5	8.3	8.8
Extracto libre de nitrógeno	15.8	44.4	49.2

Nota: Esta tabla muestra los porcentajes de cada característica química analizada en diferentes condiciones de la pulpa de café. Tomado de pulpa de café composición, tecnología y utilización.

En estos datos se evidencia que la pulpa fresca cuenta con un gran porcentaje de humedad con un valor alrededor del 76.7%, en cuanto al artículo producción de alcohol a partir de la pulpa de café del autor N. Rodríguez, se establece que el contenido de humedad varía entre un 70 a un 80%, lo cual es un factor negativo al momento de darle uso [56]. Sin embargo, la haría apta para el crecimiento de microorganismos, en cuanto a la pulpa deshidratada y la fermentada su porcentaje varía muy poco pero es más bajo al de la fresca.

Entre menor porcentaje de agua posea será mayor su porcentaje de materia seca como se evidencia en el caso de la pulpa deshidratada y fermentada. Para extracto etéreo se identificó que tanto la pulpa deshidratada como la fermentada presentan un valor similar el cual es superior al de la pulpa fresca, dando a entender que dichas pulpas contiene mayor contenido de grasas brutas en las que se pueden cuantificar sustancias como: esterres de los ácidos grasos, fosfolípidos, ceras, esteroides, lecitinas y ácidos grasos libres.

Con relación a la fibra cruda al igual que en el parámetro anterior la pulpa deshidratada y la fermentada presentan porcentajes similares siendo mayor al presentado en la pulpa fresca, estas fibras están constituidas generalmente por celulosa lignina y pentosano.

En el caso de la proteína cruda, que representa la cantidad de nitrógeno que contiene este residuo multiplicado por 6.25 se infiere que la pulpa fresca posee un porcentaje de nitrógeno alrededor de 8 a 9 veces más bajo que en las otras dos pulpas. Por otro lado el extracto libre de

nitrógeno que “representa la cantidad de almidones y azúcares en mayor proporción puesto que cuentan con un alto valor energético así como hemicelulosa, ligninas y vitaminas hidrosolubles” [57], se observa tanto en la pulpa deshidratada como en la fermentada mayores porcentajes que lo hacen más atractivo como sustrato a comparación de la pulpa fresca.

Respecto a las cenizas el contenido de la pulpa fresca es menor al de las otras dos condiciones, por tal motivo estas dos últimas contienen una mayor proporción de minerales y materia orgánica convirtiéndolo en un sustrato más deseable para el crecimiento de microorganismos. No obstante, en relación a lo citado por N. Rodríguez, el porcentaje de cenizas varía entre un 11 al 12% en base seca, lo que representa un porcentaje mayor al establecido en la Tabla 17.

Realizando la comparación con la tesis presentada por E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia, se evidencia que los porcentajes de la composición química presentes en la Tabla 17, son iguales a los reportados en su tesis [58]. Por otro lado las cifras descritas en el artículo de los autores N. Fierro, A. Contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales, presentan una variación significativa según los datos de la Tabla 17, debido a que el porcentaje de humedad en base seca es del 12.5% y para la pulpa fresca es del 85.37% lo cual representa un 8.67% por encima del registrado. En cuanto a la fibra el porcentaje en base seca es del 36.07% y para la pulpa fresca es del 30.63%, valores superiores a los analizados anteriormente. Para las cenizas se registra únicamente el valor en base seca de 9.58% que es muy similar al valor inicial [59]. Las variaciones se dan debido al método seleccionado para la cuantificación, además de las condiciones de cultivo y el proceso de crecimiento del fruto y posterior recolección de la pulpa.

3.2.2 Efectos del secado

Una vez se obtiene la pulpa de café de la especie (*Coffea arábica*) por beneficio húmedo, se realiza el proceso de secado para la conservación de este residuo, dado que al tener altos porcentaje de agua en él lo hacen blanco fácil para el deterioro químico y por microorganismos. A partir del artículo secado de la pulpa de café de los autores L. Torres, K. Martínez, J. Serna y M. Hernández, en donde se evalúan los efectos del secado en las propiedades fisicoquímicas de la pulpa en relación al tiempo, temperatura y velocidad de secado. Se establece que a 60°C durante 7 horas de secado se obtiene el menor porcentaje de humedad con un valor del 13.55%,

“este fenómeno es generado porque un aumento en la temperatura de secado provoca un incremento en la temperatura del producto y en el coeficiente de difusión del agua, consiguiendo que la velocidad de secado sea apreciablemente menor” [60], el aplicar esta técnica de conservación no disminuye las propiedades de dicho fruto en cuanto a los biocomponentes (Cafeína, ácidos clorogénicos y polifenoles), más si se le otorgan a esta biomasa un valor agregado como uso industrial, sin embargo se recomienda que el tiempo de secado sea mayor para lograr un residuo estable.

3.2.3 Compuestos orgánicos

Según la literatura los compuestos orgánicos que son considerados como los principales causantes de la toxicidad de la pulpa de café, se muestran en la siguiente Tabla 18, aquí se evidencian algunos biocomponentes obtenidos después del proceso de secado [55].

Tabla 18.

Compuestos Orgánicos en la pulpa de café.

	% Base seca
Taninos	1.8 – 8.56
Pectinas totales	6.5
Azúcares reductores	12.4
Azúcares no reductores	2.0
Cafeína	1.3
Ácidos clorogénico	2.6
Ácido cafeico total	1.6

Nota: Esta tabla muestra los porcentajes en base seca de los diferentes compuestos orgánicos presentes en la pulpa de café. Tomado de pulpa de café composición, tecnología y utilización.

A partir de la Tabla 18, se infiere que el porcentaje de taninos presentes en la pulpa de café es uno de los más altos frente a los demás compuestos que posee. Al ser los taninos compuestos polifenólicos, “cuentan con la capacidad de formar fuertes complejos con macromoléculas y minerales que contribuyen a un buen sistema de defensa contra microorganismos y herbívoros al ser sustancias amargas, además de que al entrar en contacto con las proteínas son capaces de

desnaturalizarlas” [61], por lo cual no son recomendables para sustratos. Los taninos que habitualmente se encuentran en el café son el catecol (1,2 – dihidroxibenceno) y el pirogalol (1,2,3 – trihidroxibenceno), que por sus características hidrosolubles al entrar en contacto con el agua se pueden disolver fácilmente.

En cuanto a las pectinas totales las cuales son de vital importancia para la adhesión intracelular de la pared celular de la planta se encuentran en un 6.5% que representa el tercer porcentaje más alto, estas sustancias desempeñan un importante papel entre la interacción de la planta y los microorganismos patógenos, actuando como una barrera para evitar la degradación de la pared celular de dicha planta, siendo un factor determinante para la colonización de la biomasa por parte de microorganismos que cuenten con el material enzimático para la degradación de los sustratos presentes en la pared vegetal.

Respecto a los azúcares reductores que son los responsables del sabor dulce que posee la pulpa de café, en donde “la fructosa, la glucosa y la sacarosa son los azúcares predominantes capaces de transformarse en reductonas las cuales son oxidadas en presencia de oxígeno” [62]. Estas sustancias lo convierten en un buen sustrato al ser azúcares simples. Por otro lado los azúcares no reductores compuesto por dos o más monosacáridos son azúcares más complejos que de igual manera aportan hidratos de carbono para el crecimiento de los microorganismos.

Uno de los porcentajes más bajos en la tabla es la cafeína, que se encuentra en el fruto como (1,3,7 trimetilxantina) junto con la teofilina y la teobromina [63], que le proporcionan al café las propiedades estimulantes, a su vez actúan como pesticidas naturales evitando la proliferación de insectos y plagas en los cultivos. El ácido clorogénico al igual que el ácido cafeico tienen las mismas características que los taninos por ser compuesto polifenólico encargado de otorgarle al café el sabor amargo que lo caracteriza. El ácido cafeico en la naturaleza se encuentra en las plantas como antioxidante con propiedades anticancerígenas.

Se evidencia que en la tesis presentada por E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia, los porcentajes de otros compuestos presentes en la pulpa de café [58], son los mismo que se registran en la Tabla 18. En el artículo de N. Rodríguez se difieren algunos valores como en el caso del porcentaje de cafeína con un 0.75%, valor inferior al comentado anteriormente, taninos con un 3.70% el cual se encuentra en el rango representado en la tabla, un 17.31% para azúcares

reductoras, valor superior al analizado y finalmente 1.18% para azúcares no reductores muy aproximado al registrado [56]. En la tesis de D. Arenas, el peso en base seca de la cafeína corresponde a 1.3%, que es semejante al valor recopilado anteriormente, para los taninos es de 4.5% localizado dentro del rango establecido en la Tabla 18 y pectinas de 12.4% el cual es superior al valor analizado [64]. Por el contrario, en el artículo presentado por N. Fierro, A. Contreras, O. Gonzales, E. Rosa y V. Morales, se mencionan los siguientes valores [59], Tabla 19.

Tabla 19.

Otros Compuestos orgánicos en la pulpa de café.

	Unidad	Base seca
Fenoles Totales	mg EAG g ⁻¹ pulpa	4.09
Azúcares reductores	%	45.67
Proteína	%	10.63
Cafeína	%	2.262
Conductividad eléctrica	S/dm	7.88
Materia orgánica	%	92.11

Nota: Esta tabla se evidencian algunos compuestos orgánicos presentes en la pulpa de café. Tomado de caracterización química y nutrimental de la pulpa de café *coffea arábica*.

Se observa que la Tabla 19 presenta un contenido superior en relación al porcentaje de cafeína y azúcares reductores. En cuanto a los fenoles totales se encuentran descritos en (mg EAG g⁻¹ pulpa) que representa la capacidad antioxidante de las sustancias fenólicas que disminuyen la degradación por oxidación del residuo. Las proteínas cuantificadas en la tabla le confieren un valor nutricional para ser utilizado como alimento animal. En lo referido a la conductividad eléctrica esta depende de la concentración de iones disueltos en solución acuosa, al tratarse de un material orgánico sus moléculas no se disocian y conducen muy baja electricidad es por eso que posee un valor 7.88 siemens por decímetro. Finalmente en relación al porcentaje de materia orgánica que contiene en base seca es de 92.11% representando las biomoléculas como los polisacáridos y los constituyentes de la pared celular que son vitales para la nutrición y producción de energía.

3.2.4 *Minerales*

Los contenidos de cenizas y minerales presentes en la pulpa de café a partir de lo citado en el documento del Instituto de nutrición de Centro América y Panamá (INCAP) [55], se observan en la siguiente Tabla 20.

Tabla 20.

Cenizas y minerales en la pulpa de café.

Compuesto	Contenido
Cenizas, g%	8.3
Ca, mg%	554
P, mg%	116
Fe, mg%	15
Na, mg%	100
K, mg%	1765
Mg	Trazas
Zn, ppm	4
Cu, ppm	5
Mn, ppm	6.25
B, ppm	26

Nota: Esta tabla muestra los porcentajes de cenizas y minerales presentes en la pulpa de café. Tomado de pulpa de café composición, tecnología y utilización.

Por lo general la materia orgánica está compuesta de ciertos elementos que son de gran utilidad para sus procesos metabólicos, estos son los minerales, generalmente se encuentran clasificados en macro y micronutrientes, ambos son indispensable pero lo que varía son sus concentraciones. En relación a los valores presentados se estima que los elementos que se encuentran en mayor proporción corresponden a potasio, calcio, sodio y fósforo. El valor más alto de la lista corresponde al potasio, y debido a esto presenta problemas para ser utilizado como residuo en la alimentación animal, sin embargo para el crecimiento de microorganismos es útil la presencia de dichos elementos para su metabolismo, ya que no importa si son heterótrofos o autótrofos todos requieren de ellos ya sea en forma de sales aniónicas o catiónicas para la activación de enzimas, estabilidad de membrana, síntesis de ácidos nucleicos, entre otras cosas.

En lo concerniente al artículo de los autores J. Figueroa, J. Mendoza [59] ([65]), donde se realizó un estudio en base húmeda del beneficio del café obteniendo los siguientes resultados de minerales en base seca. Potasio en promedio es de 3.1 ± 0.46 g%, en comparación al de la tabla, se evidencia que este es superior, pero el resultado del contenido de este mineral varía según la zona del cultivo. Para el calcio se presenta un valor de 0.46 ± 0.06 g% el cual es muy similar al de la anterior tabla, por otra parte el contenido de fósforo es de 0.13 ± 0.01 g%, que es muy cercano al valor presentado en el documento del Instituto de nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). En este documento el valor que se le da al magnesio es considerado como trazas y en lo expuesto por J. Figueroa, J. Mendoza [59] ([65]), tiene una cuantificación de 0.14 ± 0.01 g%. Según un artículo de J. Rubio y J. Pineda, el porcentaje que presenta el potasio es de 7.10 g%, el calcio es de 0.76 g%, el fosforo 0.52 g% los cuales son muy superiores respecto a los otros valores ya mencionados, en lo referido al magnesio el valor 0.10 g% [66], que comparado con el valor citado por de J. Figueroa, J. Mendoza, es muy similar.

3.2.5 Polisacáridos estructurales

Otros de los compuestos que integran la pulpa de café son los constituyentes de la pared celular y polisacáridos estructurales los cuales son importantes ya que en ellos se encuentran una gran cantidad de materia orgánica que se encarga de proporcionar la rigidez estructural del fruto, por lo general es la encargada de proteger y contener la membrana, constituida especialmente por celulosa, polisacáridos y glicoproteínas que varían en su composición según el tipo de función que desarrolla.

En el documento del Instituto de nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), se realizó por medio del método Van Soest la caracterización de los constituyentes presentes en la pared celular y adicionalmente se determinó el contenido verdadero de celulosa y lignina [55], los valores obtenidos se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 21.

Polisacáridos estructurales en la pulpa de café.

	(g%)
Contenido celular	63.2
Fibra detergente neutra	36.8
Fibra ácida detergente	34.5
Hemicelulosa	2.3
Celulosa	17.7
Lignina	17.5
Proteína lignificada	3.0
Proteína cruda	10.1
Cenizas insoluble	0.4

Nota: Esta tabla muestra los polisacáridos estructurales presentes en la pulpa de café. Tomado de pulpa de café composición, tecnología y utilización.

A partir del método utilizado se busca encontrar la composición de cada uno de los constituyentes haciendo uso de soluciones detergentes ácidas y neutras, así mismo se determina la fibra detergente neutra NDF, y la fibra detergente ácida ADF, esto con el fin de establecer el porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina. Se determinó un porcentaje de 36.8% para la NDF la cual cuantifica la celulosa, la hemicelulosa y lignina que muestra la parte fibrosa del residuo es decir los carbohidratos estructurales. El porcentaje de 34.5% para el ADF representa de una manera negativa la digestibilidad en la alimentación animal utilizando la pulpa de café

En la tabla 21, se infiere que la pulpa de café cuenta con un porcentaje alto de contenido celular de 63.2% lo que representa una gran porción de nutrientes en los que se destacan los polisacáridos conformados por azúcares, proteínas formadas por aminoácidos, lípidos, pectinas y minerales, debido a sus componentes lo hacen apto para ser un buen sustrato.

En lo referente a la celulosa esta cuenta con un 17.7%, siendo la encargada de darle rigidez a la pared celular, en su mayoría está constituida de glucosa y es por esto que algunos microorganismos son capaces de degradarla hasta obtenerla. A diferencia de la celulosa la hemicelulosa es un polisacárido de más fácil degradación y se encuentra en una proporción

mucho más baja 2.3% siendo un interface entre la celulosa y la lignina. En torno a la lignina con un porcentaje de 17.5%, evidencia ser uno de los más abundantes constituyentes junto con la celulosa en este residuo, posee una naturaleza polimérica, que se encarga de darle resistencia a los tejidos de la planta evitando los ataques bacterianos y a la vez le otorga permeabilidad a la pared celular.

En el caso de la proteína que es la unión de varios aminoácidos capaces de aportar varios nutrientes se dividió en dos, por una parte la proteína cruda con un porcentaje de 10.1% representa en su mayoría al nitrógeno que contiene, siendo este valor una buena fuente del nutrientes, por el contrario la proteína lignificada con un valor de 3.0% el cual se relaciona con la lignina presente en la pared celular, hace más difícil su digestibilidad y lo convierte en una restricción como uso en la alimentación animal.

N. Rodríguez cita que el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina son de 29.50%, 4.60% y 16.90% respectivamente [56], los cuales comparados con los valores de la Tabla 21. Son mayores en cuanto a celulosa y hemicelulosa e inferior respecto a la lignina, estas variaciones se pueden presentar dado a la variedad que se encuentra dentro de la especie de (*Coffea arábica*). En otro artículo los autores G. Carvajal y L. Marulanda presentan los mismos resultados que los citados en la tabla a partir de un análisis Bromatológico de la pulpa de café de sus constituyentes celulares.

Ciertos compuestos de la pared celular como lo son los lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina) cuentan con la capacidad de adsorber los iones metálicos, en donde la eficiencia de adsorción depende de sus grupos funcionales y la afinidad hacia los metales. En lo reportado por C. Tejada, A. Villabona y L. Garcés, los principales grupos de metales se clasifican en: Grupo A, Iones intermedios y Grupo B, los cuales son afines según el tipo de ligando: I, II y III, como se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 22.*Afinidad grupos funcionales e iones metálicos.*

Tipo de ligandos	Ligandos	Grupos de metales
I : ligandos que prefiere al grupo A	F^- , O_2^- , OH^- , H_2O , CO_3^{2+} , SO_4^- , $ROSO_3^-$, NO_3^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , ROH , $RCOO^-$, $C=O$, ROR	Grupo A: Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Sc, Rb, Sr, Y, La, Fr, Ra, Ac, Al, Lantánidos, Actínidos
II: otros ligandos	Cl^- , Br^- , N_3^- , NO_2^- , SO_3^{2-} , NH_3 , N_2 , RNH_2 , R_2NH , $=N^-$, $-CO-N-R$, O_2 , O_2^- , O_2^{2-}	Iones intermedios: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Cd, In, Sn, Sb, As
III : ligandos que prefieren al grupo B	H^- , I^- , R^- , CN^- , CO , S^{2-} , RS^- , R_2S , R_3AS .	Grupo B: Rh, Pd, Ag, Lr, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, B

Nota: Esta tabla muestra los diferentes grupos funcionales que permiten la adsorción de los iones metálicos. Tomado de Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico.

Al contar la pupa de café con una cantidad significativa en cuanto a celulosa, lignina y pectinas, posee la capacidad de ser utilizada como adsorbente de iones metálicos lo cual es una ventaja para mitigar tanto la contaminación causada por los metales pesados como la producida por los residuos del café que no reciben un correcto tratamiento.

3.2.6 Aminoácidos

Teniendo en cuenta la fracción proteica de la pulpa de café, se determinó el contenido de aminoácidos presentes bien sean esenciales y no esenciales obtenido como resultado los datos de la Tabla 23.

Tabla 23.

Aminoácidos presentes en la proteína de la pulpa de café.

Aminoácido	(g/16gN)
Lisina	6.8
Histidina	3.9
Arginina	4.9
Treonina	4.6
Cistina	1.0
Metionina	1.3
Valina	7.4
Isoleucina	4.2
Leucina	7.7
Tirosina	3.6
Fenilalanina	4.9
Hidroxiprolina	0.5
Acido aspártico	8.7
Serina	6.3
Ácido glutámico	10.8
Prolina	6.1
Glicina	6.7
Alanina	5.4

Nota: Esta tabla muestra el contenido de aminoácidos presentes en la proteína de la pulpa de café. Tomado de pulpa de café composición, tecnología y utilización.

Según los datos recopilados en el documento del Instituto de nutrición de Centro América y Panamá (INCAP) [55] y el presentado por los autores E. Armas, N, Cornejo y K. Murcia [58] se coincide en los valores composicionales de aminoácidos esenciales y no esenciales donde estos representan el 49.7 y 49.1 (g/16gN) respectivamente.

En el caso de los aminoácidos esenciales se evidencia que la leucina, valina y lisina son los que en mayor proporción se encuentran, ayudan a estimular el crecimiento de la planta, sirven como mecanismos de resistencia ante condiciones no deseadas y mejoran la calidad del fruto. En lo que concierne a los aminoácidos no esenciales el ácido glutámico, el ácido aspártico, la glicina, serina y prolina, se encuentran mayormente en la pulpa, que al igual que algunos

aminoácidos esenciales se encargan de dar resistencia antes factores indeseados, de funciones metabólicas y algunos casos sirven como precursores de alcaloides contra patógenos y herbívoros. Sin embargo “estos aminoácidos representan únicamente el 60% del nitrógeno presente en la pulpa y el 40% restante se considera nitrógeno no proteico en el que se incluye sustancias como la cafeína, purinas nitrógeno inorgánico y entre otros” [55].

Los aminoácidos son moléculas indispensables para la obtención de energía de aquellos microorganismos que cuentan con las enzimas necesarias para degradarlos y utilizarlos.

3.3 Pulpa de café como sustrato

En un estudio realizado por los autores G. Blandón, N. Rodríguez y M. Dávila, en el cual se realizó una comparación entre los sustratos pulpa de café y una mezcla entre la pulpa de café y el mucilago para la elaboración de un compostaje.

Entre los microorganismos que se logran evidenciar que están presentes en la pulpa de café fresca se encuentran: *Candida*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Hafnia*, *Rhodotorula*, *Serratia*, *Staphylococo*, *Streptomyces* y *Torulopsis*. Se debe tener en cuenta que varios de estos géneros al someterlos a diferentes condiciones de temperatura, pH, aireación, Humedad y requerimientos nutricionales, no logran adaptarse y mueren. Por otro lado gracias a dichas condiciones se da la proliferación de nuevas especies.

Luego de dos meses de almacenamiento los microorganismos que se encontraron fueron especies como: *Aspergillus*, *Candida*, *Escherichia*, *Streptomyces*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Pseudomonas*, *Sarcina*, *Enterobacter*, *Intraesporangium*, *Klebsiella*, *Penicillium* y *Staphylococcus*, estos microorganismos se presentaron debido al cambio en las propiedades fisicoquímicas del medio producidos por la transformación de la materia orgánica. Finalmente luego del lombricomposteo, se identificaron organismos como: *Aeromonas*, *Aspergillus*, *bacilo gram(+)*, *Citrobacter*, *Cladosporium*, *Chromobacterium*, *Enterobacter*, *Streptomyces*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Klebsiella*, *Penicillium*, *Pseudomonas*, *Actinomadura*, *Xanthomona*, *Escherichia* y *Providencia*, al igual que en el caso de almacenamiento esto se da por el cambio en las propiedades específicamente por el incremento de nutrientes que ayudan al crecimiento de nuevos microorganismos [67].

Debido a estos datos se puede concluir que la pulpa de café es un buen sustrato para el crecimiento del genero seleccionado (*Aspergillus*) ya que posee condiciones óptimas para su desarrollo como minerales, porcentaje de humedad, fibras, proteínas, aminoácidos y carbohidratos.

Tabla 24.

Tabla resumen

	CARACTERÍSTICAS	UND	VALOR	AUTOR
Composición química pulpa fresca	Humedad	%	76.7	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			85.37	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Materia Seca	%	23.3	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Extracto etéreo	%	0.48	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Fibra Cruda	%	3.4	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			30.63	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Proteína Cruda N x 6.25	%	2.1	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Cenizas	%	1.5	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
Extracto libre de nitrógeno	%	15.8	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)	
Composición química pulpa seca	Humedad	%	12.6	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			12.5	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Materia Seca	%	87.4	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			92.11	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Extracto etéreo	%	2.5	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Fibra Cruda	%	21.0	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			36.07	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Proteína Cruda N x 6.25	%	11.2	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			10.63	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Cenizas	%	8.3	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			9.58	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
Extracto libre de nitrógeno	%	44.4	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)	

Tabla 24 continuación.

Compuestos orgánicos en base seca	Taninos	%	1.8 – 8.56	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			3.70	N. Rodríguez (2013)
			4.5	D. Arenas (2009)
	Pectinas totales	%	6.5	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			12.4	D. Arenas (2009)
	Azúcares reductores	%	12.4	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			17.31	N. Rodríguez (2013)
			45.67	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
	Azúcares no reductores	%	2.0	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
			1.18	N. Rodríguez (2013)
	Cafeína	%	1.3	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008) / D. Arenas (2009)
			0.75	N. Rodríguez (2013)
			2.262	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)
Ácidos clorogénico	%	2.6	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)	
Ácido cafeico total	%	1.6	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)	
Fenoles Totales	mg EAG g ⁻¹ pulpa	4.09	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)	
Conductividad eléctrica	S/dm	7.88	N. Fierro, A. contreras, O. Gonzales, E. Rosa, V. Morales (2018)	
Minerales	Ca	mg%	554	INCAP (1979)
		g%	0.46 ± 0.06	J. Figueroa, J. Mendoza (2010)
			0.76	J. Rubio y J. Pineda (1973)
	P	mg%	116	INCAP (1979)
		g%	0.13 ± 0.01	J. Figueroa, J. Mendoza (2010)
			0.52	J. Rubio y J. Pineda (1973)
	Fe	mg%	15	INCAP (1979)
Na	mg%	100	INCAP (1979)	

Tabla 24 continuación.

Minerales	K	mg%	1765	INCAP (1979)
		g%	3.1 ± 0.46	J. Figueroa, J. Mendoza (2010)
			7.10	J. Rubio y J. Pineda (1973)
	Mg	g%	Trazas	INCAP (1979)
			0.14 ± 0.01	J. Figueroa, J. Mendoza (2010)
			0.10	J. Rubio y J. Pineda (1973)
	Zn	Ppm	4	INCAP (1979)
	Cu	Ppm	5	INCAP (1979)
Mn	Ppm	6.25	INCAP (1979)	
B	Ppm	26	INCAP (1979)	
Polisacáridos	Contenido celular	g%	63.2	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
	Fibra detergente neutra	g%	36.8	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
	Fibra acida detergente	g%	34.5	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
	Hemicelulosa	g%	2.3	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
		%	4.60	N. Rodríguez (2013)
	Celulosa	g%	17.7	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
		%	29.50	N. Rodríguez (2013)
	Lignina	g%	17.5	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
		%	16.90	N. Rodríguez (2013)
	Proteína lignificada	g%	3.0	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)
Proteína cruda	g%	10.1	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)	
Cenizas insoluble	g%	0.4	INCAP (1979) / G. Carvajal y L. Marulanda (2020)	
Aminoácidos	Lisina	g/16gN	6.8	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Histidina	g/16gN	3.9	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Arginina	g/16gN	4.9	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Treonina	g/16gN	4.6	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Cistina	g/16gN	1.0	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Metionina	g/16gN	1.3	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Valina	g/16gN	7.4	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)

Tabla 24 continuación.

Aminoácidos	Isoleucina	g/16gN	4.2	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Leucina	g/16gN	7.7	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Tirosina	g/16gN	3.6	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Fenilalanina	g/16gN	4.9	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Hidroxiprolina	g/16gN	0.5	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Acido aspártico	g/16gN	8.7	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Serina	g/16gN	6.3	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Ácido glutámico	g/16gN	10.8	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Prolina	g/16gN	6.1	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Glicina	g/16gN	6.7	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)
	Alanina	g/16gN	5.4	INCAP (1979) / E. Armas, N. Cornejo y K. Murcia (2008)

Nota: Esta tabla muestra un resumen de las propiedades de la pulpa de café a partir de la bibliografía utilizada en el desarrollo del capítulo.

3.4 Conclusión

Un buen sustrato debe poseer ciertas características para que coincida con el soporte, entre las cuales están: «insoluble en la solución de humectación para garantizar las condiciones del cultivo en estado sólido al momento de la incubación, se debe poseer gran cantidad de carbohidratos y de proteínas, una estructura que permita la adhesión y penetración del microorganismo, que sea fermentable, baja tendencia a la aglomeración con el micelio y a la formación de masas compactas durante la fermentación a fin de evitar restricciones» [68].

Se describieron las características fisicoquímicas de la pulpa de café partiendo de la literatura, en donde se concluye que la pulpa de café de la especie (*Coffea arábica*) cuenta con gran contenido de azúcares, polisacáridos, proteínas, carbohidratos y compuestos fáciles de degradar, lo cual la convierten en un buen sustrato para el crecimiento de microorganismos dado que posee los nutrientes necesarios, además de contar con ciertos compuestos de la pared celular en un buen porcentaje como lo son la celulosa y la lignina que permiten la adsorción de los iones metálicos debido a que cuentan con grupos funcionales como lo son los carboxilos, hidroxilos y carbonilos, los cuales presentan gran afinidad hacia dichos metales. Por otro lado el *Aspergillus niger* es uno de los microorganismos capaces de degradar las sustancias tóxicas que contiene la pulpa de café como lo son la cafeína, taninos y demás compuestos polifenólicos, convirtiéndolo en un género interesante, razón por la cual es posible el desarrollo de un bioadsorbente, puesto que la pulpa de café promueve el crecimiento de este hongo objetivo de este trabajo.

4 CONDICIONES OPERACIONALES PARA EL DESARROLLO DE UN BIOADSORBENTE (PULPA DE CAFÉ Y *ASPERGILLUS NIGER*)

El *Aspergillus niger* es un hongo filamentoso que hoy en día tiene un gran valor agregado para la biotecnología, dado que es utilizado ampliamente de manera industrial para la producción de numerosas enzimas y productos como el ácido cítrico, además de ser un microorganismo de fácil adaptación a las diferentes condiciones presentes en el entorno y al acoplarse a los diferentes sustratos. Por otro lado con la creciente importancia que se le ha dado al medio ambiente debido al aumento de la contaminación especialmente por parte del sector industrial, se ha optado por usar este microorganismo en la biorremediación de los ecosistemas gracias a su morfología y su capacidad de actuar como biotransformador, bioacumulador y bioadsorbente de sustancias contaminantes especialmente de metales pesados como el Cr (VI). Por otro lado, la pulpa de café que será el sustrato para el crecimiento del *Aspergillus niger*, cuenta con la capacidad de ser un bioadsorbente para la remoción de metales pesados por sus propiedades fisicoquímicas que la convierte en un excelente intercambiador iónico con estas sustancias [29].

En este capítulo se identificarán las condiciones operacionales necesarias para el desarrollo de un bioadsorbente entre la pulpa de café y el *Aspergillus niger* para la remoción de metales pesados, de manera particular del Cr (VI) el cual ha causado altos niveles de contaminación en el ecosistema acuático. Esto se realizará a través de un análisis bibliográfico en donde se determinarán las propiedades morfológicas del microorganismo, las condiciones de remoción, su medio de fermentación y su asociación (biótica o abiótica).

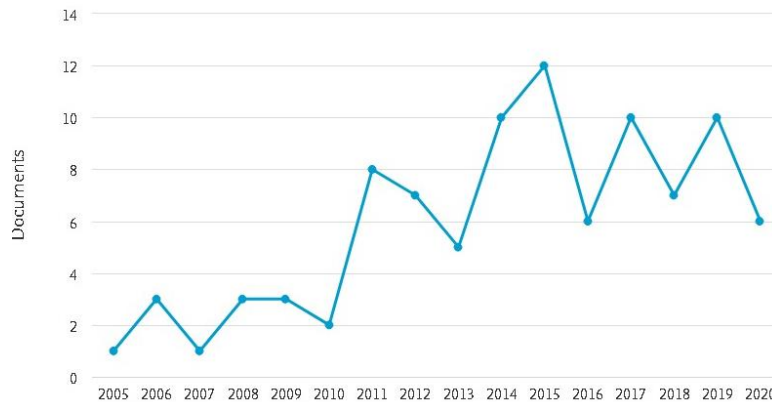
4.1 Caracterización bibliográfica

Se desarrolló una caracterización bibliográfica dividida en 3 partes para la realización de capítulo, con ayuda de las herramientas de bibliometría tales como Mendeley, Refworks, Nube de palabras, Legible, Sentigem, Grammarly y Scopus. Para la primera parte se recopiló información relacionada con la morfología del *Aspergillus niger* en donde se encontraron 94 artículos. En la Figura 7 se evidencian los artículos por año, siendo el 2015 donde se presentan mayor número de publicaciones, en la Figura 8 se clasifican los documentos por área,

biotecnología presenta el mayor porcentaje seguido por microbiología, en este caso ingeniería química cuenta con un porcentaje de 8.6% siendo la quinta área con investigación.

Figura 7.

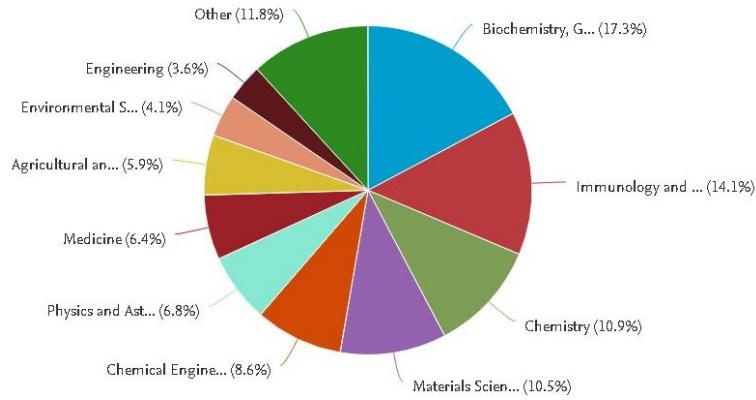
Documentos por año morfología Aspergillus niger.



Nota: La figura 7 representan el total de documentos recopilados por año en el rango del 2000 al 2020 sobre la caracterización morfológica del *Aspergillus niger*. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Figura 8.

Documentos por área de investigación del *Aspergillus niger*.

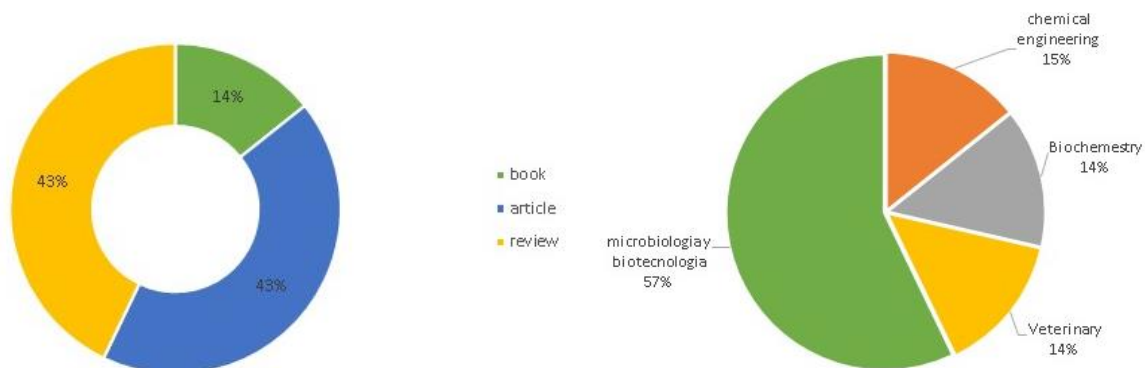


Nota: La figura 8 muestra las áreas de investigación sobre la morfología del *Aspergillus niger*. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

De este total de artículos se seleccionaron 13, de ellos se utilizaron 7 los cuales reunían la información necesaria. En las Figuras 9 y 10 se identifican la clasificación de los documentos tanto por tipo como por área de investigación, se observa que tanto en las revisiones como en los artículos se presenta el mismo porcentaje del 43% y en cuanto el área, microbiología y biotecnología se encuentran en primer lugar seguidas por ingeniería química, puesto que estas ramas de investigación buscan estudiar este tipo de microorganismos para realizar modificaciones y poder implementar diferentes productos, como en este caso que se busca hacer una biorremediación con el *Aspergillus niger* eliminando las sustancias contaminantes de los ecosistemas especialmente en el acuático, a través de una propuesta de un bioadsorbente, el cual se podría llevar a escala industrial con la debida investigación.

Figura 9 y 10.

Documentos por tipo y área de investigación del Aspergillus niger seleccionados.

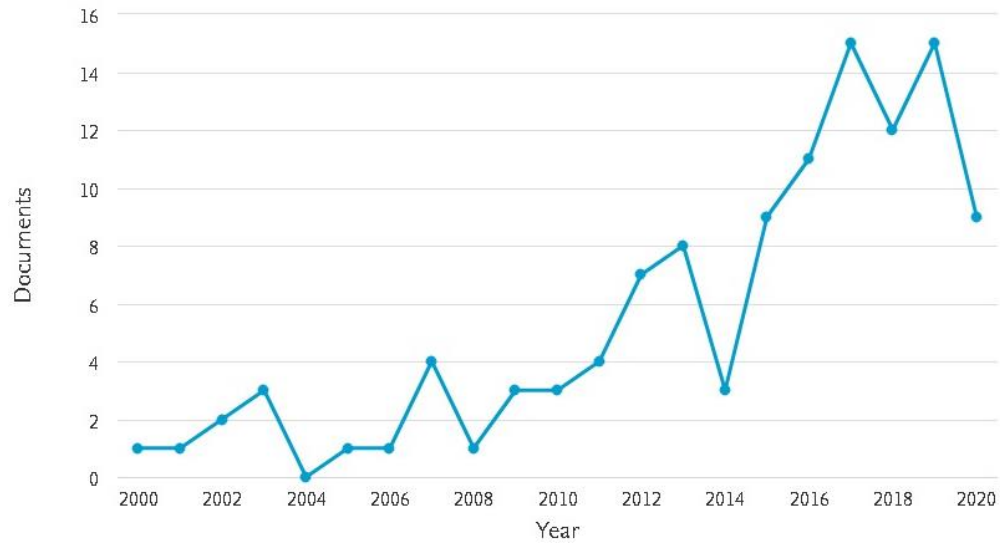


Nota: Las figura 9 y 10 representan la clasificación por tipo de documento y área de investigación sobre la morfología del *Aspergillus niger*.

En cuanto a la segunda etapa con ayuda de la bibliometría mencionada anteriormente, se encontraron un total de 113 artículos para la remoción de metales pesados mediante microorganismos y sus condiciones necesarias para llevar a cabo esta remoción, en la Figura 11 se reflejan los documentos filtrados por año en un rango de tiempo entre el 2000 y el 2020, donde desde el 2015, las publicaciones sobre este tema aumentan con respecto a años anteriores. En la Figura 12 se clasifican los documentos por área de investigación, aquí el medio ambiente, agricultura y ciencias biológicas sobresalen con los mayores porcentajes, e ingeniería química se encuentra en la quinta posición.

Figura 11.

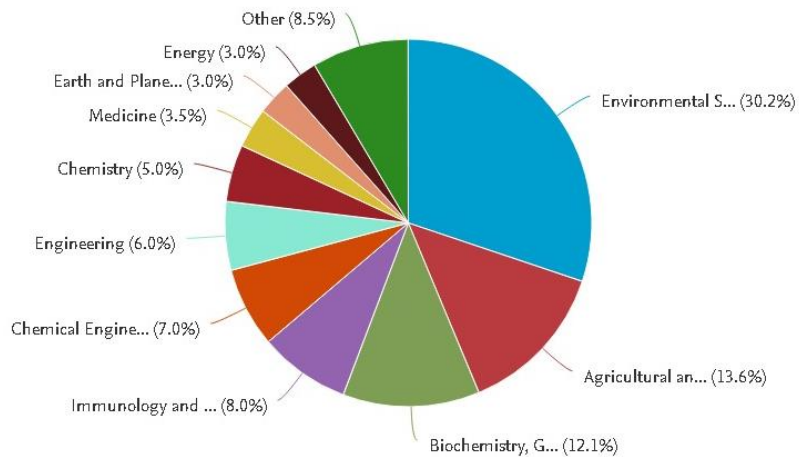
Documentos por año sobre la biorremediación de metales pesados.



Nota: La figura 11 presenta los documentos reunidos por año para el rango del 2000 al 2020 en cuanto a la remoción de iones metálicos mediante el uso de microorganismos. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Figura 12.

Documentos por área de investigación sobre la biorremediación de metales pesados.

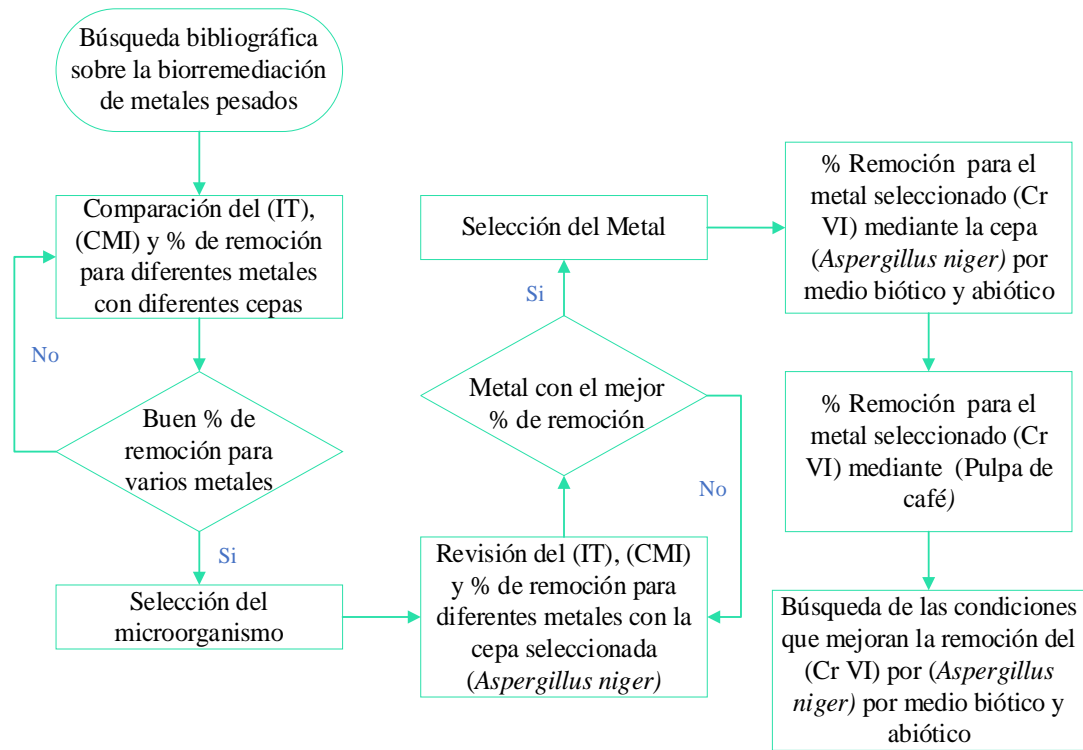


Nota: La figura 12 muestra los porcentajes de las diferentes áreas de investigación sobre la remoción de iones metálicos mediante el uso de microorganismos. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Para la selección de los artículos de interés se realizaron los siguiente pasos (Figura 13).

Figura 13.

Diagrama de flujo para la búsqueda bibliográfica.



Nota: La figura 13 muestra los pasos que se tuvieron en cuenta para la selección de los documentos necesarios para el desarrollo del capítulo.

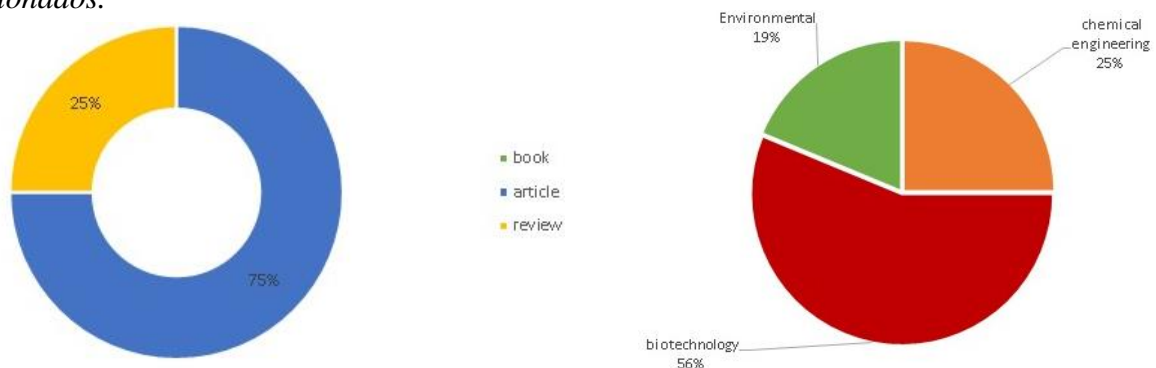
Para considerar los artículos relevantes se tuvo en cuenta 3 grandes aspectos y se analizaron de la siguiente forma: en la primera parte se realizó una comparación entre diferentes cepas de microorganismos con un buen índice de tolerancia a iones metálicos, con un valor de concentración mínima inhibitoria para los metales elevada y finalmente que contara con un buen porcentaje de remoción, de estos valores se identificó que la cepa de *Aspergillus niger* cumple con estos aspectos, convirtiéndolo en un microorganismo interesante para llevar a cabo la investigación. En la segunda parte se vuelven a revisar los tres parámetros anteriores centrándonos en el microorganismo seleccionado con diferentes metales. A la hora de seleccionar el metal para trabajar se tuvo en cuenta la contaminación causada por este y el porcentaje de remoción capaz de efectuar el microorganismo, por lo cual se eligió el Cr (VI). Para la última parte se investigó el estado en el que se encuentra la biomasa y condiciones que

mejoran la remoción, sin dejar de lado la capacidad de remoción para este mismo metal que presenta el sustrato.

A partir de esto se seleccionaron 17 artículos de los cuales se utilizaron 16 en total, en las Figuras 14 y 15 se identifican el total de artículos por tipo de documento y área que fueron de importancia para el capítulo, encontrando que los artículos son los que predominan junto con el área de biotecnología, este sector se ve beneficiado al ser un tema relevante para desarrollo sin dejar de lado el medio ambiente, dado que nos ofrece diferentes oportunidades para realizar la descontaminación de los ecosistemas al utilizar la capacidad de diferentes biomásas que son consideradas fuente de contaminación al no realizarles un adecuado manejo, y por otro lado se aprovecha la capacidad que tienen los microorganismos para captar estas sustancias.

Figura 14 y 15.

Documentos por tipo y área de investigación sobre la biorremediación de metales pesados seleccionados.

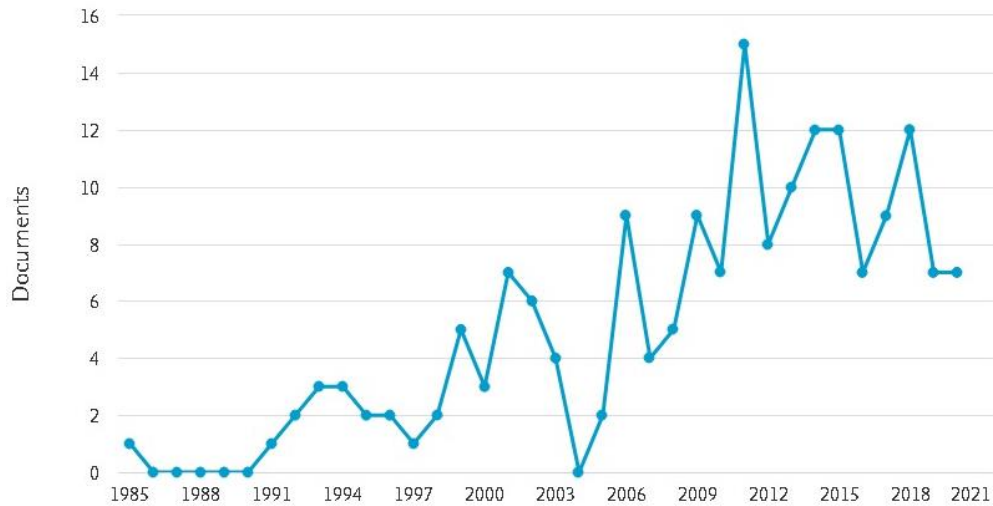


Nota: Las figuras 14 y 15 muestran los porcentajes para los tipos y las diferentes áreas de investigación sobre la remoción de iones metálicos mediante el uso de microorganismos.

Finalmente en la tercera parte la investigación arrojó un total de 177 artículos en lo referente al tipo de fermentación bien sea sólida o sumergida, en la Figura 16 se identifican el total de documentos de este tema de investigación por año desde 1980 al 2020, siendo del 2009 al 2012 los años con mayores publicaciones, seguidos por 2014 y el 2018. La Figura 17 presenta las áreas de interés para este tema, destacando la bioquímica, microbiología e ingeniería química con porcentajes de 26.5%, 19.8% y 18.6% respectivamente.

Figura 16.

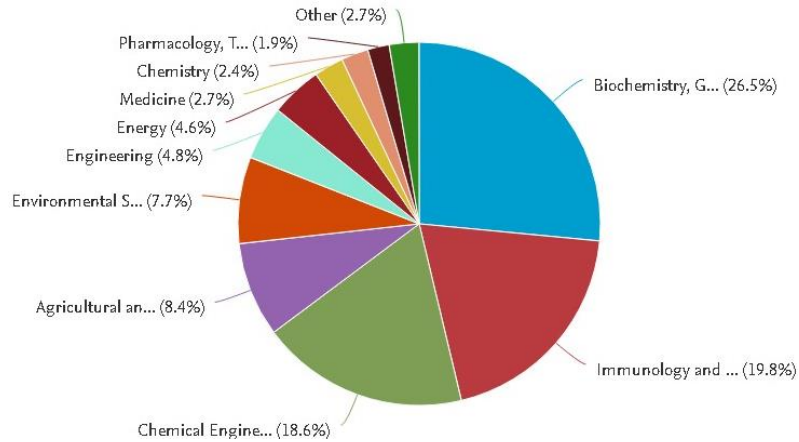
Documentos por año sobre la fermentación mediante Aspergillus niger.



Nota: La figura 16 registra el total de documentos recopilados por año en el rango de 1980 al 2020 en cuanto a la fermentación sólida y sumergida utilizando el *Aspergillus niger*. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Figura 17.

*Documentos por área de investigación sobre la fermentación mediante *Aspergillus niger*.*

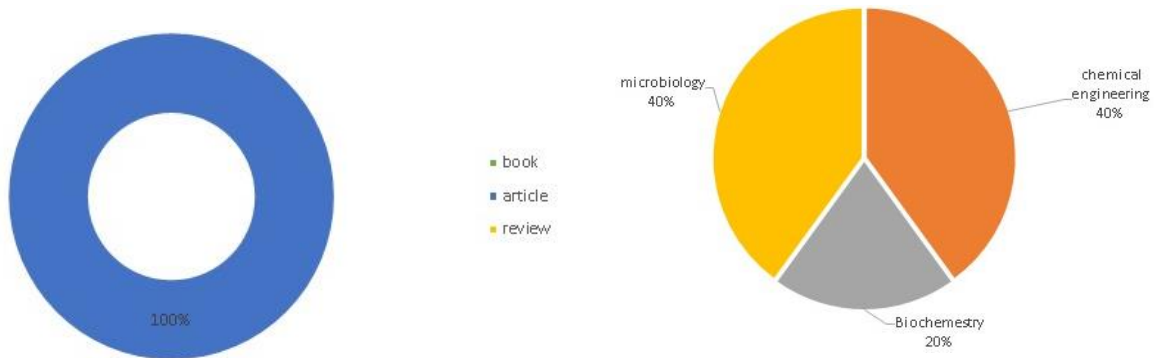


Nota: La figura 17 presenta el total de documentos recopilados por área de investigación en lo referente a la fermentación sólida y sumergida utilizando el *Aspergillus niger*. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Como segundo filtro se seleccionaron 17 artículos, de los cuales se utilizaron 7 que hablan de manera más detallada sobre el proceso y las condiciones para el crecimiento del *Aspergillus niger* a tener en cuenta sobre diferentes sustratos. Las Figuras 18 y 19 evidencian tanto el tipo de documento que en su totalidad fueron artículos de revista y el área de investigación en donde microbiología e ingeniería química presentan el mismo porcentaje del 40%, se debe tener en cuenta que estos dos campos tienen como interés la obtención de productos y subproductos de valor agregado empleando microorganismos, razón por la cual se ha ampliado el estudio en estos temas para su posterior implementación en la industria.

Figura 18 y 19.

Documentos por tipo y área de investigación sobre la fermentación es estado sólido y sumergidos utilizando *Aspergillus niger* seleccionados.



Nota: Las figuras 18 y 19 muestran los porcentajes para el tipo de documento y las diferentes áreas de investigación sobre la fermentación es estado sólido y sumergidos utilizando *Aspergillus niger*.

4.2 Identificación morfológica del *Aspergillus niger*

Los hongos son organismos eucariotas llegando a ser unicelular o pluricelular, que generalmente se encuentran con una gran variedad en el medio ambiente siendo parte de los ecosistemas. El realizar una caracterización del microorganismo a nivel macroscópico y microscópico del organismo que será objeto de estudio es fundamental para identificar su interacción con otros elementos a su alrededor. Estos microorganismos poseen varias habilidades ya sean para actuar como patógenos o ser de beneficio para el entorno y los seres humanos, debido a sus facultades en el uso en la industria farmacéutica, de alimentos, o ya sea por su papel en el reciclaje y degradación de materia orgánica. Su identificación será indispensable para obtener buenos resultados en las prácticas a las cuales será sometido.

4.2.1 Métodos de identificación

Existen varios métodos que se han desarrollado a través de la historia con el fin de facilitar la identificación de varias especies pertenecientes a los grandes géneros de un reino. Entre los métodos más usados se encuentran los fenotípicos, bioquímicos, inmunológicos y moleculares, siendo este último el de mayor complejidad pero el que mayor sensibilidad y especificidad posee a la hora de realizar un trabajo de identificación.

4.2.1.I. Métodos fenotípicos y bioquímicos: estudio convencional basado en las características observables tales como sus características microscópicas, morfología, propiedades bioquímicas y metabólicas. Así mismo se debe tener en cuenta el medio de cultivo y sus condiciones óptimas en las que se incluyen requisitos de crecimiento como temperatura y nutrición [69]. Por otro lado en la identificación bioquímica se analiza las características metabólicas y la producción de enzimas mediante pruebas preliminares de lectura rápida, intermedia y lenta [70].

- Métodos inmunológicos: consiste en la determinación de anticuerpos, producidos por cada especie debido a los polisacáridos que se encuentran en el micelio, la prueba consiste en agregar un antígeno a un medio de cultivo para detectar el anticuerpo [71].

- Métodos moleculares: este método comenzó utilizando sistemas comerciales como los kits basados en el uso de la enzima taq polimerasa [72], con el fin de reconocer las cepas desconocidas. “La identificación molecular de un hongo filamentoso es un trabajo arduo debido a que la técnica requiere extracción de ADN para evaluar la composición de la pared celular constituida por proteínas, glicoproteínas, lípidos e iones para una correcta clasificación” [72].

Inicialmente se realiza un ensayo en cadena de la polimerasa (PCR) con el fin de ampliar un fragmento del ADN, de la muestra a analizar, en el caso de los hongos se suele ampliar regiones bien conservadas como los genes ribosomales, o el gen de la β -Tubulina, esto con el fin de obtener la secuencia de la región, para posteriormente compararla con una base de datos.

4.2.2 Morfología

Tabla 25.

Taxonomía del género Aspergillus.

Subgénero	Sección	Especie
<i>Aspergillus</i>	<i>Aspergillus</i>	<i>A. glaucus</i>
	<i>Restricti</i>	<i>A. restrictus</i>
<i>Fumigati</i>	<i>Fumigati</i>	<i>A. fumigatus</i>
	<i>Cervini</i>	<i>A. cervinus</i>
<i>Ornati</i>		<i>A. ornatulus</i>
<i>Clavati</i>	<i>Clavati</i>	<i>A. clavatus</i>
<i>Nidulantes</i>	<i>Nidulantes</i>	<i>A. nidulans</i>
	<i>Versicolores</i>	<i>A. versicolor</i>
	<i>Usti</i>	<i>A. ustus</i>
	<i>Terrei</i>	<i>A. terreus</i>
	<i>Flavipedes</i>	<i>A. flavipes</i>
<i>Circundati</i>	<i>Wentii</i>	<i>A. wentii</i>
	<i>Flavi</i>	<i>A. flavus</i>
	<i>Nigri</i>	<i>A. niger</i>
	<i>Circundati</i>	<i>A. ochraceus</i>
	<i>Candidi</i>	<i>A. candidus</i>
	<i>Cremeri</i>	<i>A. cremerus</i>
	<i>Sparsi</i>	<i>A. sparsus</i>

Nota: Esta tabla muestra la clasificación taxonómica actual del género *Aspergillus*. Tomado de Taxonomía e identificación de especies implicadas en la aspergilosis nosocomial

4.2.2. I. *Aspergillus*: Según Francesc Accensi i Alemany, el *Aspergillus* es un hongo mitospórico, perteneciente a la familia *Trichocomaceae*, del orden de los *Eurotiales* incluidos al phylum *Ascomycota*. Se caracteriza por la producción de hifas especializadas (conidióforos) donde se forman las esporas asexuales o conidios, dichos conidióforos cuentan con un vesícula, estipe y célula pie [73]. Los *Aspergillus* pueden dividirse entre los uniseriados y los biseriados. En este género todas las capas de la pared celular están implicadas en la formación de los conidios, que al madurar se liberan de la célula.

4.2.2. II. *Aspergillus niger*: Es una sección compleja de identificar dado que las diferencias entre los distintos taxones son mínimas, aquí se agrupan especies negras con características similares

en cuanto al tamaño y color la de colonia, presencia o ausencia de métula, tamaño, forma y ornamentación de conidios [73].

4.2.2. III. *Aspergillus niger*: “Es un hongo filamentoso aeróbico, que puede crecer sobre materia orgánica en un rango de temperatura de 6 a 47°C siendo de 35 a 37°C la temperatura óptima, con una actividad de agua de 0.77 a 0.88 para su crecimiento y un rango de pH de 1.4 a 9.8” [74]. Este hongo requiere de sustratos ricos en carbohidratos, para su adecuado crecimiento, debido a esto es muy común encontrarlos en frutos secos, semillas oleaginosas, cereales y productos cárnicos.

- En su caracterización macroscópica presenta colonias de color negro o marrón oscuro, su reverso es incoloro a amarillo, es denso granular a algodonoso [75].
- Para las características microscópicas este cuenta con “cabezas conidiales biseriadas y radiales, estipes de paredes gruesas, lisos, hialinos, amarillentos o de color marrón pálido cerca de la vesícula. Vesícula casi esférica, métulas ocupando toda la superficie de la vesícula. Conidios globosos de color marrón, normalmente muy rugosos con crestas irregulares y protuberancias” [75].

Tabla 26.

Diámetro de colonias y dimensiones de las estructuras de la especie Aspergillus niger.

Característica	
Diámetro de colonia (mm)	50-70
Estipe (longitud, μm)	400-3000
Vesícula (anchura, μm)	30-75
Métulas (μm)	12-20E-06
Fiálides (μm)	7-10E-04
Conidios (μm)	3.5-4.5

Nota: Esta tabla muestra la clasificación las dimensiones del *Aspergillus niger*. Tomado de Taxonomía e identificación de especies implicadas en la aspergilosis nosocomial

La especie *Aspergillus niger* es comúnmente un agregado, que está conformado por el *A. phoenicis* y *A. niger*, este último cuenta con dos tipos bien identificados el *A. niger* y el *A. tubingensis*.

4.3 Remoción de metales pesados

4.3.1 Remoción de metales pesados por parte del *Aspergillus niger* vs otros microorganismos

Con el fin de identificar las ventajas que presenta el *Aspergillus niger* frente a otros microorganismos, se realiza una comparación donde se evidencia la tolerancia, y su capacidad de crecimiento en medios contaminados por diferentes metales pesados, al igual que su capacidad de biorremediación, convirtiéndolo en un microorganismo de interés en la elaboración de un bioadsorbente para la disminución de la contaminación de los efluentes industriales.

4.3.1.1 Índice de tolerancia (IT) y Concentración mínima inhibitoria (CMI)

Los autores A. Villalba y G. Azuara [50], establecieron rangos de índice de tolerancia y concentraciones para diferentes metales con hasta 120 horas de incubación de la cepa de *Aspergillus niger* a una temperatura de 28°C y basándose en otros autores se realizó una comparación de la cepa de interés con otros microorganismos. Los datos se evidencian a continuación.

Frente a la remoción de cadmio, con una concentración de 1 mM del metal, mencionan que el *Aspergillus niger* logro una tolerancia moderada frente a este metal, al igual que el *Penicillium sp*, los cuales están en un rango de tolerancia entre 0.55 a 0.62, mientras que otros hongos filamentosos como la *Alternaria alternata* se encuentra en 0.13, la especie *Fusarium* inhiben su crecimiento total en la presencia de este metal incluso en esta concentración y finalmente a una concentración de 0.1 a 0.2 mM se inhibió el crecimiento de *Schizophyllum commune*.

En cuanto al plomo el *Aspergillus niger* presenta un amplio rango de tolerancia ya que resiste concentraciones mayores a 20 mM oscilando entre 0.12 a 1.45, también se reportó un efecto similar para la *Alternaria alternata* y para el *Fusarium oxysporium* debido a que crecen fácilmente sobre este metal, respecto a la concentración mínima inhibitoria el *Penicillium sp* presenta un rango de 0.75 a 25 mM, *Fusarium sp* 12.5 a 15 mM y *Aspergillus niger* de 20 a 30 mM

Para el caso del mercurio a una concentración de 1 y 5 mM se evidenció que el *Aspergillus niger* tuvo gran tolerancia ya que presenta un rango entre 0.82 y 1.03, para el *Aspergillus flavus* a una concentración de 25 mg/L se identificó una tolerancia de 0.807.

En lo referente a la plata a concentraciones entre 1 a 5 mM *Aspergillus niger* cuenta con una tolerancia entre 0.72 a 2.03, y a concentraciones más altas se da la inhibición de la cepa, se ha demostrado que el *Fusarium oxysporium* es capaz de reducir los iones de plata en una solución formando una suspensión estable, sin embargo no se han encontrado gran variedad de microorganismos resistente a este metal.

A lo que corresponde al cobre se manifestó que a concentraciones entre 1 a 5 mM *Aspergillus niger* tiene un índice de tolerancia de 0.77 a 1.18, para las cepas como el *Penicillium sp* y *Fusarium sp* se indicaron valores similares 0.79 a 0.98 y 0.91 respectivamente.

Aspergillus niger al entrar en contacto con el zinc presenta una reducción en los índices de tolerancia dando valores entre 0.87 a 0.55 al incrementar la concentración del metal de 1 a 20 mM. Por otro lado existen especies que toleran concentraciones mayores a 20 mM como la *Pichia anomala*, *Candida krusei*, *Cryptococcus laurentii* y *P. atramentosum* que empieza a disminuir su crecimiento a los 40 mM

Finalmente para el cromo el *Aspergillus niger* presenta grandes niveles de tolerancia los cuales se encuentran en rangos de 1.27 a 1.90 a diferentes concentraciones he incluso mayor a 20 mM. En lo que concierne al *Penicillium sp* presenta inhibición a los 20 a 25 mM al igual que el *Fusarium*.

En la tesis presentada por C. Aymara [9], se reportan la CMI para 4 cepas diferentes en 4 metales ecotóxicos distintos, los resultados se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla 27.*CMI de diferentes microorganismos para 4 tóxicos.*

Cepa	Metal	CMI (ppm)
<i>Aspergillus niger</i>	Pb	5000
	Cr	500
	B	5000
	Fe	5000
<i>Pseudocamarosporium sp</i>	Pb	1000
	Cr	2000
	B	2000
	Fe	500
<i>Penicillium sp</i>	Pb	1000
	Cr	500
	B	1000
	Fe	500
<i>Alternaria sp</i>	Pb	1000
	Cr	500
	B	1000
	Fe	500

Nota: esta tabla muestra la CIM para las cepas de *Aspergillus niger*, *Pseudocamarosporium s*, *Penicillium sp* y *Alternaria sp* frente a cuatro metales ecotóxicos. Tomado de biorremoción de metales ecotóxicos mediante cepas fúngicas nativas aisladas de efluentes industriales en un sistema de biorreactores en serie de agitación continúa.

De esta información se infiere que la cepa de *Aspergillus niger* microorganismo de interés posee gran tolerancia ante los metales ecotóxicos frente a otras cepas fúngicas de los *Ascomycetos*.

Para la remoción de Cr (VI) y Cr (III), en el artículo de los autores S. Gómez, D. Amaya, C. Maldonado, M. Martínez, B. Quevedo, A. Soto y A. Pedroza, se realizó una comparación de la capacidad de remoción de 4 cepas tales como: *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus* y *Aspergillus niger*, donde se obtuvieron resultados a 25°C y 8 días de incubación con concentración mínima inhibitoria de 7500, 300, 4500 y 1000 en mg/L respectivamente para Cr (VI), en el caso del Cr (III) se reportaron 30000, 15000, 12000 y 5000 en mg/L respectivamente [76].

Tabla 28.

Tabla resumen para CMI e IT de diferentes microorganismos para diferentes metales.

Metal	Microorganismo	Autor
Cd	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018) C. Aymara (2018)
	<i>Penicillium sp</i>	
	<i>Alternaria alternata</i>	
	<i>Fusarium</i>	
	<i>Schizophyllum commune</i>	
Pb	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018) C. Aymara (2018)
	<i>Alternaria alternata</i>	
	<i>Fusarium oxysporium</i>	
	<i>Penicillium sp</i>	
	<i>Fusarium sp</i>	
Hg	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018)
	<i>Aspergillus flavus</i>	
Ag	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018)
	<i>Fusarium oxysporium</i>	
Cu	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018)
	<i>Penicillium sp</i>	
	<i>Fusarium sp</i>	
Zn	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018)
	<i>Pichia anomala</i>	
	<i>Candida krusei</i>	
	<i>Cryptococcus laurentii</i>	
	<i>P. atramentosum</i>	
B	<i>Aspergillus niger</i>	C. Aymara (2018)
	<i>Penicillium sp</i>	
	<i>Alternaria sp</i>	
	<i>Pseudocamarosporium sp</i>	
Cr	<i>Aspergillus niger</i>	A. Villalba y G. Azuara (2018) C. Aymara (2018) N. Gómez y T. Sánchez (2020) S. Gómez, D. Amaya, C. Maldonado, M. Martínez, B. Quevedo, A. Soto y A. Pedroza (2008)
	<i>Penicillium sp</i>	
	<i>Fusarium</i>	
	<i>Pseudocamarosporium sp</i>	
	<i>Phanerochaete</i>	
	<i>chryso sporium</i>	
	<i>Trametes versicolor</i>	
<i>Pleurotus ostreatus</i>		

Nota: esta tabla muestra la CIM y el IT para las diferentes cepas encontradas a lo largo del análisis bibliográfico para diferentes metales ecotóxicos, es una recopilación de los trabajos presentados por los autores A. Villalba, G. Azuara y C. Aymara.

4.3.1. II. Remoción

N. Gómez y T. Sánchez en el estudio de la eficiencia que tienen los hongos ligninolíticos para la biodegradación y adsorción de metales pesados, se evidencia que el *Aspergillus niger* cuenta con la capacidad de remover Pb, Cr, B y Fe en 93.92, 96.98, 27.8 y 85.93% a diferencia de la cepa de *Phanerochaete chrysosporium* donde los porcentajes de remoción solo fueron evidentes para el Pb con 57%, Cd con 74% y Ni con 98%, para la *Pleurotus ostreatus* se obtuvo porcentajes de remoción de 97.45% para Pb y 59.98% para el Cr, la cepa de *Pycnoporus sanguineus* removió únicamente el Pb en un 99.89% y finalmente *Penicillium citrinum* el Cr (VI) en un 79.8%. De estos datos se infiere que el *Aspergillus niger* remueve mayor cantidad de metales con porcentajes significativos a diferencia de las otras cepas fúngicas estudiadas [77].

El Cr (VI) es uno de los metales con mayor capacidad de ser removido por el *Aspergillus niger* ya que se evidencia grandes eficiencias al transformarlo de Cr (VI) a Cr (III) en los procesos de biorremediación, pero cabe destacar que el *Penicillium chrysogenum* también presenta buena eficiencia con respecto al Cr y otros metales en los cuales se encuentran Cd, Cu, Pb, Zn y Mn con porcentajes de 25, 74, 59, 24, 55 y 57% respectivamente valores reportados por X. Deng, L. Chai, Z. Yang, C. Tang, Y. Wang, e Y. Shi [78]. Otras cepas con buenos porcentajes se reportan por los autores L. Chapañan e Y. Medina son la *Paecilomyces sp* que cuenta con un porcentaje de remoción a 120 horas del 88.24%, el *Penicillium sp* con 86.91% y el *Fusarium sp* con 85.86% [79].

Tabla 29.

Tabla resumen para % de remoción en diferentes microorganismos para diferentes metales.

	Cr	Pb	Cd	B	Fe	Ni	Cu	Zn	Mn
<i>Aspergillus niger</i>	96.98%	93.92%	96,2%	27.8%	85.93%	70,9%	73,5%	60,9%	61,5%
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	-	57%	74%	-	-	98%	-	-	-
<i>Pleurotus ostreatus</i>	59.98%	97.45%	-	-	-	-	-	-	-
<i>Pycnoporus sanguíneus</i>	-	99.89%	-	-	-	-	-	-	-
<i>Penicillium citrinum</i>	79.8%.	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Penicillium chrysogenum</i>	25%	24%	74%	-	-	-	59%	55%	57%
<i>Paecilomyces sp</i>	88.24%	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Penicillium sp</i>	86.91%	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Fusarium sp</i>	85.86%	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota: esta tabla muestra el % de remoción para las diferentes cepas encontradas a lo largo del análisis bibliográfico de diferentes metales ecotóxicos, es un recopilación de los trabajos presentados por los autores N. Gómez y T. Sánchez (2020), X. Deng, L. Chai, Z. Yang, C. Tang, Y. Wang e Y. Shi (2012), L. Chapoñan e Y. Medina (2016), C. Villaveces (2019).

4.3.2 Remoción por *Aspergillus niger*

4.3.2. I. Índice de tolerancia (IT) y Concentración mínima inhibitoria (CMI)

Se ha evidenciado en diferentes estudios que el *Aspergillus niger* es un eficiente bioadsorbente de metales pesados ya que en presencia de algunos de estos el crecimiento del microorganismo no presenta inhibición como lo citado por los autores A. Villalba y G. Azuara. Donde se identificó el comportamiento del *Aspergillus niger* en un medio de cultivo con presencia de diferentes sales metálicas. Entre los metales evaluados se encuentra el Cr, Pb, Zn, Cd, Ag, Hg y Cu.

En este estudio se utiliza como medio de cultivo un agar papa dextrosa, y el microorganismo es aislado del suelo minero, posteriormente se toma la muestra y se realizan disoluciones a varias concentraciones con agua destilada para preparar la suspensión de esporas y su conteo mediante una cámara Neubauer. Finalmente se realizó la determinación del índice de tolerancia para las diferentes concentraciones de las sales metálicas, mediante la relación del radio del micelio tratado con metal y el radio del micelio sin metal [50].

De esto se obtuvo como resultado una caracterización macroscópica y microscópica típica del *Aspergillus niger* y los índices de tolerancia frente a cada metal de estudio, evidenciado en la siguiente tabla.

Tabla 30.

CMI e índice de tolerancia del Aspergillus niger frente a metales tóxicos.

Metal	CMI (mM)	Índice de tolerancia
Hg	5	0.82±0.03
Ag	5	2.03±0.32
Cu	5	1.18±0.38
Cd	15	0.61±0.09
Zn	≥20	0.55±0.01
Cr	≥20	1.30±0.05
Pb	≥20	0.71±0.12

Nota: Esta tabla muestra la CIM y el índice de tolerancia que presenta la especie *Aspergillus niger* frente a una concentración de determinado metal. Tomado de Aislamiento e identificación de *Aspergillus niger* y evaluación de su tolerancia a metales tóxicos.

A partir de los datos se identifica que el *Aspergillus niger* cuenta con gran potencial para la biorremediación de metales pesados especialmente del Zn, Cr y Pb, dado que a una concentración de 20 mM el crecimiento del hongo no se inhibía si no por el contrario presentaba un buen crecimiento, se debe tener en cuenta que la tolerancia depende de factores como lo son la temperatura, pH, concentración de biomasa y del ion metálico, tiempo de crecimiento y fuente de sustrato.

4.3.2. II. Remoción

En la tesis presentada por C. Aymara se realiza un estudio donde se establece la mejor cepa fúngica entre cuatro aislada para la biorremoción de metales ecotóxicos, de las cuales se selecciona la de *Aspergillus niger* por su capacidad de crecimiento en un medio contaminado frente a las otras [9].

La prueba se llevó acabo en un sistema en serie de cuatro recipientes en donde se encontraba un medio de cultivo líquido y la solución de metales en agitación continua, del cual se utilizó una muestra de la biomasa fúngica obtenida a la salida del sistema después de 11 días y se reportaron los siguientes porcentajes y capacidad de biorremoción del *Aspergillus niger* frente a diferentes iones metálicos (Tabla 17).

Tabla 31.

Porcentaje y capacidad de biorremoción del Aspergillus niger.

Metal	C₀ (ppm)	C_f (ppm)	%	Capacidad
Pb	200	12.17±0.61	93.92	92.82±4.9
Cr	100	3.02±2.17	96.98	48.45±2.9
B	300	216.73±0.49	27.8	41.13±11.9
Fe	200	28.13±2.68	85.93	85.8±2.9

Nota: Esta tabla muestra el porcentaje de remoción de la cepa frente a 4 diferentes metales ecotóxicos. Tomado de biorremoción de metales ecotóxicos mediante cepas fúngicas nativas aisladas de efluentes industriales en un sistema de biorreactores en serie de agitación continúa.

Se evidencia que el *Aspergillus niger* tiene gran capacidad de biorremediación de diferentes iones metálicos y es este caso particular el cromo, el plomo, el boro y el hierro siendo el cromo el que mayor porcentaje de remoción y el boro el de menor capacidad.

Por otro lado en el trabajo de investigación de N. Gómez y T. Sánchez, se registraron los valores de remoción de un efluente industrial con una concentración de iones metálicos en total del 66.4 mg/L, donde para el Pb (93.91%), Cr (99.83%), B (47.29%) y Fe (96.34%). También se reportaron valores para el tratamiento en solución metálica a una concentración total de 100 mg/L para los mismos metales en 93.92, 96.98, 27.8 y 85.93% respectivamente [77].

En el artículo de C. Villaveces, se realizó una investigación sobre los microorganismos con gran potencial en la biorremoción de metales pesados, donde el *Aspergillus niger* posee una gran eficiencia con diferentes metales, en donde el Cr (VI) fue el metal con mayor porcentaje (100%) de remoción, teniendo en cuenta un pH de 5.3 a 6.2, concentración del metal 50 mg/L a 28°C, con agitación de 100 rpm durante 6 días. También se enuncia que la cepa es capaz de remover el Cr (III) con una eficiencia del 88% a un pH 5.1 y a temperatura de 30°C. Igualmente se reportan porcentajes de remoción para Cd (II), Pb (II), Fe (III), Cu (II), Ni (II), Zn (II), Mn (II) de 96.2, 90, 90, 73.5, 70.9, 60.9 y 61.5% respectivamente [80].

Con respecto a la capacidad de biorremediación del Ni (II) a través de la cepa de *Aspergillus niger* en el artículo presentado por G. Duca, C. Nuñez, A. Navarro y M. Rubio se realizó un estudio con un inóculo proveniente de una solución de conidios en un medio de cultivo con nitrato de sodio, fosfato dipotásico, sulfato de magnesio, agua, cloruro de potasio y glucosa, la remoción se evaluó en una solución con 50 mg/L de cloruro de níquel, controlando temperatura, pH, tiempo de incubación y concentraciones del ion entre 1.5 y 3 mg/L. Finalmente por medio de una Espectroscopia de Absorción Atómica Llama se determinó la concentración final del níquel.

En los resultados obtenidos se evidencia que el rango en el que se trabajó la concentración del níquel no provocó inhibición de la cepa, además se estableció que es el pH óptimo para la biorremoción es de 4.5 obteniendo la mayor eficiencia de remoción con un porcentaje del 60 a 73%, también se realizó un ensayo para identificar la posible ubicación final del metal en la cepa y se concluyó que un 57.8% se encontraba en el interior celular y el restante en la pared celular [81].

Para la remoción del arsénico en el trabajo por los autores E. Domínguez, J. Vargas, J. Cárdenas e I. Acosta, se realizó un análisis de la capacidad de disminuir la concentración de este metal mediante una cepa de *Aspergillus niger* por el método de espectrofotometría de absorción atómica por generación de hidruros, que al igual que en los anteriores estudios se tienen en cuenta condiciones como temperatura, pH, concentración tanto de biomasa como del ion metálico y tiempo de incubación, la cepa creció en un caldo Sabouraud dextrosa. En el artículo se llevó a cabo una comparación entre biomasa nativa y biomasa modificada con óxido de hierro, siendo esta última la que presentó mayores porcentajes de remoción a un pH cercano al neutro, pero manteniéndose en medio ácido [82].

A pesar de que se obtienen buenos resultados en la remoción del metal, se debe tener en cuenta que esto solo se presentó al momento de realizar la modificación a la cepa, lo cual es una desventaja frente a otros metales como los mencionados anteriormente.

4.3.3 Remoción de Cr (VI) por *Aspergillus niger*

El Cromo al ser un metal pesado, se encuentra en la naturaleza en forma de compuestos que posteriormente se somete a un proceso de reducción del óxido de cromo con aluminio para obtenerlo en su forma pura, este metal es catalogado como uno de los elementos de la

modernidad por sus propiedades en la industria como en la metalurgia, galvanoplastia, curtiembres, textiles y como biosida en el agua de enfriamiento de las centrales eléctricas. Este metal presenta estados de oxidación de $+2$, $+3$, $+4$, $+5$ y $+6$, siendo este último el más tóxico y contaminante encontrándose especialmente en los efluentes dado el vertimiento de las industrias en los cuerpos de agua, sobrepasando los límites máximos de concentración.

A partir de los estudios reportados en la bibliografía, se evidencia que el *Aspergillus niger* posee una gran capacidad de biotransformación de Cr (VI) a Cr (III), este último es menos tóxico que solo llega a causar problemas en altas concentraciones en las plantas, sin embargo este ion también puede ser sometido a un proceso de biorremediación mediante la misma cepa, por ende se elige el Cr (VI) como metal de interés.

4.3.3. I. Remoción por medio biótico

La remoción de cromo hexavalente, en el artículo de los autores E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Acosta, se utiliza el *Aspergillus niger* como un bioadsorbente mediante el método calorimétrico de la Difenilcarbazida, en el cual se utiliza como medio de sustrato la glucosa y como fuente de carbono el azúcar o glicerol. La cepa que fue aislada de una zona contaminada y se mantuvo en un medio mínimo de Lee modificado, posteriormente se incubaron las esporas en el medio de cultivo junto con una concentración del metal, realizando el experimento por triplicado para determinar la concentración final del Cr (VI) y Cr (III), mediante métodos espectrofotométricos de la Difenilcarbazida y Chromazurol S respectivamente. El Cr total se determinó mediante Espectrofotometría de absorción atómica [53].

En la Tabla 18 se evidencian los resultados del análisis de reducción llevados a cabo en un medio de Lee modificado con 50 mg/L de Cr (VI) a 100 rpm con una temperatura de 28°C y un pH 6.2, donde se realizó una comparación por 3 métodos de identificación de la concentración del metal presente transcurrido el séptimo día.

Tabla 32.

Capacidad de reducción de Cr (VI) por la cepa de Aspergillus niger a 28°C y pH 6.

Metal (mg/L)		Día 1	Día 7
Cr (VI)	Difenilcarbazida	50	0
Cr (III)	Chromazurol S	0	49.6
Cr Total	Espectrofotometría de absorción atómica	50	49.8

Nota: Esta tabla muestra la concentración final luego de la biorremoción del Cr (VI) por *Aspergillus niger*. Tomado de Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de *Aspergillus niger* Resistente a Cromato.

Los resultados obtenidos tienen una gran dependencia de variables como el pH, la concentración de biomasa, la concentración del ion y la fuente de carbono fermentable jugando un papel importante para la remoción del metal. Ahora debido a que el Cr (VI) se reduce a Cr (III), el cual es menos tóxico ya sea para el medio ambiente o para los seres vivos contribuye a la disminución en la contaminación, sin embargo no se produce un cambio significativo en los niveles totales de Cr.

En el artículo de los autores I. Acosta, A. Bravo, V. Martínez, J. Cárdenas y M. Moctezuma, se realizó un trabajo similar al artículo anterior utilizando la Difenilcarbazida, en el cual se evaluó el porcentaje de remoción del Cr (VI) mediante la cepa de *Aspergillus niger* a diferentes temperaturas, pH, velocidades de agitación, concentración de biomasa y concentración de del ion metálico, donde se obtuvo resultados de remoción eficientes a 60°C temperatura a la cual no se tiene en cuenta la concentración del ion metálico y el tiempo de remoción fue mucho menor, comparado con la remoción a 28°C donde dependiendo la cantidad del ion metálico el tiempo aumentaba. En ambas condiciones se logra obtener un 100% de remoción del metal pesado [54].

4.3.3. II. Remoción por medio abiótico

Se realizó un estudio utilizando biomasa muerta de *Aspergillus niger* para la eliminación de cromo hexavalente, en el artículo elaborado por D. Park, Y. Yun, J.H. Jo, y J. Park, inicialmente se cuenta con un microorganismo en un medio de cultivo de extracto de malta, glucosa y peptona, después de su incubación pasa a un autoclave a altas temperaturas transformándolo en

biomasa no viable, posteriormente se lavó y se secó a temperatura ambiente para finalmente almacenarlo en un desecador.

Tabla 33.

Capacidad de reducción de Cr (VI) por la cepa de Aspergillus niger muerta a pH 2.

Metal (mg/L)		0 h	158 h
Cr (VI)		50	0
Cr (III)	Espectrofotometría de absorción atómica	0	37
Cr Eliminado		50	13

Nota: Esta tabla muestra la concentración final luego de la biorremoción del Cr (VI) por biomasa de *Aspergillus niger* abiótica. Tomado de Mechanism of hexavalent chromium removal by dead fungal biomass of *Aspergillus niger*.

La remoción del Cr (VI) se llevó a cabo en un sistema discontinuo teniendo en cuenta la concentración del metal y la biomasa, tiempo, pH y temperatura y luego del proceso de desorción se emplea la Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X para la cuantificación del cromo total y su estado de oxidación, en donde se evidenció que el Cr (VI) empieza a desaparecer, mientras que por otro lado el Cr (III) que no estaba presente se comienza a formar esto sucede a un pH de 2.00 durante 158 h, partiendo de una concentración inicial del Cr (VI) de 50 mg/L y después del proceso se obtiene una concentración de 37 mg/L de Cr (III) y los 13 mg/L restante fueron eliminados [83].

En lo referente a la biosorción de cromo hexavalente mediante biomasa muerta *Aspergillus niger*, los autores Y. Khambhaty, K. Mody, S. Basha y B. Jha, en su artículo establecen los coeficientes de velocidad cinética y el equilibrio de biosorción mediante isoterma. En la preparación de la biomasa muerta se utiliza como medio de cultivo papa hervida, triturada y dextrosa y luego días después de su incubación los hongos son sacrificados y finalmente pulverizados, con esto se logró determinar el volumen del poro, el área superficial y el tamaño del poro de la biomasa mediante diferentes métodos que arrojaban valores similares, en la Tabla 34 se evidencian las características de la biomasa muerta utilizada en el estudio.

Tabla 34.*Características del Aspergillus niger en estado abiótico.*

Parámetros	
Área superficial	
• Área de superficie de un solo punto (m^2g^{-1})	3.4037
• Área superficial BET(m^2g^{-1})	3.9506 ± 0.03705
Volumen de poro	
• Volumen total de poros de adsorción de un solo punto(cm^3g^{-1})	0.005713
Tamaño de poro	
• Diámetro de poro medio de adsorción ($4V/A$ por punto único) (UN)	54.8417

Nota: Esta tabla muestra las características del *Aspergillus niger*, una vez se realiza el proceso de pulverización. Tomado de Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*.

A diferentes temperaturas, pH, tiempo y concentraciones de la biomasa y el ion, se determinó el cambio de la concentración del Cr (VI) en el proceso de sorción, a través de calorimetría por un espectrofotómetro Shimadzu, la expresión de velocidad que más se ajustó a los valores obtenidos en el estudio en donde se evaluaron 8 modelos, fue el de pseudo segundo orden dado que el coeficiente de correlación es decir r^2 presento un valor de 0.99, con un error estándar <1. Finalmente el modelo de equilibrio entre la fase adsorbida y la acuosa que dio un mejor ajuste experimental fue Langmuir (Tabla 35), este comportamiento se exhibe a temperaturas de 37°C a 50°C con valores de r^2 de 0.960 y 1.0 respectivamente, de esto se concluye que el *Aspergillus niger* posee un gran potencial de biorremediación al contar con una superficie homogénea, donde cada sitio de unión permite la entrada de una sola molécula del ion metálico, siendo sitios energicamente equivalentes y sin interacción entre las moléculas ya sorbidas, presentando gran eficiencia para tratar soluciones acuosas que contienen dicho metal, que se mejora al incrementar la temperatura porque aumenta la frecuencia de colisión entre el sorbato y la superficie del sorbente [84].

Tabla 35.

Parámetros de sorción de Cr (VI) mediante el modelo de Langmuir.

Parámetro de Langmuir	Temperatura (°C)		
	22	37	50
r ²	0.780	0.960	1.0
Error residual	8.263	0.254	0.002
Error estándar	0.866	0.152	0.016
Capacidad máxima de sorción (mg g ⁻¹)	54.348	74.074	117.647
Constante de enlace de equilibrio (l mg ⁻¹)	0.015	0.138	0.368
Factor de separación	0.302	0.059	0.024

Nota: Esta tabla muestra los parámetros para la adsorción de Cr (VI) por biomasa muerta del *Aspergillus niger* utilizando el modelo de Langmuir a diferentes temperaturas. Tomado de Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*.

En lo relacionado con la recuperación del bioadsorbente y el metal se deben tener en cuenta varios factores, entre ellos el costo de la biomasa utilizada y su transporte y por otro lado si el ion metálico a recuperar es valioso. En el caso de contar con una biomasa fácil de adquirir, con costos de preparación mínimos y un metal sin interés económico, una vez que la biomasa este saturada del ion metálico se puede realizar un proceso de incineración y precipitación del metal o de exposición a ácidos o bases fuertes según sea el caso, se debe tener en cuenta que estas técnicas son costosas al momento de eliminar los lodos generados. Para el caso en el que se cuente con un metal valioso o no se quiera comprometer la integridad del bioadsorbente manteniéndolo funcional, al momento de la recuperación se puede utilizar reactivos químicos suaves para retirar los metales de los sitios, permitiendo un uso posterior. Sin embargo se requiere profundización en la investigación en cuanto a la regeneración del sorbente y recuperación del metal adsorbido [85].

4.3.4 Remoción de Cr (VI) por pulpa de café

Para identificar las características óptimas para la remoción del Cr (VI), mediante la pulpa de café, los autores D, Gómez, J. Rodríguez, J. Muñoz y J. Betancur, recolectaron pulpa de café variedad castilla y plátano pseudotallo, los cuales se secaron a 60°C y se trituraron hasta obtener un tamaño de 0.180 mm. Posteriormente se realizó un análisis Bromatológico, Contenido celulítico y Espectro infrarrojo para determinar las condiciones de la materia antes de la remoción, por otro lado se realizó la cuantificación de Cr (VI) del agua residual sintética mediante Espectrofotometría de absorción atómica y método de llama directa aire acetileno.

Se determinó que para una remoción eficiente de Cr (VI), se requiere de un pH ácido de 2.0 lo cual se debe a que la superficie de la pulpa presenta una mayor cantidad de sitios activos negativos que se unen fácilmente a los iones positivos del metal permitiendo la absorción, se debe tener en cuenta que pH pzc de la superficie de la pulpa es de 3.5, razón por la cual entre más negativo se encuentre el medio mayor es la remoción, en cuanto al tiempo se determinó que eran necesarios 105 min para alcanzar un buen porcentaje de eliminación, a este tiempo se llega al equilibrio entre el metal y los grupos funcionales de la superficie de la pulpa de café. Por otro lado se realizó la lectura del espectro infrarrojo para analizar las bandas de adsorción asociadas a los grupos funcionales que pueden intervenir en la adsorción de Cr (VI), este estudio identificó que las bandas más anchas correspondían a los grupos hidroxilos (OH), compuestos alquilo (CH) y grupos carbonilos (C=O), los cuales se encuentran presentes en la ligninas, celulosa y pectina de este residuo

La pulpa de café al igual que el *Aspergillus niger* se ajustan a un modelo cinético de pseudo segundo orden con un coeficiente de determinación R^2 de 0.9968 y como modelo de linealización el de Langmuir, los parámetros se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 36.

Datos de sorción de Cr (VI) mediante el modelo de Langmuir.

Parámetro de Langmuir	
R2	0.9869
Capacidad máxima de sorción (mg g ⁻¹)	13.48
Factor de separación	0.12-0.77

Nota: Esta tabla muestra los parámetros para la adsorción de Cr (VI) por biomasa residual (pulpa de café) utilizando el modelo de Langmuir. Tomado de Coffee Pulp: A Sustainable Alternative Removal of Cr (VI) in Wastewaters.

Finalmente al realizar la remoción utilizando la pulpa de café y el plátano se logró una remoción del 59.13% usando proporción 1:1 y a medida en que disminuye la proporción de plátano el porcentaje de remoción desciende mínimamente [86].

Partiendo de la información recolectada para la remoción de metales pesados se infiere que el *Aspergillus niger* presenta gran capacidad para el crecimiento sobre fuentes contaminadas, debido a su amplio rango en el índice de tolerancia y su concentración mínima inhibitoria, posicionándolo sobre otras especies fúngicas, además de que presenta una amplia gama de metales sobre los que puede actuar como lo son el Pb, Cd, Hg, Ag, Cu, Fe, Zn, Mn, Ni, As, Th y Cr. Por otro lado cabe resaltar que especies como: *Penicillium sp*, *Alternaria alternata*, *Fusarium oxysporium*, *Aspergillus flavus*, *Pichia anomala*, *Candida krusei*, *Cryptococcus laurentii* y *P. atramentosum* también poseen la capacidad de tolerar y remover diferentes metales pesados, sin embargo la mayoría son específicos para un solo tipo de ion metálico ya que pueden inhibirse en presencia de los otros.

A nivel de remoción, no se puede hablar de una eliminación del metal, si no de la capacidad que poseen estos microorganismos en la biorremediación, ya sea mediante la biosorción inmovilizando el ion en la pared celular, bioacumulación cuando dichos iones son retirados del medio e introducidos al interior de la membrana celular donde serán utilizados en procesos metabólicos o la biotransformación reduciendo su estado de oxidación. Muchos de estos microorganismos tienen altos porcentajes de remoción siguiendo alguno de los procesos anteriores, el cual se determina según el metal y las condiciones del medio. Para el caso

específico del *Aspergillus niger* en la remoción de Cr (VI), este realiza biotransformación reduciéndolo a Cr (III) casi al 100%, también se resalta un gran porcentaje en cepas como: *Pseudocamarosporium sp*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Pleurotus ostreatus*, *Penicillium citrinum*, *Paecilomyces sp*, *Penicillium sp* y *Fusarium sp* con valores que oscilan entre 70 a 90%.

Identificando las ventajas del *Aspergillus niger* como su estructura interna dado que posee macroporos que facilitan el intercambio iónico al interior del microorganismo, disminuyendo la concentración del metal de interés, llevan a emplearlo en estado biótico o abiótico como bioadsorbente del Cr (VI) que es el metal de estudio. Ya sea en estado biótico o abiótico se evidencia un porcentaje de remoción alto del casi el 100% siendo los dos efectivos, a pesar de esto se debe tener en cuenta que el medio biótico al contar con células vivas se ve limitado por los aspectos fisiológicos como efectos tóxicos por las grandes concentraciones del metal, las condiciones del medio en el que se usa y los nutrientes requeridos desventajas que no posee el proceso abiótico.

Al hablar de la pulpa de café encontramos grandes propiedades porque además de ser un buen sustrato por su contenido de proteínas y carbohidratos que ayudan al crecimiento de los hongos también es muy útil a la hora de ser utilizado como bioadsorbente ayudando a disminuir los porcentajes de contaminación presentes en los ecosistemas, siendo una opción económica eficiente y con múltiples usos, así mismo esta presenta condiciones similares a la del *Aspergillus niger* llegando a actuar como potencializador en la remoción.

4.4 Condiciones óptimas para la remoción de Cr (VI) por *Aspergillus niger*

Para el desarrollo de un bioadsorbente utilizando el *Aspergillus niger* es necesario conocer el efecto del pH, la temperatura, las concentraciones tanto del ion como de la biomasa y como se relacionan con el tiempo para obtener los mayores porcentajes de remoción del contaminante, de igual manera se debe considerar los nutrientes del medio puesto que la cepa necesita fuentes fermentables u oxidables para el crecimiento como lo son la glucosa o el glicerol.

4.4.1 Efecto del pH

Partiendo de la información bibliográfica se evidencia que el *Aspergillus niger* requiere de pH ácidos, para un eficiente funcionamiento en procesos de bioadsorción. Según lo reportado por A.

Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma, la mayor remoción de Cr (VI) con una concentración de 50 mg/L se obtiene a un pH de 1 a los 30 min [54], por otro lado E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez, concluyeron que la máxima remoción se presenta en un rango de pH de 5.3 a 6.2 al cabo de 6 días [53], también se enuncia que a una concentración de 100 mg/L del ion metálico, el pH óptimo es de 5.0 cifra registradas por J. Sandana, B. Nair y R. Puvanakrishnan [53] ([87]) Y finalmente en los valores mencionados por V. Ren, Q. Zhan, X. Zhan, L. Zhao y H. Li, a esta misma concentración el pH oscila en el rango de 2.0 a 7.0 siendo el de 2.0 la condición óptima [88].

Cuando se habla de biomasa muerta el pH del medio no es una variable muy influyente a la hora de remoción, sin embargo se recomiendan pH ácidos como lo mencionan D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park, donde la remoción a un pH de 2.0 se produjo a una mayor velocidad con respecto a los otros valores de pH en rango de 1 a 4 [83].

4.4.2 Efecto de la temperatura

Esta variable es una de las más importantes en los procesos de bioadsorción ya que de esta depende la velocidad de remoción del ion.

Para una concentración de 50 mg/L la remoción del Cr (VI) en un 100% se dio tanto a los 28°C como a los 60°C, cabe destacar que el tiempo para la segunda temperatura fue aproximadamente la mitad que para la primera, esto se identifica en el artículo de los autores A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma [54]. Por otro lado en el artículo V. Ren, Q. Zhan, X. Zhan, L. Zhao y H. Li, donde se utilizó una concentración inicial de 300 mg/L, se evidenció que la mayor remoción se dio a los 40°C [88] y finalmente en el artículo de E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez, se realizó un estudio a temperatura constante de 28°C, en donde esta variable no influye en el porcentaje de remoción sino en la velocidad del proceso [53].

Para el proceso abiótico la mayor remoción de Cr (VI) se presentó a los 50°C valor reportado por los autores Y. Khambhaty, K. Mody, S. Basha y B. Jha [84], por otro lado en el artículo de los autores D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park, se concluye que el rango de temperatura óptima es de 5°C a 45°C, al momento de reducir el Cr (VI) al Cr (III) [83].

4.4.3 Efecto de la concentración de ion metálico

En relación a lo suministrado por los autores E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez, se evidencia que al aumentar la concentración del ion en la solución disminuye la eficiencia en la remoción puesto que una variación de 50 mg/L a 200 mg/L de Cr (VI) reduce el porcentaje de eliminación de este metal del 90% a 20% respectivamente [53]. Con respecto a otros autores se encuentra relacionada la temperatura con la concentración ya que como lo citan A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma, al tener una temperatura de 60°C, la concentración del ion no influye en el proceso de remoción pero influye en el tiempo pues el proceso es más tardío, por otro lado si se trabaja con temperaturas como los 28°C, la remoción caerá si la concentración aumenta [54].

Para el caso de la biomasa muerta ocurre el proceso contrario dado que la concentración del ion no inhibe el crecimiento de la cepa, en su lugar al aumentar dicha concentración, la tasa de eliminación fue más efectiva como en lo reportado por D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park, donde en una concentración de 25 mg/L del metal se eliminó completamente de la solución a las 30 h, en el caso de 200 mg/L ocurrió el mismo proceso en un tiempo de 400 h [83].

4.4.4 Efecto de la concentración de la biomasa

Para evaluar el comportamiento de la concentración de biomasa en la remoción de Cr (VI) se realizaron diferentes pruebas, dejando constante la concentración del ion metálico en 50mg/L en donde los autores A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma, obtuvieron mayor eficiencia en la remoción al incrementar la biomasa, al suministrar 1 g de biomasa la remoción se dio a los 30 min y con 5 g de ella se dio a los 3 min [54], este mismo comportamiento se presenta en el artículo de los autores E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez, en donde al aumentar la biomasa se alcanza un mayor porcentaje de remoción en un menor tiempo.

En el caso de la biomasa muerta se identifica que esta posee el mismo comportamiento anterior, dado que al aumentar la biomasa de 5 a 20 g/L el tiempo disminuye de 192 a 33 h eliminando completamente el Cr (VI), datos reportados por D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park [83].

Tabla 37 y 38.

Tablas resumen para las condiciones que mejora la remoción de Cr (VI) en estado biótico y abiótico mediante Aspergillus niger.

Efecto	Biótica	Autor
pH	1	A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma (2015)
	5.3 a 6.2	E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez (2015)
	5	J. Sandana, B. Nair y R. Puvanakrishnan (2006)
	2	V. Ren, Q. Zhan, X. Zhan, L. Zhao y H. Li (2018)
Temperatura (°C)	28 a 60	A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma (2015)
	40	V. Ren, Q. Zhan, X. Zhan, L. Zhao y H. Li (2018)
	28	E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez (2015)
Concentración del ion	Baja	E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez (2015)
	no influye a 60°C Baja a 28°C	A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma (2015)
Concentración de la biomasa	Alta	A. Rodríguez, I. Bravo, A. Martínez. V. Cárdenas y J. Moctezuma (2015)
	Alta	E. Rivera, J. Cárdenas, V. Martínez e I. Rodríguez (2015)
Efecto	Abiótica	Autor
Ph	2	D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park (2004)
Temperatura (°C)	50	Y. Khambhaty, K. Mody, S. Basha y B. Jha (2008)
	5 a 45	D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park (2004)
Concentración del ion	No influye	D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park (2004)
Concentración de la biomasa	No influye	D. Park, Y. Sang, J. Hye y J. Park (2004)

Nota: esta tabla muestra las condiciones recopiladas para la remoción de Cr (VI) mediante la cepa de *Aspergillus niger* en estado abiótico y biótico con su respectivo autor.

En referente a lo anterior se infiere que el porcentaje de remoción está íntimamente ligado a las condiciones del medio.

En el caso del pH el rango de trabajo se encuentra de 1.0 a 7.0, pero la velocidad y la eficiencia utilizando biomasa viva incrementar a medida que el medio sea más ácido, dado que la superficie del bioadsorbente se protona, generando una mayor atracción hacia los aniones del cromato, aumentando la capacidad de bioadsorción al elevarse la concentración de iones H^+ , por el contrario si se alcanza la neutralidad en el medio, la concentración de los iones OH^- genera una disminución en la bioadsorción ya que la superficie del bioadsorbente cambia sus condiciones transformándose en negativa, impidiendo la atracción entre los iones.

Con respecto a la temperatura se infiere que cuando la concentración del ion metálico es alta se requiere un aumento de la temperatura para obtener un proceso de remoción eficiente y rápida, debido a que las esporas de bioadsorbente son sensibles a ella, por el lado de la biomasa muerta a medida que aumenta la temperatura se aumentan los choques entre el bioadsorbente y el adsorbato por consiguiente la velocidad de reacción aumenta y el tiempo de contacto disminuye.

Cuando hablamos de la concentración inicial del ion metálico se debe tener en cuenta el estado en el que se encuentra la biomasa, bien sea biótico o abiótico, puesto que al ser biótico esta concentración puede llegar a inhibir el crecimiento de la cepa fúngica además de que los iones dispersos en la solución entran a competir por un puesto en la superficie adsorbente, una alta concentración del metal llega a saturar las posiciones positivas reduciendo el porcentaje de eliminación del metal. Por otro lado en la biomasa abiótica, la concentración no afecta la remoción si no únicamente el tiempo del proceso, esto es debido a que no se presenta inhibición y que posee una gran área superficial y gran tamaño de poro lo que es útil para la eliminación de grandes concentraciones contaminantes.

En alusión a la concentración de biomasa se identificó que a mayores cantidades de esta el tiempo de remoción disminuye esto se explica debido a que a mayor cantidad de bioadsorbente, mayor cantidad de sitios disponibles para reaccionar con los aniones de la solución.

Tabla 39.

Condiciones para favorecer la remoción de Cr (VI) en estado biótico y abiótico mediante Aspergillus niger.

Efecto	Biótica	Abiótica
pH	(1-7) preferiblemente ácidos	1-7 preferiblemente ácidos
Temperatura	(28 -60°C) preferible a los 60°C	(5 -45°C)
Concentración del ion	A mayor concentración menor remoción	No influye
Concentración de la biomasa	A mayor biomasa menor tiempo	A mayor biomasa menor tiempo

Nota: esta tabla muestra las condiciones que mejora la remoción de Cr (VI) mediante la cepa de *Aspergillus niger* en estado abiótico y biótico encontradas a lo largo del análisis bibliográfico.

4.5 Características para la asociación entre *Aspergillus niger* y la pulpa de café

4.5.1 Tipo de fermentación

4.5.1.1. Fermentación sumergida: Mediante esta técnica se da el crecimiento del microorganismo en un medio de cultivo rico en nutrientes y condiciones fisicoquímicas controladas. Este método cuenta con diferentes ventajas como la homogeneidad del medio, control sobre las variables como temperatura, pH, agitación y aireación, al presentar una mejor distribución de oxígeno y calor en el sistema, razón por la cual es muy utilizada en la industria biotecnológica.

En un estudio donde se utilizó suero lácteo para la fermentación líquida del *Aspergillus niger*, inicialmente se cultivó el microorganismo en un agar papa dextrosa a 30°C durante 96 h, para la recolección de esporas y su conteo en una cámara Neubauer. Por otro lado el suero recolectado paso por un proceso de esterilización a 121°C durante 15 min y posteriormente se enriquece con medio Czapek-Dox, seguidamente se introducen las esporas para darle paso a la fermentación a una temperatura de 30°C, por 240 h y 150 rpm. Una vez terminado el proceso de fermentación se procede a filtrar la biomasa para determinar la cinética de los carbohidratos, la biomasa pasa por una estufa y es incubada por 48 h. El sobrenadante es filtrado a un tamaño de poro de 0.22µm que posteriormente se congelará para determinar azúcares totales, azúcares reductoras y proteínas solubles mediante las metodologías de Dubois y col, la técnica de Miller y la metodología de Bradford respectivamente.

Los autores M. Marín, A. Robledo, A. Charles, S. González, N. Camposeco, evidenciaron un máximo crecimiento del *Aspergillus niger* a las 216 h con 199 g de biomasa, donde el microorganismo asimiló las fuentes de carbono y nitrógeno presentes en el medio al degradar los monosacáridos y las proteínas solubles con el fin de obtener carbono y nitrógeno, que son macronutrientes necesarios para su crecimiento [89].

4.5.1. II. Fermentación sólida: Al igual que la fermentación líquida, esta técnica es utilizada para la producción de enzimas, metabolitos secundarios y en el crecimiento de los microorganismos. Aquí el material sólido actúa como la principal fuente de nutrientes y le da soporte físico al microorganismo, este tipo de fermentación posee varias ventajas por su simplicidad al asemejarse al entorno natural en donde se da el crecimiento del microorganismo y su menor requerimiento energético.

En la investigación de M. Rainbault y D. Alazard se dio el crecimiento del *Aspergillus niger* utilizando harina de yuca mediante fermentación en estado sólido, en donde se dio una distribución homogénea de las sales tanto para los micelios como para las esporas, dada la forma que posee el sustrato como lo son sus poros que permiten la aeración y el crecimiento micelial. Las esporas germinaron entre 6 a 8 h de fermentación y se dio el crecimiento total del micelio entre 20 a 24 h a un pH de 4.5, un porcentaje de humedad del 50% y una temperatura de 35°C [90].

Para la fermentación sólida y líquida con *Aspergillus niger* utilizando pulpa de café y maíz, los autores R. Duran, M. Reyes, A. Nieves, J. Mazo y A. Torres, recolectaron el sustrato, lo molieron y lo secaron en un horno a 60°C por 24 h, para la producción de esporas se realizó en un agar sabouraud dextrosa y cloranfenicol a una temperatura de 30°C por 4 días y su conteo se dio en una cámara Neubauer. En el caso de la fermentación sumergida se seleccionan 2.5 g de sustrato y se adicionan a 100 ml de una solución salina y se agitan a 200 rpm por 20 min, posteriormente se pasa a filtrado y esterilización para inocular, en la fermentación sólida se utilizan 10 g de sustrato y se esteriliza a 121°C por 15 min, a continuación se humedece por aspersión con una solución salina, luego se añade el inóculo hasta obtener una humedad del 70% y se lleva a un lugar con poca luz y a 30°C [91].

A partir de esto se logra concluir que cualquiera de los dos tipos de fermentaciones es viable para el crecimiento del *Aspergillus niger* ya que estos sustratos contiene altos porcentajes de proteínas y carbohidratos que proporcionan los nutrientes necesarios para su crecimiento.

Finalmente utilizando la pulpa de café para la fermentación sólida con *Aspergillus niger* los autores M. Molina, O. Lechuga y R. Bressani determinaron que en este proceso disminuyeron los porcentajes de cafeína, polifenoles y fibra, compuestos que se consideran tóxicos en la pupa de café, esto debido a que el *Aspergillus niger* es capaz de degradar estos compuestos y utilizarlos para su metabolismo, como se evidencia en la Tabla 36 [92].

Tabla 40.

Composición porcentual de la pulpa de café sin fermentar y luego de la fermentación sólida, usando Aspergillus niger y la tecnología de fermentación por bandeja.

Componente	Concentración %	
	Pulpa sin fermentar	Producto fermentado
Nitrógeno total	1.83	18.27
Aminoácidos totales	5.37	18.02
Cenizas	5.97	12.84
Potasio	1.48	1.12
Celulosa	25.31	18.83
Hemicelulosa	3.23	1.69
Lignina	21.54	20.80
Cafeína	0.98	0.72
Polifenoles	5.34	1.54
Fibra Cruda	23.79	16.27

Nota: esta tabla muestra la concentración en % de ciertas sustancias que componen la pulpa de café antes de fermentar y después de la fermentación en estado sólido mediante bandejas. Tomado de valor nutritivo de la pulpa de café sometida fermentación sólida usando *Aspergillus niger* en pollos y cerdos.

Por otro lado en el artículo de los autores H. Anzola, D. Beltrán, E. Facundo, E. de Leal y C. Poveda, se ve reflejado como el microorganismo interés (*Aspergillus niger*) reduce estos compuestos, Tabla 37.

Tabla 41.

Composición química porcentual de la pulpa de café sin fermentar y fermentada (Base seca).

Componente	Concentración %	
	Pulpa sin fermentar	Producto fermentado
Nitrógeno total	1.94	2.21
Proteína Cruda	12.15	13.83
Cenizas	8.03	13.95
Potasio	6.98	7.22
Celulosa	15.12	12.06
Hemicelulosa	2.91	2.64
Lignina	12.70	19.08
Taninos	4.57	3.01
Fibra Cruda	18.15	15.03

Nota: esta tabla muestra la concentración en % de ciertas sustancias que componen la pulpa de café antes de fermentar y después de fermentar en estado sólido. Tomado de digestibilidad y energía digestible de la pulpa de café fermentada con *Aspergillus niger* en cerdos

De la anterior información se llega a concluir que las sustancias que conforman la pared celular de la pulpa de café, presentan un decremento llegando a reducir el porcentaje de fibra total, por el contrario el nivel de cenizas aumenta los minerales, destacando el contenido de potasio. Finalmente el contenido de cafeína, taninos y demás polifenoles disminuye, estas sustancias son consumidas en su mayoría como nitrógeno no proteico. Al disminuir porcentajes como la fibra cruda y polifenoles, el residuo sólido que se genera después de la fermentación puede llegar a ser utilizado como alimento para animales rumiantes, sin embargo se debe tener cuidado en no sobrepasar la ración.

4.5.2 Interacción pulpa de café y *Aspergillus niger*

Durante la fermentación ya sea sólida o líquida el *Aspergillus niger* tiene la capacidad de producir diferentes enzimas como lo son:

Tabla 42.

Enzimas producidas por el Aspergillus niger.

Enzimas
α – Amilasa
Amiloglucosidasa
Catalasa
Celulosa
Clorogenato esterasas
Endoglucanasa
Feruloil esterasas
Fitasa
α – Galactosidasa
β – Galactosidasa
β – Glucanasa
Glucoamilasa
Glucosa aerodeshidrogenasa
Glucosa Oxidasa
α – Glucosidasa
α – D – Galactosidasa
β – Glucosidasa
Hemicelulasa
Hesperidinasa
Invertasa
Lipasa
Pectinasa
Proteasa
Tanasa
Xilanasa

Nota: Esta tabla muestra la las enzimas producidas por fermentación sumergida y sólida por la cepa de *Aspergillus niger*. Tomado de Fungal morphology and metabolite production in submerged mycelial processes.

Muchas de estas enzimas le atribuyen a la cepa la propiedad de procesar los diferentes compuestos presentes en el sustrato a través de la fermentación y para el caso en específico de la pulpa de café la cepa comienza consumiendo las fuentes fáciles de carbono por medio de las

Glucanasas, celulosas, Xilanasas y Hemicelulasas, seguidamente cuando estas fuentes son degradadas utiliza las Pectinasas y proteasas para obtención de los nutrientes necesarios para su crecimiento, además esta cepa puede utilizar las Feruloil esterasas y Clorogenato esterasas encargadas de liberar el ácido cafeico, degradar los taninos y polifenoles que servirán para contribuir al desarrollo del microorganismo [93].

4.6 Conclusión

Se logró identificar las condiciones necesarias para el desarrollo del bioadsorbente a partir de la pulpa de café y el *Aspergillus niger*, el cual será utilizado para la remoción de Cr (VI) de las aguas residuales. Como cepa de estudio se seleccionó el *Aspergillus niger* ya que posee características de gran interés biotecnológico como lo es su capacidad de tolerar la presencia de varios metales ecotóxicos, así como su remoción en altos porcentajes, propiedades atribuidas por los macroporos de su morfología.

Partiendo de la bibliografía se determinó que tanto la fermentación líquida como sólida son procesos viables para efectuar el adecuado crecimiento de la biomasa fúngica, sin embargo la fermentación sólida presenta varias ventajas como lo son: mayor producción de biomasa en un espacio reducido, tiempo de crecimiento más cortos, baja posibilidad de contaminación, semejanza al ambiente natural del microorganismo y es un proceso más económico, debido a que “cuenta con medios de cultivo sencillos los cuales requieren una tecnología simple al no necesitar una esterilización, así mismo el sustrato sólido en este caso la pulpa de café, no necesita de grandes reactores y su aireación es forzada facilitando el transporte de oxígeno” [94], mientras que para la fermentación sumergida esto no es posible, requiriendo de reactores de mayor tamaño, tanques de alimentación, esterilización del sustrato y aireación controlada [95] lo cual representa mayores gastos energéticos, por lo cual la fermentación sólida sería la mejor opción a utilizar.

En cuanto a las condiciones óptimas de crecimiento, la pulpa de café como sustrato cuenta con varios nutrientes que permiten el desarrollo del micelio y una adaptación adecuada, se debe considerar que este microorganismo no es muy exigente dado que es una de las cepas presentes en la microbiota natural que posee la pulpa de café, a pesar de esto se recomienda una humedad alrededor del 80%, temperatura entre 30°C a 40°C y un pH en rangos de 4.5 a 5.5.

Finalmente la asociación en cuanto a la biomasa fúngica más conveniente para el desarrollo del bioadsorbente es por medio abiótico dado que para la remoción del metal no se requiere un suministro de nutrientes, un control constante de las condiciones del medio y no se presenta inhibición al entrar en contacto con una alta concentración de iones metálicos, debido a que se presenta un proceso de biotransformación y bioadsorción para el Cr (VI) en específico, además

de que se puede dar la regeneración de la biomasa utilizada siendo un proceso eficiente para una adecuada remoción, cabe resaltar que el rango de pH va de 1 a 7 y la temperatura puede estar de 5°C a 45°C.

5 PROTOCOLO PARA EL DESARROLLO DEL BIOADSORBENTE ENTRE PULPA DE CAFÉ Y *ASPERGILLUS NIGER*

Hoy en día la contaminación en el ecosistema acuático se ha incrementado principalmente por la intervención antropogénica, en la que las industrias son las mayores responsables debido al vertimiento de sustancias que son consideradas peligrosas en diferentes concentraciones, como lo son los metales pesados que provocan efectos nocivos para todo ser vivo. Por esta razón se han implementado diferentes técnicas para la remoción de estas sustancias dentro de las cuales destaca el proceso de biosorción, que es una técnica potencial para la biorremediación de ecosistemas contaminados.

En este capítulo se planteará un protocolo para la recuperación de los ecosistemas acuáticos haciendo uso de un bioadsorbente tipo filtro prensa, entre la pulpa de café y el *Aspergillus niger*, empleando la fermentación en estado sólido donde se efectuará el crecimiento del microorganismo utilizando la pulpa de café como sustrato. La selección de estas biomasas se dio a partir de características que ayudarán en dicho proceso, en el caso del *Aspergillus niger* su morfología y versatilidad le permiten adaptarse al medio rápidamente y realizar procesos de intercambio iónico con los metales pesados para reducir su estado de oxidación, por otro lado la pulpa de café, es una fuente rica de carbono, nitrógeno y minerales que ayudan al crecimiento del microorganismo además de realizar procesos de bioadsorción con los iones metálicos. En lo que concierne al estado en el que se asociará el bioadsorbente se seleccionó el medio abiótico dado las ventajas que este presenta a la hora de requerimientos nutricionales y control de condiciones.

Para el planteamiento de este protocolo a partir de una recopilación bibliográfica se realizará la caracterización de la biomasa, la preparación del inóculo, la fermentación en estado sólido y finalmente la generación del bioadsorbente con una geometría deseada.

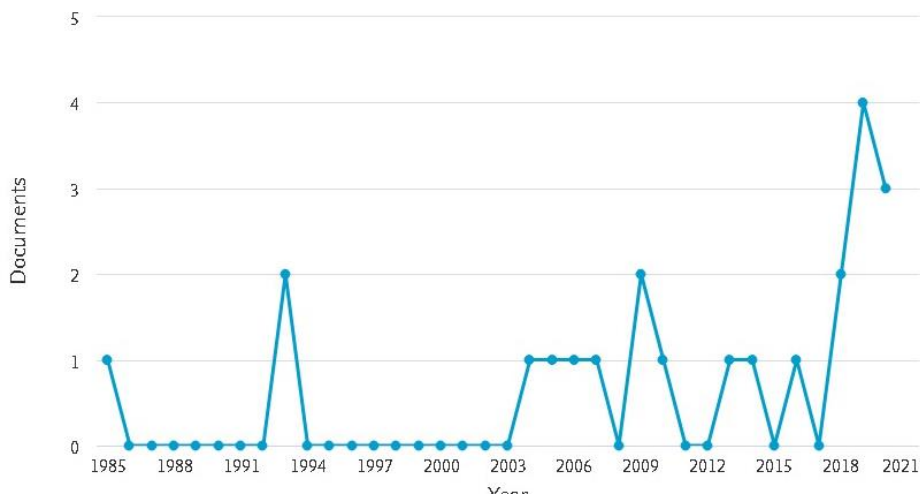
5.1 Caracterización bibliográfica

Se realizó una caracterización bibliográfica para la asociación entre la pulpa del café y el microorganismo de estudio (*Aspergillus niger*) para la elaboración de un diseño metodológico de un bioadsorbente capaz de eliminar metales pesados de aguas residuales especialmente del Cr (VI) metal de estudio. Se revisó un total de 22 artículos con ayuda de herramientas de

bibliometría como lo fue Mendeley, Refworks, Nube de palabras, Legible, Sentigem, Grammarly y Scopus con el fin de identificar la información de mayor relevancia para el objeto de estudio. Por medio de un análisis estadístico se agruparon los documentos según el año (Figura 20) siendo el año 2019 el que mayor número de publicaciones presenta, en tipo y área de investigación (Figuras 21 y 22), sobresalen los artículos y los papers con 81.8% y un 9.1% respectivamente, en cuanto el área de investigación destacan bioquímica con un 20.4%, microbiología con 18.5% e ingeniería química con un 14.8%.

Figura 20.

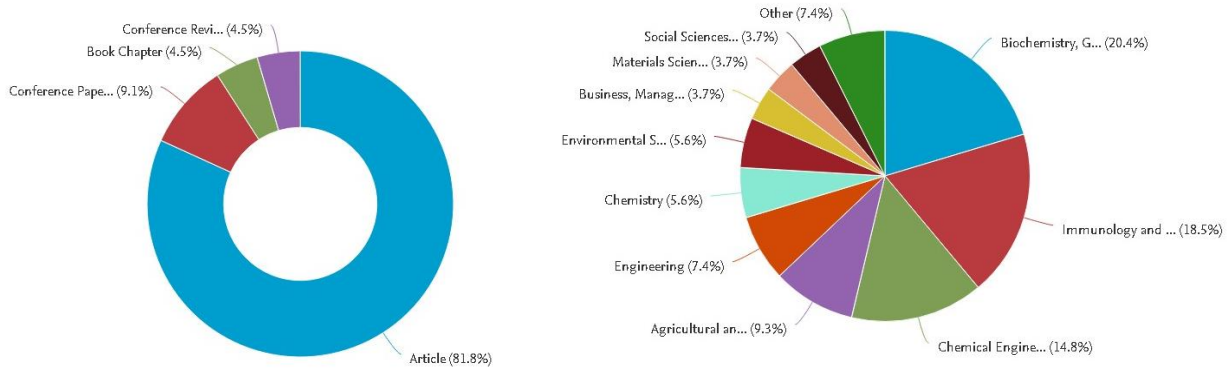
Documentos por año para la asociación entre la pulpa de café y Aspergillus niger.



Nota: La figura presenta la cantidad de documentos publicados por año en lo referente a la biomasa de la industria cafetera y biomasa fúngica de *Aspergillus niger*. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Figura 21 y 22.

*Documentos por tipo y área de investigación para la asociación entre la pulpa de café y *Aspergillus niger*.*



Nota: Las figuras 21 y 22 presenta el tipo de documentos y área de investigación de los cuales se recolecto la información para el desarrollo del bioadsorbente entre la pulpa de café y el *Aspergillus niger*. Tomado del análisis bibliométrico de Scopus.

Para la selección de los documentos que aportan información necesaria para la propuesta del protocolo del bioadsorbente entre la pulpa de café y el *Aspergillus niger*, se realizó un árbol de decisión (Figura 23) el cual describe los aspectos a tener en cuenta.

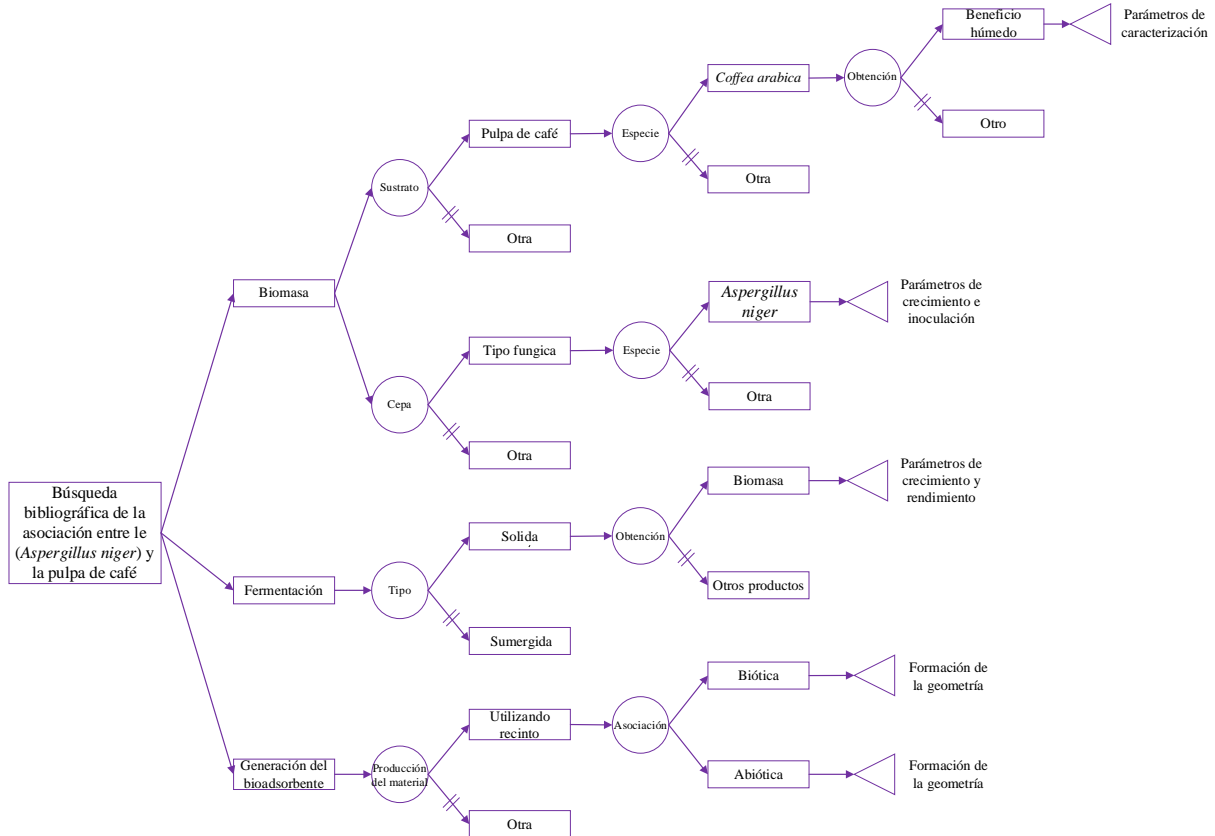
Se tuvieron en cuenta 3 aspectos globales que fueron de gran relevancia en la selección de los parámetros para el desarrollo del capítulo. En el primer aspecto se evalúa la biomasa, tanto la que conformará el sustrato (Pulpa de café) como la que crecerá sobre este (*Aspergillus niger*), se debe tener en cuenta que el sustrato pertenezca a la especie *coffea arabica* y su obtención sea por beneficio húmedo, que incluya una caracterización fisicoquímica para su acondicionamiento. Para el caso de la biomasa fúngica, la especie será *Aspergillus niger* en donde se relate las condiciones de crecimiento y su método de inoculación.

El segundo grande aspecto es tipo de fermentación, en este se tendrá en cuenta que se dé por estado sólido y que la finalidad de esta sea la obtención de biomasa, por otro lado se requiere información de los parámetros más importantes que proporcionen un buen crecimiento del microorganismo.

Finalmente para determinar los pasos necesarios para el desarrollo de la bioadsorbente, la información recolectada debe poseer el tipo de manufactura, la asociación (biótica y abiótica) y por último la formación de la geometría.

Figura 23.

Árbol de decisión búsqueda bibliográfica para el bioadsorbente.



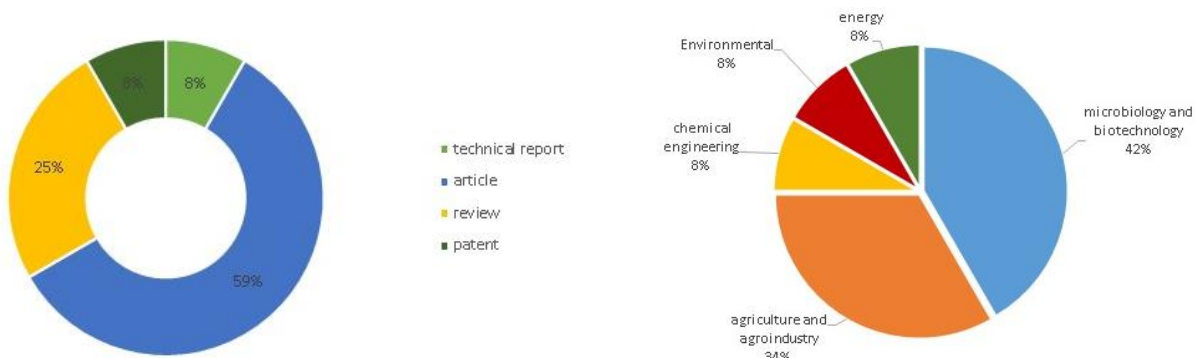
Nota: La figura muestra el árbol de decisión empleado en la búsqueda bibliográfica para la propuesta de un bioadsorbente para la remoción de metales pesados.

De acuerdo al árbol de decisión se obtuvieron 18 artículos de los cuales se utilizaron 12 que cumplían con los requerimientos necesarios para el desarrollo del capítulo. Estos se encuentran clasificados por tipo y área de investigación (Figuras 24 y 25), en donde se resalta los artículos y revisiones como tipo de documentos y en las áreas microbiología y biotecnología seguida de la agricultura y agroindustria, estas dos áreas resaltan debido a que el estudio de este tipo de asociación es de gran interés dado que a partir de este se obtienen productos de valor agregado y

enzimas, además el subproducto resultante sirve para ser utilizado en la alimentación de rumiantes.

Figura 24 y 25.

*Documentos por tipo y área de investigación seleccionados para la asociación entre la pulpa de café y *Aspergillus niger* seleccionados.*



Nota: Las figuras 24 y 25 presenta el tipo de documentos y área de investigación de los cuales se obtuvo la información para el desarrollo de un protocolo para el diseño de un bioadsorbente entre la pulpa de café y el *Aspergillus niger*.

5.2 Diseño metodológico

5.2.1 Caracterización de la biomasa

Para el desarrollo de la propuesta del bioadsorbente se utilizará como sustrato pulpa de café de la especie *coffea arábica* obtenida por beneficio húmedo. Para la caracterización de esta biomasa es necesario realizar un acondicionamiento mediante los análisis establecidos por el protocolo de la NREL, con el fin de conocer las propiedades fisicoquímicas y las cantidades de las sustancias que servirán como nutrientes para la cepa.

5.2.1.1. Acondicionamiento de la biomasa: según la literatura el mejor método de secado para cantidades a nivel laboratorio (< 20 g), es a través de un horno a 60°C durante 24 h [91]. Una vez se obtenga la biomasa seca se pasa por un molino y posteriormente por un tamiz para obtener diámetros no mayores a 2 mm, los autores R. Duran, M. Domingo, A. Camilo, J. Mazo y A. Torres, utilizan 3 tamaños diferentes 250µm, 200µm y 150µm [91]. Este acondicionamiento con

el fin de reducir el porcentaje de agua en la biomasa, evitar la proliferación de microorganismo, mejorar la adhesión y el contacto con otras sustancias.

Para la composición aproximada del material se realizan los siguientes estudios con el fin de cuantificar y conocer los nutrientes disponibles para el crecimiento de la cepa seleccionada.

- Determinación de sólidos totales: este se realiza con el fin de determinar el porcentaje de humedad y sólidos totales que servirán como base para cálculos analíticos posteriores.
- Cenizas: es el porcentaje de residuo después de la oxidación en base seca, es utilizada para identificar la composición química de la muestra como lo es el contenido de minerales y materias inorgánicas presentes en la biomasa, aquí se resalta el papel del fósforo, potasio, calcio y magnesio por su valor nutricional.
- Proteínas en la biomasa: este procedimiento es utilizado para determinar las proteínas formadas por aminoácidos esenciales y no esenciales presentes en la pulpa de café y a su vez la cantidad de nitrógeno que contiene. Este elemento es de vital importancia en los hongos para la síntesis de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos, requeridos para la construcción del protoplasma [96]. Dependiendo del resultado que se quiera obtener ya sea favorecer la esporulación o el crecimiento micelial se hace uso de un complemento en cuanto a la biomasa. En el caso que se quiera aumentar la producción micelial se utiliza como complemento al sustrato la asparagina y compuestos amoniacales que causas efectos inhibitorios en la fase del crecimiento, por otro lado si se busca la esporulación se utilizan sustratos como urea como en la investigación de M. Molina, O. Lechuga, R. Bressani [92], nitratos y aminoácidos [96].
- Extractos en biomasa: en este paso se busca estudiar la composición química preliminar del material a través del material soluble en agua y etanol por el método soxhlet a 105 ± 5 °C [97]. En esta etapa también es importante cuantificar los taninos, la cafeína y demás compuestos polifenólicos presentes en este tipo de sustrato debido a que el microorganismo de interés (*Aspergillus niger*) es capaz de utilizar estas sustancias como fuente de carbono.
- Carbohidratos estructurales y lignina en biomasa: es uno de los procesos más importantes citados al momento de caracterizar la biomasa por varios autores como lo son: R. Duran, M. Reyes y A. Nieves [91], M. Molina, O. Lechuga, R. Bressani [92], N. Pilar [96], W. Peñaloza, M. Molina, R. Gómez y R. Bressani [98], L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey y J. Lebeault [99], H. Anzola, D. Beltrán, E. Facundo, E. de Leal y C. Poveda [100], ellos destacan esta

identificación debido al aporte del contenido celular en los que se destacan la fibra, hemicelulosa, celulosa, lignina, y proteínas, los cuales cuentan con grupos funcionales como los carboxilos, carbonilos e hidroxilos que sirven para la retención de iones metálicos.

- Determinación de azúcares, subproductos y productos de degradación: al igual que para los carbohidratos estructuras los autores citados resaltan la cuantificación de estas sustancias al ser una fuente de carbono nutricional de importancia a la hora del crecimiento del microorganismo ya que aportan el material estructural y el suministro de energía para los diferentes procesos de oxidación, en esta etapa se resalta el valor de la glucosa para el crecimiento de hongo durante la fermentación. Se recomienda el uso complementario de azúcares tales como la fructosa, manosa y galactosa para un crecimiento más acelerado.

5.2.2 Microorganismo y la preparación del inóculo

Para la conservación de la cepa esta se mantiene en un medio de cultivo comercial, en este mismo medio generalmente se da la producción de esporas a 28 °C, como lo describen los artículos de los autores W. Peñaloza, M. Molina, R. Gómez y R. Bressani [98], H. Anzola, D. Beltrán, E. Facundo, E. de Leal y C. Poveda [100], S. Roussos, A. Aquiahuatl, J. Cassaigne, E. Favela, M. Gutiérrez, L. Hannibal, S. Huerta, G. Nava, M. Raimbault, W. Rodriguez, J. Salas, R. Sánchez, M. Trejo y G. Viniegra [101]. Luego viene la suspensión de esporas, y para determinar el número de esporas de moho viable se realiza un recuento en germinación en la placa Petri.

Estas esporas de moho viable se pasarán al medio de cultivo (Pulpa de café) para iniciar la fermentación. El ciclo de vida que presenta el *Aspergillus niger* se puede evidenciar en la (Figura 26).

5.2.3 Fermentación en estado sólido

Se pretende realizar una fermentación en estado sólido debido a su simplicidad, altos rendimientos y bajo riesgo de contaminación bacteriana en donde el microorganismo (*Aspergillus niger*) crecerá sobre el sustrato (pulpa de café), aprovechando su alto contenido en nitrógeno, carbono y minerales, bajo ciertos parámetros que influirán en el rendimiento y crecimiento de la biomasa fúngica, como lo son:

- **Sustrato:** Para favorecer el crecimiento de la cepa se requiere que el medio de cultivo cuente con los nutrientes necesarios de una manera equilibrada como para el caso del carbono-nitrógeno, es decir que posean una gran proporción de carbohidratos y proteínas. Algunos autores adicionan nutrientes en forma de urea, fosfato dicálcico y glucosa como suplementos para el medio, de esta forma se garantizará el inicio del crecimiento del microorganismo [102].
- **Tamaño de partícula:** este factor es importante dado que permite la adhesión del microorganismo y así mismo permite el intercambio de nutrientes entre él y el sustrato. Es importante tener un buen tamaño al inicio de la fermentación debido a que por el consumo de estos nutrientes la partícula irá disminuyendo [103].
- **Humedad:** esta variable es de gran importancia debido a que es un factor de optimización influyendo directamente en el crecimiento del microorganismo y la formación de productos, dependiendo de la fermentación, el tipo del sustrato y el microorganismo a utilizar los valores de humedad varían entre el 30% al 80%, para el caso específico de la pulpa de café y *Aspergillus niger* varios autores recomiendan que este valor sea aproximadamente del 80%, esto con fin de no disminuir la porosidad del sustrato e impidiendo la difusión de oxígeno y nutrientes además de prevenir el crecimiento microbiano [102].
- **Temperatura:** esta es una de las variables más importantes dado que si no se encuentra dentro del rango establecido conlleva a la desaceleración del crecimiento del microorganismo, la deshidratación del medio y un cambio en el metabolismo regular de los microorganismos, para la fermentación entre la pulpa de café y *Aspergillus niger* los diferentes autores recomiendan que este valor se encuentre en un rango aproximado de 30 a 35°C, de esta manera se asegurará un crecimiento estable [102].
- **pH:** es un factor crítico puesto que es difícil efectuar un control dado que no se cuenta con la instrumentación requerida para este tipo de medio, sin embargo se debe tener en cuenta que por el tipo de fermentación esta variable tiende a poseer una estabilidad relativa en algunos casos, así mismo un adecuado control reduce el riesgo de contaminación, esta también depende de la fuente de nitrógeno del sustrato. Para el caso del *Aspergillus* este cuenta con un amplio rango de pH, pero varios autores recomiendan que este medio sea ácido [103].
- **Aireación y Agitación:** aquí se suministra la cantidad de oxígeno necesario para la eliminación del dióxido de carbono y el calor metabólico, esta variable se ve afectada por el sustrato y el número de espacios los cuales deben representar al menos el 30% del volumen total.

Se debe considerar que la agitación que se lleve a cabo debe ser moderada dado que a mayor intensidad se presentarán lesiones en el micelio, en el caso de la pulpa de café y *Aspergillus niger* algunos autores recomiendan un caudal de aireación de 8 litros/min por kg de sustrato utilizado [104].

- Microorganismo: en cuanto al microorganismo se recomienda que este cuente con facilidad de utilizar diferentes fuentes de carbono y que cuente con una buena capacidad de adherencia al sustrato, por otro lado el tipo de inóculo es un factor que influye durante la fermentación ya que dependiendo de lo que se quiera producir influirá en el tiempo y los costos del proceso. Para el caso del *Aspergillus niger*, los autores recomiendan el uso de las esporas dado que cuentan con una mayor eficiencia sobre el micelio a la hora de la remoción del metal de interés [104].

A partir de la revisión bibliográfica se describe el proceso de fermentación en donde algunos autores después de tener acondicionada la biomasa y haber preparado el inóculo, proceden a esterilizar el sustrato (pulpa de café) mediante diferentes técnicas, como lo describen los autores R. Duran, M. Reyes y A Nieves, en donde utilizan vapor de agua a 121°C, 15 lb de presión durante 15 min y luz ultravioleta durante 15 min [91]. En el caso de los autores L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey y J. Lebeault la esterilización se realiza 121°C durante 15 min añadiendo metanol al 4% [99]. Por otro lado los autores que no realizan el proceso de esterilización proceden a la adición de nutrientes al sustrato después del acondicionamiento y de la preparación del inóculo.

Los autores R. Duran, M. Reyes y A Nieves añaden a su medio cultivo por aspersión una solución de nutrientes que contiene (KH_2PO_4 0.25%, $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 0.05%, NH_4Cl 0.5%) [91], en el artículo de M. Molina, O. Lechuga y R. Bressani se le agrega urea (2.5%) y fosfato dicálcico (2.0%), ambos de calidad comercial [92], en la investigación realizada por L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey y J. Lebeault la solución de nutrientes añadida estaba compuesta por $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 0.2% y $\text{FeCl}_3 \text{H}_2\text{O}$ 0.014% además se le agrega glucosa (40%) [99], finalmente W. Peñalosa, M. Molina, R. Gómez y R. Bressani es su artículo utilizaron fosfato monopotásico, urea y sulfato de amonio en proporciones de 5.0, 3.5 y 7.5% respectivamente [98]. Luego de la adición de nutrientes, los autores anteriormente mencionados proceden a la inoculación del medio de cultivo con las esporas viables del microorganismo de

interés (*Aspergillus niger*) para su crecimiento, esto se utiliza aproximadamente en un rango de temperatura entre 30 a 35 °C con una humedad aproximada del 80%.

Por último los autores W. Peñaloza, M. Molina, R. Gómez, R. Bressani y L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey, J. Lebeault, llevan los sustratos sólidos inoculados a fermentadores de columna vertical, en donde se suministró aire humidificado a un caudal de 8 litros/min por kg de sustrato y 65 ml/min respectivamente.

Tabla 43.

Complementos nutricionales para el sustrato.

Compuesto	%	Autor
Asparagina, Compuestos amoniacales/ Urea	2.5 – 3.5	M. Molina, O. Lechuga y R. Bressani (2016). / W. Peñaloza, M. Molina, R. Gómez y R. Bressani (1985).
Glucosa, fructosa, manosa y galactosa	40	L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey y J. Lebeault (2000).
Fosfato monopotásico	0.25 - 5	R. Duran, M. Reyes y A Nieves (2020). / W. Peñaloza, M. Molina, R. Gómez y R. Bressani (1985).
Sulfato de magnesio heptahidratado	0.05	R. Duran, M. Reyes y A Nieves (2020).
Cloruro de amonio	0.5	R. Duran, M. Reyes y A Nieves (2020).
Fosfato dicálcico	2	M. Molina, O. Lechuga y R. Bressani (2016).
Sulfato de zinc heptahidratado	0.2	L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey y J. Lebeault (2000).
Cloruro férrico hidratado	0.014	L. Vandenberghe, C. Soccol, A. Pandey y J. Lebeault (2000).
Sulfato de amonio	7.5	W. Peñaloza, M. Molina, R. Gómez y R. Bressani (1985).

Nota: esta tabla muestra los complemento matronales comúnmente usados para el desarrollo micelial y de esporas de *aspergillus niger* sobre pulpa de café con su respectivo autor.

5.2.4 Generación del bioadsorbente

En la producción de un material de crecimiento en un recinto, un hongo filamentoso (*Aspergillus niger*), es cultivado para producir una masa adecuada del inóculo, el cual adoptará la

forma del soporte sólido. Para esto se utiliza la técnica de manufactura basada en el recinto, en la cual se debe realizar los siguientes pasos, para obtener una asociación tanto biótica como abiótica:

5.2.4. I. Bioadsorbente biótico:

- a. Creación de sustrato, aquí se combinan los constituyentes del sustrato para obtener un medio de crecimiento sólido, la adición de estas sustancias se hace a partir de la cantidad de nutrientes que posea el medio.
- b. Inoculación del sustrato con la cepa del hongo deseada *Aspergillus niger* (Figura 27).
- c. Disposición del sustrato inoculado dentro del recinto o series de recintos, según el diseño o geometría deseada, de esta manera se producirá la forma final requerida.
- d. Hacer crecer el microorganismo dentro del sustrato, llevándolo a una cámara de incubación controlada ambientalmente, en esta etapa el micelio crece consumiendo los nutrientes presentes en el sustrato, llenando los espacios entre las partículas dándole volumen al material (Figuras 28 y 29).
 - ◆ Las etapas anteriores se repiten cuando lo que se desea es la aplicación del material con estructura en capas.
- e. Se retira la composición del sustrato que se encuentra en el recinto.

El bioadsorbente que se busca diseñar presenta una estructura tipo filtro prensa el cual cuenta con láminas rectangulares delgadas, organizadas de forma paralela entre ellas, se selecciona este diseño debido a que presenta mayor superficie de filtración en poco espacio, es económico, su proceso de filtración es alto adaptándose al líquido que se requiere filtrar.

Dado que en capítulos anteriores se mencionó la mejor asociación para el desarrollo del bioadsorbente y las condiciones para una mejor remoción, se procede a la deshidratación de la composición anteriormente obtenida para cumplir con el estado abiótico previamente seleccionado.

5.2.4. II. Bioadsorbente abiótico

Para la producción de un bioadsorbente abiótico se deben seguir los numerales anteriores de la (a – e) posteriormente se realizan los siguientes pasos:

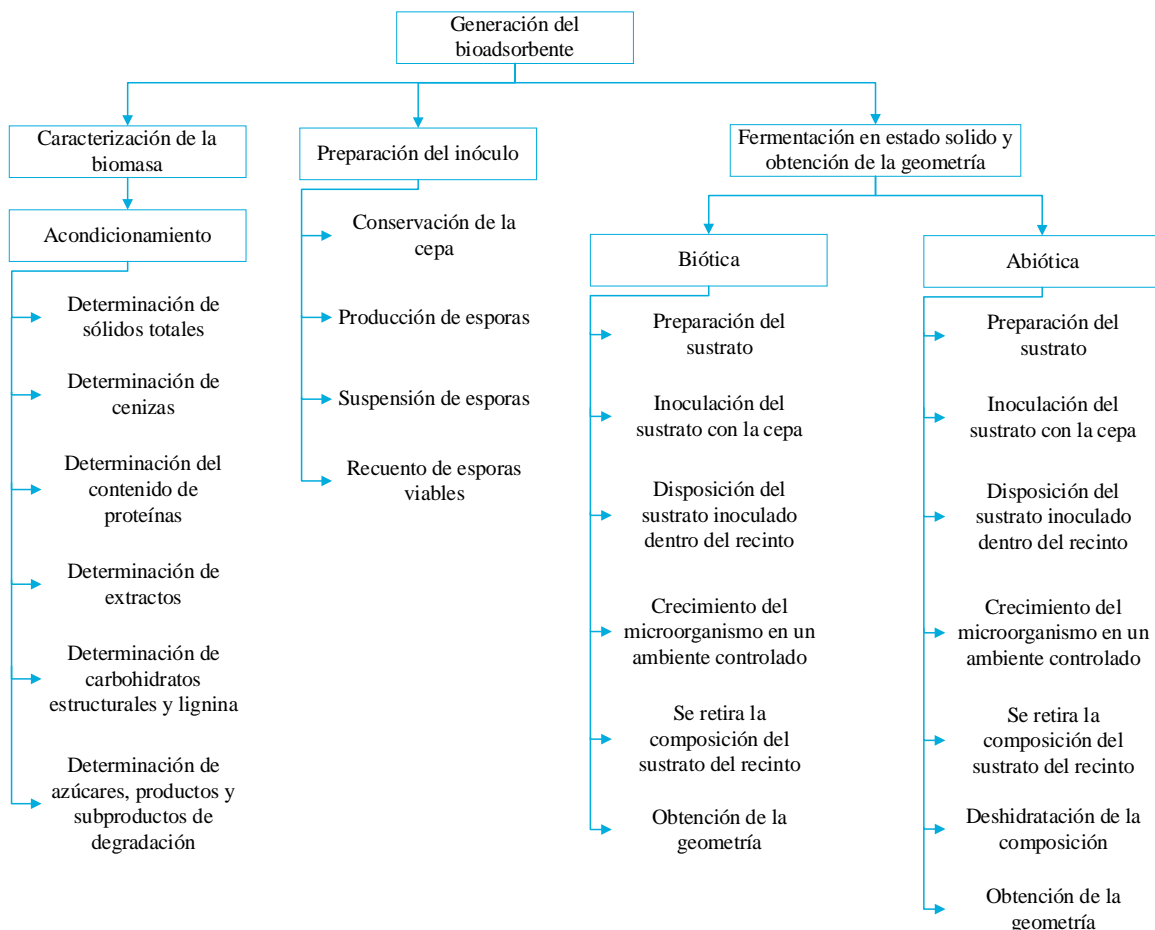
f. Para la obtención de la composición biológicamente inerte, la biomasa viva que se encuentra en el recinto, se somete a un proceso de deshidratación para darle muerte a los organismos residentes.

◆ La composición en forma de lámina se debe transferir al interior de un horno de secado por convección, en donde circulará aire seco a una temperatura de 54 °C durante 4 horas.

g. Finalmente la composición después de ser sometida a la deshidratación es procesada para obtener la geometría y acabado de superficie deseado, que para este paso se presentará en forma de lámina [105] (Figura 30).

Figura 26.

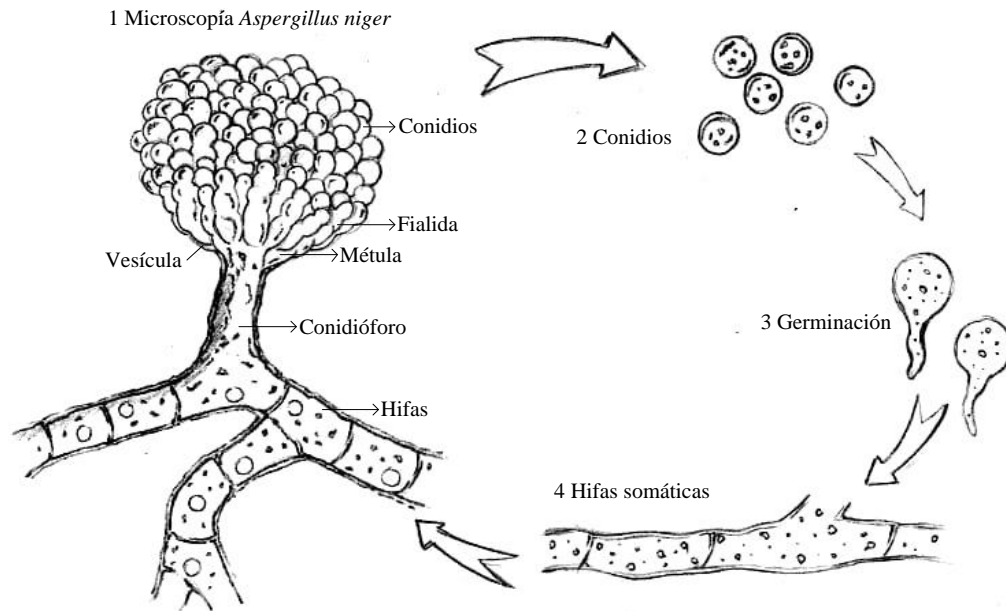
Diseño Metodológico.



Nota: La figura 26 muestra cada uno de los pasos que se realizarán en el diseño metodológico para la obtención del bioadsorbente.

Figura 27.

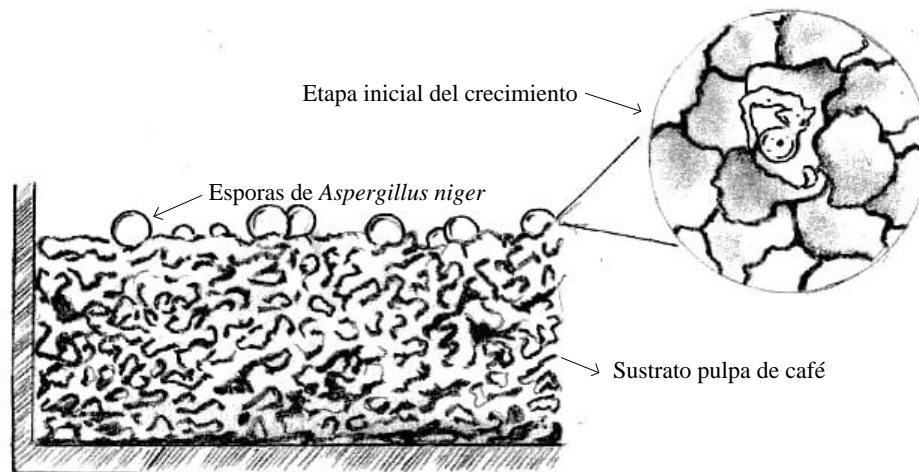
Ciclo de vida del Aspergillus niger.



Nota: La figura 27 muestra el ciclo de vida y las partes a nivel microscópico del *Aspergillus niger*.

Figura 28. Generación del inoculo en el sustrato con la cepa

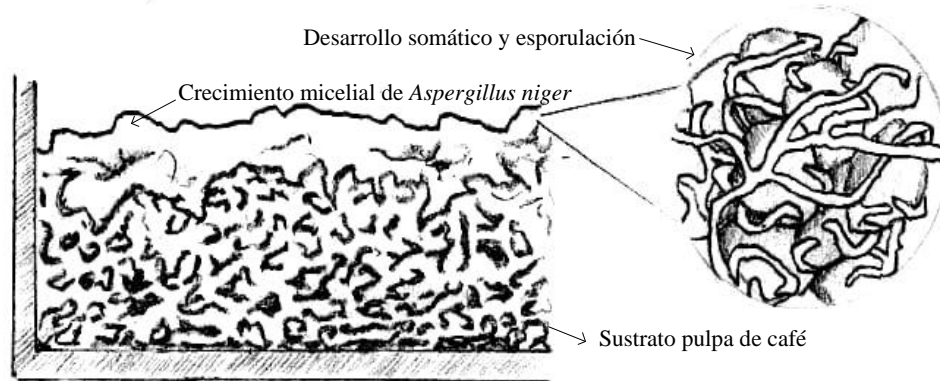
Generación del inóculo en el sustrato con la cepa.



Nota: La figura 28 refleja la etapa inicial del crecimiento del *Aspergillus niger*.

Figura 29.

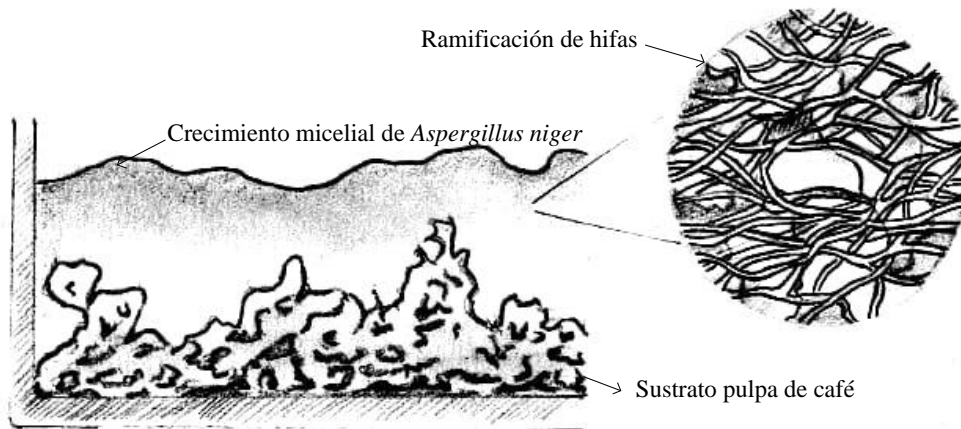
Comienzo del crecimiento del microorganismo.



Nota: La figura 29 muestra el desarrollo somático y esporulación del *Aspergillus niger*.

Figura 30. Crecimiento avanzado del microorganismo.

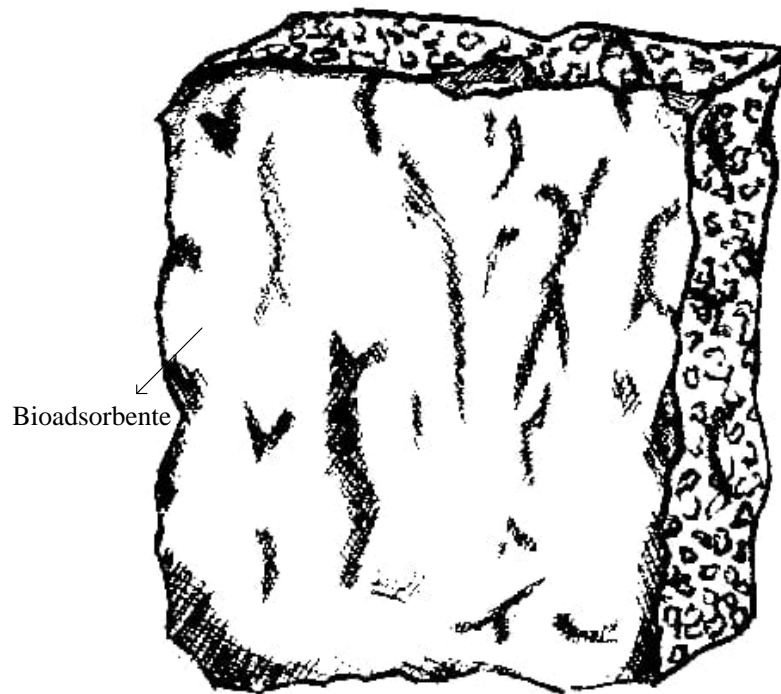
Crecimiento avanzado del microorganismo.



Nota: La figura 30 muestra la ramificación de las hifas del *Aspergillus niger*.

Figura 31.

Vista del bioadsorbente.



Nota: La figura 31 muestra la proyección caballera del bioadsorbente entre el *Aspergillus niger* y la pula de café.

5.3 Conclusión

Se especificó un protocolo para el desarrollo del bioadsorbente entre biomasa de pulpa de café y *Aspergillus niger* en asociación biótica y abiótica. Para efecto del desarrollo de este bioadsorbente en estado abiótico al igual que en estado biótico, se realizan los mismos pasos hasta la salida de la composición del recinto.

Para el desarrollo del protocolo se tuvieron en cuenta aspectos de relevancia tales como: el acondicionamiento de la biomasa considerando parámetros como lo son sólidos totales, cenizas, proteínas, carbohidratos y azúcares, la preparación del inóculo con las condiciones requeridas para el crecimiento, el proceso de fermentación sólida en donde el microorganismo obtendrá los nutrientes necesarios dependiendo de variables como el sustrato, temperatura, pH y aireación. Finalmente se contempló el tipo de manufactura del bioadsorbente para la obtención de una geometría final deseada que para este caso es filtro prensa. Una vez obtenido este bioadsorbente para poder determinar la eficiencia y eficacia de esta técnica se requiere un desarrollo experimental haciendo uso de las dos formas expuestas, mediante pruebas en aguas residuales.

Con este proyecto queremos resaltar el uso de la biomasa residual en aras de hacer una aplicación real de economía circular o bioeconomía teniendo en cuenta esta política en Colombia, basada en recursos biológicos y renovables aplicados a la biotecnología, los biorecursos y la bioecología para lograr la sostenibilidad ambiental, conservación de ecosistemas, crecimiento económico con la generación de nuevos productos y procesos a partir de la biodiversidad y la biomasa mediante la investigación y la innovación. Por otro lado hacer uso de una tecnología que llegará a poseer ventajas superiores a las de las técnicas comunes ya utilizadas como lo son las químicas, entre las ventajas que presentaría este tratamiento biológico se resalta las altas eficiencias, su bajo costo de implementación, fácil adquisición de materias primas, simplicidad y la capacidad que esta presenta para remover uno de los iones más contaminantes como es el Cr (VI), lo cual en las técnicas químicas solo se puede evidenciar en la fotocatalisis, pero esta requiere un elevado costo de implementación.

6 CONCLUSIONES

Se realizó una caracterización bibliográfica de las propiedades fisicoquímicas de la pulpa de café para la especie (*Coffea arábica*) obtenida por beneficio húmedo, en la cual se resaltó la composición que la convierten en un buen sustrato a la hora del crecimiento de microorganismos por su gran contenido de nutrientes, distribuidos en polisacáridos en los que se encuentran en mayor proporción la celulosa, hemicelulosa y la lignina, por otro lado también están presentes varias fuentes de nitrógeno, minerales y otras sustancias fuentes de carbono. Así mismo se considera un adsorbente eficiente debido a sus grupos funcionales tales como carbonilos, carboxilos e hidroxilos que están presentes en la pared celular de este residuo.

Se determinaron las condiciones requeridas para el desarrollo del bioadsorbente a partir de la pulpa de café y el *Aspergillus niger*, para la remoción de Cr (VI) de las aguas residuales a partir de una recopilación bibliográfica, eligiendo la fermentación en estado sólido, biomasa fúngica abiótica, un sustrato con aproximadamente un 80% de humedad, temperatura entre 30°C a 40°C y un pH en rangos de 4.5 a 5.5, cabe resaltar que para una adecuada remoción del ion metálico del medio el rango de pH va de 1 a 7 y la temperatura puede estar de 5°C a 45°C.

Se propuso un protocolo para el desarrollo experimental del bioadsorbente tipo filtro prensa para la remoción de metales pesados como lo es el Cr (VI), entre biomasa de pulpa de café y *Aspergillus niger* en asociación biótica y abiótica, a partir de un análisis bibliográfico, en el cual se tuvieron en cuenta factores como la caracterización del sustrato, la preparación del inóculo, la fermentación en estado sólido y la obtención de la geometría que promovería una mayor remoción del metal dada la asociación que se forma entre el microorganismo y el sustrato al contar con suplementos como urea, fructosa, galactosa y manosa que aceleran la producción de esporas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Rodríguez Valencia and D. Zambrano Franco, “Los subproductos del café: fuente de energía renovable,” *Av. Técnicos Cenicafé*, no. 3, p. 8, 2010, [Online]. Available: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>.
- [2] P. A. Avendaño Rivera, “Producción de agua residual sintética como candidato a material de referencia en los parámetros de pH, sólidos suspendidos totales y demanda química de oxígeno,” Universidad Mayor de San Andrés, 2018.
- [3] J. Carlos Jurado and E. A. Vargas, “Remoción de materia orgánica en un sistema biodiscos en el tratamiento de aguas residuales urbanas de los efluentes ‘Las Vírgenes’ – Huancayo a Nivel de Laboratorio,” Universidad Emprendedora, 2015.
- [4] E. D. Niño Rodríguez and N. C. Martínez Medina, “Estudio de las aguas grises domésticas en tres niveles socioeconómicos de la ciudad de Bogotá,” Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
- [5] ANDI, *MANUAL DE CARACTERIZACION DE AGUAS RES. IND..pdf*, 2nd ed. Medellín Colombia: ANDI, 1997.
- [6] K. Romero, “Contaminación por metales pesados,” *Rev. Científica Cienc. Médica SCEM*, vol. 12, no. 1, pp. 45–46, 2009, doi: ISSN: 1817-7433.
- [7] N. K. Ramos Castillo, Yadelcy; Salas Córdoba, “EVALUACION DE METALES PESADOS EN AGUAS SUPERFICIALES EN EL AREA DE INFLUENCIA AL EMISARIO SUBMARINO EN EL CORREGIMIENTO DE PUNTA CANOAS DEPARTAMENTO DE BOLIVAR,” Universidad de San Buenaventura, 2015.
- [8] E. Becerra Aguilar, “Análisis del grado de contaminación por metales pesados en sedimentos de ecosistemas acuáticos,” Universidad Privada del norte, 2017.
- [9] C. G. Aymara Uscamayta, “Biorremoción de metales ecotóxicos mediante cepas fúngicas nativas aisladas de efluentes industriales en un sistema de biorreactores en serie de Agitación Continua,” Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2018.

- [10] J. Martorell, “Biodisponibilidad De Metales Pesados En Dos Ecosistemas Acuáticos De La Costa Suratlántica Andaluza Afectados Por Contaminación Difusa,” Universidad de Cádiz, 2010.
- [11] D. Rodríguez Heredia, “Intoxicación ocupacional por metales pesados,” *MEDISAN*, vol. 21, no. 12, 2017, doi: ISSN 1029-3019.
- [12] L. F. Londoño Franco, P. T. Londoño Muñoz, and F. G. Muñoz Garcia, “Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal,” *Biotecnología en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial*, vol. 14, no. 2, p. 145, 2016, doi: 10.18684/bsaa(14)145-153.
- [13] L. B.V., “Lenntech tratamiento y purificación del agua,” 2019. <https://www.lenntech.es/>.
- [14] F. de química U. N. de Mexico, “Hoja de seguridad XXI Mercurio y sales de mercurio,” vol. 0. 2016, [Online]. Available: <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/21HG.pdf>.
- [15] M. Gaioli, D. Amoedo, and D. González, “Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente,” *Todo Sobre El Mercur.*, vol. 110, no. 3, pp. 259–264, 2012, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.ar/pdf/aap/v110n3/v110n3a17.pdf>.
- [16] E. Reyes, Yulieth; Vergara, Inés; Torres, Omar; Diaz, Mercedes; Gonzáles, “Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, Ambiente y Seguridad Alimentaria,” *Indian J. Pediatr.*, vol. 16, no. 2, pp. 66–77, 2016, doi: ISSN: 2422-4324.
- [17] A. G. Carabantes and N. A. G. G. de Fernicola, “Arsenic in drinking water: a public health problem,” *Brazilian J. Pharm. Sci.*, vol. 39, no. 4, pp. 365–372, 2003, doi: ISSN 1516-9332.
- [18] G. Nordberg *et al.*, “Metales: propiedades químicas y toxicidad,” in *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, 4th ed., G. Nordberg, S. Langård., J. F. William Sunderman, J. M. Stellman, D. Osinsky, P. Markkanen, B. D. Dinman, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, and (ATSDR)., Eds. ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO, 2001, pp. 1–76.
- [19] R. M. Ribeiro, R. Bergamasco, M. L. Gimenes, and C. M. O. Müller, “Preparación de

- membranas para producción de agua potable,” *Inf. Tecnol.*, vol. 18, no. 1, pp. 15–22, 2007, doi: 10.4067/s0718-07642007000100004.
- [20] U. Lopez García, “Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua,” Centro de Investigación y desarrollotecnológico en electroquímica, 2005.
- [21] D. I. Caviedes Rubio, R. A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta, and I. J. Sandoval Rojas, “Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión,” *Ing. y Región*, vol. 13, no. 1, p. 73, 2015, doi: 10.25054/22161325.710.
- [22] carrillo trujillo. María Paula, “DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE MEJORA PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUA EN LOS PROCESOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS VOLUMÉTRICOS EN COLMETRIK SAS.,” Fundación Universidad de américa, 2020.
- [23] C. A. Solís Carvajal, C. A. Vélez Pasos, and J. S. Ramírez-Navas, “Tecnología de membranas: Ultrafiltración,” *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 11, no. 22, p. 26, 2017, doi: 10.31908/19098367.3546.
- [24] Á. Arango Ruiz, “La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales,” *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 2, no. 1, pp. 49–56, 2005, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>.
- [25] S. mejía gomez, “Tratamiento de efluentes liquidos a través de procesos acoplados de electrofloculación y generación in situ del reactivo de Fenton,” Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en electroquímica S.C., 2005.
- [26] A. Montes Brito, “Eliminación de contaminantes orgánicos emergentes mediante fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , empleando luz solar,” Instituto mexicano de tecnologia del agua, 2013.
- [27] L. Alcalá, P. Muñoz, T. Peláez, and E. Bouza, “Aspergillus y aspergilosis,” *Seimc*, vol. 12, no. 2, pp. 77–78, 2015, [Online]. Available: http://www.adiveter.com/ftp_public/articulo782.pdf.

- [28] M. G. Robles, *Manual de procedimientos y técnicas de laboratorio para la identificación de los principales hongos oportunistas causantes de micosis humanas*. 2010.
- [29] E. Carvajal-Flórez, L. Fernanda, and M. Giraldo, “Coffee Waste used as Biosorbent for Heavy Metals Removal in Wastewater,” *Ing. USBMed*, vol. 11, pp. 44–55, 2020, doi: 10.21500/20275846.44477.
- [30] A. D. Fernando Arturo, “BORRA DE CAFÉ COMO MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REMOCIÓN DE CROMO (III),” Universidad Libre Sede Bogotá, 2013.
- [31] P. B. Laura Johana, “EVALUACIÓN DE LA CASCARILLA DE CAFÉ COMO MATERIAL ADSORBENTE PARA LA REMOCIÓN DE IONES PLOMO Pb²⁺ PRESENTE EN SOLUCIONES ACUOSAS LAURA,” Universidad Libre, 2014.
- [32] M. Bassan, P. Dodane, and L. Strande, “Mecanismos de Tratamiento,” in *Manejo de Lodos Fecales*, 1st ed., no. 1989, L. Strande, M. Ronteltap, and D. Brdjanovic, Eds. Londres, 2008, pp. 617–623.
- [33] L. F. Posada Uribe and S. Mosquera López, “Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas,” Universidad EAFIT, 2007.
- [34] C. Pinzón and C. Fajardo, “Impacto del mercurio en los ecosistemas colombianos y las técnicas aplicables para su biorremediación,” *Work. Pap.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2018, doi: <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2774>.
- [35] R. M. Suarez Beltran, “Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos,” Universidad Libre, 2013.
- [36] E. López, S. Cisneros, and J. Ochoa, “Procesos de bioestimulación para la remediación de suelos agrícolas contaminados con tebuconazol y λ -cialotrina.,” *Rev. Simulación y Lab.*, vol. 3, no. 8, pp. 1–9, 2016, doi: ISSN: 2410-3462.
- [37] A. Peña, “Biorremediación En Suelos Radioactivos,” Universidad Complutense de Madrid, 2018.
- [38] J. Peña, “Procesos de biorremediación en el tratamiento de residuos sólidos de cigarrillo.,”

Universidad Nacional de Colombia, 2017.

- [39] N. Yagrentkovsky, “Biorremediación para el de residuos Industriales Con Alto Contenido De Me Tales Pesados ”,” Universidad Nacional de La Plata, 2011.
- [40] N. M. Otiniano García, “Biorremediación de metales pesados,” *Revista.UCV-Scientia*, vol. 9, no. 1, pp. 50–60, 2017, [Online]. Available: <http://revistas.ucv.edu.pe/index.php/UCV-SCIENTIA/article/view/1605>.
- [41] Q. Jaime *et al.*, “BIOREMEDIACIÓN DE METALES TÓXICOS EN EFLUENTES MINEROS APLICANDO BIOSORCIÓN,” *Rev. del Inst. Investig. la Fac. geoloía, minas, Metal. y ciencias geográficas*, vol. 6, no. 7, pp. 1–12, 2001, doi: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v4i7.4651>.
- [42] M. F. Zorrilla Domenichi, “Estado del arte sobre la presencia de metales pesados en Tejidos y agallas de peces,” Universidad Autónoma de Occidente, 2011.
- [43] D. M. Morales and K. J. Ruiz, “Determinacion de la capacidad de remocion de cadmio, plomo y niquel por hongos de la podredumbre blanca inmovilizados diana milena morales fonseca katherine johanna ruiz tovar,” Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- [44] C. Tejada Tovar, Á. Villabona Ortiz, and L. Garcés Jaraba, “Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico,” *TecnoLógicas*, vol. 18, no. 34, pp. 109–123, 2015, doi: 10.22430/22565337.209.
- [45] Colombia, “Resolución 0631 de 2015-Calidad vertimientos.pdf,” *Minist. Ambient. y Desarro. Sosten.*, no. 0631, 17 marzo, p. 30, 2015, [Online]. Available: <http://www.aguasdebuga.net/intranet/sites/default/files/Resolución 0631 de 2015-Calidad vertimientos.pdf>.
- [46] Colombia, “DECRETO 1594 DE 1984 Usos del agua y residuos líquidos,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, no. 1594; 1984, pp. 1–52, 1984, [Online]. Available: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f.
- [47] Colombia, “Resolución 1074 de 1997,” *Dep. técnico del medio Ambient.*, no. 1074, 1997,

- p. 2, 1997, [Online]. Available: <http://zeus.colsanitas.com/laboratorio/archivos/Resolución No. 1074. Vertimiento de aguas.pdf>.
- [48] Colombia, “Acuerdo número 43 de octubre de 2006,” *Corporación autónoma Reg. cundinamarca - car*, no. 43; 2006, p. 16, 2006, [Online]. Available: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ada10b9602b4.pdf>.
- [49] J. F. Cárdenas, M. G. Moctezuma, I. Acosta, and V. M. Martínez, “Biosorción de Plomo (II) en solución por diferentes biomásas fúngicas,” *Rev. Latinoam. Recur. Nat.*, vol. 9, no. 1, pp. 57–61, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000100003>.
- [50] A. G. Villalba Villalba and G. V. Azuara Gómez, “Aislamiento e identificación de *Aspergillus niger* y evaluación de su tolerancia a metales tóxico,” *Desarro. científico en méxico Cent. Investig. en Opt.*, pp. 794–803, 2018, [Online]. Available: https://www.cio.mx/archivos/avances_de_la_ciencia_en_Mexico_2018/Capitulo_2.pdf.
- [51] P. Cubides Guerrero and J. H. Ramírez Franco, “Adsorción de Cr VI sobre residuos de café,” *Rev. Mutis*, vol. 4, no. 2, pp. 18–25, 2014, doi: 10.21789/22561498.953.
- [52] N. Dávila, “Caracterización Del Proceso De Biosorción De Metales Pesados Mediante Residuos Sólidos De Café,” Universidad Autónoma de nuevo león, 2012.
- [53] E. Rivera Martínez, J. F. Cárdenas González, V. M. Martínez Juárez, and I. Acosta Rodríguez, “Remoción de cromo (VI) por una cepa de *Aspergillus Niger* resistente a cromato,” *Inf. Tecnol.*, vol. 26, no. 4, pp. 13–20, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000400003.
- [54] M. G. a. Acosta Rodríguez, I.a, Bravo Reyna, A.a, Martínez Juárez, V.M.b, Cárdenas González, J.a, Moctezuma Zárate, “Bioadsorción de Cromo (VI) en solución acuosa por *Aspergillus niger*,” *Rev. Int. Investig. e Innovación Tecnológica Página*, vol. 15, no. 6, p. 9, 2015, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/319036249_Bioadsorcion_de_Cromo_VI_en_solucion_acuosa_por_Asperrgillus_niger.
- [55] INCAP, *Pulpa de café composición tecnología y utilización*. Bogotá: CIID, 1979.

- [56] N. Rodríguez, “Producción de alcohol a partir de la pulpa de café,” *Rev. Cenicafé*, vol. 64, no. 2, pp. 78–93, 2013, [Online]. Available: [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064\(02\)78-93.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064(02)78-93.pdf).
- [57] N. Reyes and B. Mendieta, “Determinacion del valor nutritivo de los alimentos,” Universidad nacional agraria, 2000.
- [58] E. Armas, N. Cornejo, and K. Murcia, “Propuesta para el aprovechamiento de los subproductos del beneficiado del café como una alternativa para la diversificación de la actividad cafetalera y aporte de valor a la cadena productiva,” Universidad del salvador, 2008.
- [59] N. Fierro-Cabrales, A. Contreras-Oliva, O. González-Ríos, E. S. Rosas-Mendoza, and V. Morales-Ramos, “Caracterización química y nutrimental de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.),” *Agroproductividad*, vol. 11, no. 4, pp. 9–13, 2018, [Online]. Available: <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/261>.
- [60] L. S. Torres-Valenzuela, K. G. Martínez, J. A. Serna-Jimenez, and M. C. Hernández, “Drying of coffee pulp: Process parameters, mathematical model and its effect over physicochemical properties,” *Inf. Tecnol.*, vol. 30, no. 2, pp. 189–200, 2019, doi: 10.4067/S0718-07642019000200189.
- [61] A. Chumo and C. San Martin, “Extracción de taninos de la borra de café mediante lixiviación soxhlet,” Universidad de Guayaquil, 2017.
- [62] D. L. Albarracín Suárez, “Aprovechamiento agroindustrial de la pulpa y cascarilla del café (*coffea arábica*) variedad caturra en el noroccidente de Pichincha,” Universidad De Las Américas, 2018.
- [63] M. D. R. Félix Zamora, “Determinación de ácidos clorogénico y cafeico, cafeína, polifenoles totales y actividad antioxidante de tres variedades de café (*coffea arabic* L.),” Universidad nacional agraria de la selva, 2009.
- [64] D. Arenas, “Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de cafe,” Pontificia Universidad Javeriana, 2009.

- [65] J. G. Figueroa Hurtado and J. Abarca Mendoza, “Comunicación Cuantificación de minerales K , Ca , Mg y P en pulpa y pergamino de café (Coffea arabica L . var . Typica) pulp and parchment,” *Rev. Venez. Cienc. y Tecnol. Aliment.*, vol. 1, no. 2, pp. 221–230, 2010, doi: ISSN: 2218-4384.
- [66] J. Rubio and J. Pineda, “Composición pulpa de café,” *Cenicafé*, no. 07; 09, pp. 61–76, 1973, [Online]. Available: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/805/1/arc024%2803%2961-76.pdf>.
- [67] G. Blandon Castaño, N. Rodríguez Valencia, and M. T. Dávila Arias, “Caracterización Microbiológica y físico-química de los subproductos del beneficio del café en proceso de compostaje,” *Cenicafé*, vol. 49, no. 3, pp. 169–185, 1998, [Online]. Available: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/753/3/arc049%2803%29169-185.pdf>.
- [68] L. Pastrana, “Fundamentos De La Fermentación En Estado Sólido Y Aplicación a La Industria Alimentaria,” *Cienc. y Tecnol. Aliment.*, vol. 1, no. 3, pp. 4–12, 1996, doi: 10.1080/11358129609487556.
- [69] G. Bou, A. Fernández-Olmos, C. García, J. A. Sáez-Nieto, and S. Valdezate, “Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología,” in *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, vol. 29, no. 8, E. Cercenado and R. Cantón, Eds. España, 2010, pp. 1–52.
- [70] G. Bou, A. Fernández-Olmos, C. García, J. A. Sáez-Nieto, and S. Valdezate, “Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología,” *Enferm. Infecc. Microbiol. Clin.*, vol. 29, no. 8, pp. 601–608, 2011, doi: 10.1016/j.eimc.2011.03.012.
- [71] B. Elena and V. Duque, “Aplicación de diferentes técnicas analíticas para evaluar la contaminación fungica de alimentos y superficie.,” Universidad Autonoma de Barcelona, 2007.
- [72] N. Garzón Grajales, “Caracterización e identificación molecular de hongos de suelo aislados de los páramos de guasca y cruz verde,” Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
- [73] F. Accensi, “Aportación al conocimiento de *Aspergillus* sección *Nigri*,” Universidad

autronoma de barcelona, 2000.

- [74] E. Schuster, N. Dunn-Coleman, J. Frisvad, and P. Van Dijck, "On the safety of *Aspergillus niger* - A review," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 59, no. 4–5, pp. 426–435, 2002, doi: 10.1007/s00253-002-1032-6.
- [75] M. L. Abarca, "Taxonomia E Identificacion," pp. 79–84, 2000, [Online]. Available: <http://www.reviberoammicol.com/2000-17/S79S84.pdf>.
- [76] S. Gómez-Bertel *et al.*, "Evaluación de tres hongos lignolíticos y de *Aspergillus niger* como alternativa para el tratamiento de aguas residuales del curtido de pieles," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 24, no. 3, pp. 93–106, 2008, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000300001.
- [77] N. M. Gomez Delgado and T. C. Sánchez Cuesta, "Revisión de eficiencia de hongos ligninolíticos en la biodegradación y adsorción de los metales pesados en aguas residuales textiles," Universidad Peruana Union, 2020.
- [78] X. Deng, L. Chai, Z. Yang, C. Tang, Y. Wang, and Y. Shi, "Bioleaching mechanism of heavy metals in the mixture of contaminated soil and slag by using indigenous *Penicillium chrysogenum* strain F1," *J. Hazard. Mater.*, vol. 248–249, no. 1, pp. 107–114, 2013, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.12.051.
- [79] L. M. Chapoñan Moreno and Y. Y. Medina Cueva, "Eficiencia de la remoción de Cr⁶⁺ por microorganismos aislados de raíces de plantas tolerantes al ion metálico en humedales de flujo subsuperficial," Universidad nacional Pedro Ruiz Gallo, 2016.
- [80] C. D. Villaveces Palacio, "Biorremediación usando el hongo *aspergillus niger* en el tratamiento de aguas residuales," Universidad Nacional Nueva Granada, 2019.
- [81] G. Duca, C. Nuñez, A. Navarro I, and M. Rubio M, "Biorremediación de níquel (ii) en solución acuosa por *aspergillus niger* gc1," *Boletín Micológico*, vol. 27, no. 1, pp. 3–7, 2012, doi: 10.22370/bolmicol.2012.27.1.889.
- [82] E. Santos and J. Vargas, "Remoción de Arsénico (V) en Solución Acuosa por Biomasa Modificada del Hongo *Aspergillus niger* Removal of Arsenic / V) in Aqueous Solution by

- Modified Fungal Biomass of *Aspergillus niger*,” *Inf. Tecnológica*, vol. 28, no. V, pp. 45–52, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600006>.
- [83] D. Park, Y. S. Yun, J. H. Jo, and J. M. Park, “Mechanism of hexavalent chromium removal by dead fungal biomass of *Aspergillus niger*,” *Water Res.*, vol. 39, no. 4, pp. 533–540, 2005, doi: 10.1016/j.watres.2004.11.002.
- [84] Y. Khambhaty, K. Mody, S. Basha, and B. Jha, “Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*,” *Chem. Eng. J.*, vol. 145, no. 3, pp. 489–495, 2009, doi: 10.1016/j.cej.2008.05.002.
- [85] R. O. Cañizares-Villanueva, “Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana,” *Rev. Latinoam. Microbiol.*, vol. 42, no. 3, pp. 131–143, 2000, [Online]. Available: <https://www.medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2000/mi003f.pdf>.
- [86] D. L. Gómez Aguilar, J. P. Rodríguez Miranda, J. A. Esteban Muñoz, and Jhon F. Betancur, “Processes of Pulp: A Sustainable Alternative Removal of Cr,” no. VI, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/pr7070403>.
- [87] J. G. Sandana Mala, B. U. Nair, and R. Puvanakrishnan, “Bioaccumulation and biosorption of chromium by *Aspergillus niger* MTCC 2594,” *J. Gen. Appl. Microbiol.*, vol. 52, no. 3, pp. 179–186, 2006, doi: 10.2323/jgam.52.179.
- [88] B. Ren, Q. Zhang, X. Zhang, L. Zhao, and H. Li, “Biosorption of Cr(vi) from aqueous solution using dormant spores of *Aspergillus niger*,” *RSC Adv.*, vol. 8, no. 67, pp. 38157–38165, 2018, doi: 10.1039/c8ra07084a.
- [89] M. P. Marin Cortez, A. Robledo Olivo, A. V. Charles Rodríguez, S. González Morales, and N. Camposeco Montejo, “Evaluación del crecimiento de *Aspergillus niger* en un medio de cultivo líquido,” *Sci. Technol. Educ. Res. Vol.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: ISSN 2007-8102.
- [90] M. Raimbault and D. Alazard, “Culture method to study fungal growth in solid fermentation,” *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 9, no. 3, pp. 199–209, 1980, doi:

10.1007/BF00504486.

- [91] R. Duran Barón, A. C. Domingo Reyes Pedrozo, Manuel Nieves Ariza, J. Mazo Zambrano, and J. Augusto Torres, “Obtención de extracto de fructooligosacáridos mediante fermentación sumergida y en estado sólido con *Aspergillus niger* usando pulpa de café y tusa de maíz, para uso en un yogur,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 1, no. 7, pp. 45–49, 2020, [Online]. Available: <http://fundacionlasirc.org/images/Revista/REVISTALASIRCVolumen1.No.7.pdf>.
- [92] M. Molina, O. R. Lechuga, and R. Bressani, “Valor nutritivo de la pulpa de café sometida a fermentación sólida usando *Aspergillus niger* en pollos y cerdos,” *Agron. Mesoam.*, vol. 1, p. 79, 2016, doi: 10.15517/am.v1i0.25350.
- [93] L. Ramírez-Velasco, M. A. Armendáriz-Ruiz, J. Arrizon, J. A. Rodríguez-González, and J. C. Mateos-Díaz, “Liberation of caffeic acid from coffee pulp using an extract with chlorogenate esterase activity of *Aspergillus ochraceus* produced by solid state fermentation,” *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 15, no. 2, pp. 503–512, 2016, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/306208874_Liberation_of_caffeic_acid_from_coffee_pulp_using_an_extract_with_chlorogenate_esterase_activity_of_AspERGILLUS_ochraceus_produced_by_solid_state_fermentation.
- [94] ramírez velasco Lorena, “Caracterización bioquímica de una clorogenato esterasa producida por fermentación en medio sólido sobre residuos de café,” CIATEJ, 2009.
- [95] M. Parzanese, “Fermentación En Sustrato Sólido : Aprovechamiento De Subproductos De La Agroindustria,” 2016. [Online]. Available: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/sectores/tecnologia/Ficha_27_Fermentacion_en_sustrato_solido_para_el_aprovechamiento_de_subproductos_de_la_agroindustria.pdf.
- [96] N. del P. Aguirre Ótalora, “Determinación del efecto de algunas fuentes de carbono y nitrógeno, del pH y de la actividad de agua sobre el desarrollo de *Nomuraea rileyi*,” Pontificia Universidad Javeriana, 2006.

- [97] A. Sluiter *et al.*, “Determination of Extractives in Biomass Laboratory Analytical Procedure (LAP) Issue Date : 7 / 17 / 2005 Determination of Extractives in Biomass Laboratory Analytical Procedure (LAP),” 2008. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42619.pdf>.
- [98] W. Penaloza, M. R. Molina, R. G. Brenes, and R. Bressani, “Solid-State Fermentation : an Alternative to Improve the Nutritive Value of Coffee Pulp,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 49, no. 2, pp. 388–393, 1985, doi: 0099-2240/85/020388-06\$02.00/0.
- [99] L. P. S. Vandenberghe, C. R. Soccol, A. Pandey, and J. Lebeault, “Solid-state fermentation for the synthesis of citric acid by *Aspergillus niger*,” *Bioresour. Technol.*, vol. 74, pp. 7–10, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00107-8).
- [100] H. Anzola, D. Beltrán, F. E., E. de Leal, and C. Poveda, “Digestibilidad y energía digestible de la pulpa de cafe fermentada con *Aspergillus niger* en cerdos,” *Rev. ICA*, vol. 24, 1989, [Online]. Available: <https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/35397/16519.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [101] M. T. y G. V. S. Roussos, A. Aquihuatl, J. Cassaigne, E. Favela, M. Gutiérrez, L. Hannibal, S. Huerta, G. Nava, M. Raimbault, W. Rodriguez, J. Salas, R. Sánchez, “Detoxificación de la pulpa de cafe por fermentación sólida,” no. January, p. 6, 1989, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/32982100_Detoxificacion_de_la_pulpa_de_cafe_por_fermentacion_solid.
- [102] H. Correa Rivero, “Aspectos fundamentales de las fermentaciones en estado sólido (FES),” *Cent. Nac. Sanid. Agropecu.*, pp. 1–9, 2005, doi: 10.13140/RG.2.2.33346.43208.
- [103] M. A. Santis Navarro, “Estudio De Producción De Lipasas Por Fermentación En Estado Sólido a Partir De Residuos Ricos En Grasas. Impacto Ambiental Y Posibles Usos,” Universidad Autónoma de Barcelona, 2013.
- [104] M. A. Moyano Bautista, “Fermentación en estado sólido (fes) de la papa (*Solanum Tuberosum*), como alternativa tecnológica para la alimentación animal,” Universidad

Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), 2014.

[105] G. y S. BAYER, EBEN; MCINTYRE, “Método para producir materiales en crecimiento y productos hechos con los mismos 30,” 2 574 152, 2016.

ANEXOS

ANEXO (A)

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un análisis elemental y proximal de la pulpa de café para determinar los valores exactos que contiene la materia prima en cuanto a la composición de las sustancias de utilidad para el crecimiento del microorganismo. Esto con el fin de poder añadir un buen complemento nutricional a la hora de obtener un buen desarrollo micelial o aumento de esporas en la fermentación sólida según sea el caso.

Para la recolección del sustrato se aconseja que proceda de una misma zona para obtener homogeneidad en cuanto a las propiedades fisicoquímicas que la caracterizan.

Indagar cuales son las concentraciones de taninos, polifenoles y cafeína que pueden llegar a ser tóxicas en aguas naturales y verificar en cuanto disminuyen estos compuestos luego de efectuar la fermentación en estado sólido, finalmente determinar si estos valores resultantes siguen siendo contaminantes para el ecosistema si por el contrario no causan efecto.

Se sugiere llevar a cabo pruebas de remoción de los metales pesado en un agua residual sintética utilizando tanto la biomasa residual (Pulpa de café), como de la biomasa fúngica (*Aspergillus niger*) en ambos estados, con el fin de determinar la eficiencia de cada una y a su vez un punto de comparación.

Una vez se obtenga el bioadsorbente se deben ejecutar pruebas en agua residual sintética para comprobar que estado es más eficiente, y así poder realizar una comparación para cuando se lleve a un cuerpo de agua residual real de una industria.

Una vez se obtiene el bioadsorbente se deben efectuar pruebas con el fin de encontrar el número máximo de ciclos que puede llegar a resistir la biomasa, e indagar su disposición final y si es posible la recuperación del metal y regeneración de la biomasa.

Realizar el estudio y construcción de las isothermas y cinética de absorción de la biomasa fúngica (*Aspergillus niger*), biomasa residual (pulpa de café) y de la asociación entre ellas (bioadsorbente), con el fin de analizar su capacidad de adsorción, el proceso de desorción.

Se debe tener en cuenta variables como el caudal, la zona y demás condiciones propicias del efluente para lograr un correcto dimensionamiento de las láminas del bioadsorbente y establecer el tiempo de adsorción, tiempo de saturación, concentración máxima de adsorción y número de ciclos. Esto con el fin de determinar la disposición final del bioadsorbente, su regeneración y recuperación del metal.