



***PRESENCIA, DETECCIÓN, Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVISIÓN DE UNA
DÉCADA DE LITERATURA.***

**Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de
Profesional en Bacteriología y Laboratorio Clínico.**

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
Facultad de Ciencias de la Salud
Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico
Bogotá D.C, Enero de 2019**



***PRESENCIA, DETECCIÓN, Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVISIÓN DE UNA
DÉCADA DE LITERATURA.***

**Monografía para optar al título de Profesional en Bacteriología y Laboratorio
Clínico.**

Investigador principal

JENIFER KATHERINE SÁNCHEZ PEÑA

Asesor(a) interno(a)

JOVANNA ACERO GODOY M.Sc.

Bacterióloga y laboratorista clínico

UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA

Facultad de Ciencias de la Salud

Programa de Bacteriología y Laboratorio Clínico

Bogotá D.C, Enero de 2019

DEDICATORIA

A Dios.

Por sus infinitas bendiciones, por cada día que dedique a dar este gran paso, siempre con el objetivo de aportar a la sociedad, soñando con un mundo mejor.

A mi hijo

Alan Jacob.

Mi fuente de inspiración, orgullo y grandeza, agradezco por su paciencia, por soportar mis ausencias y comprender paso a paso este proceso.

A mis padres

Humberto y Rosalba.

Por el apoyo incondicional por sus valores y motivación constante, por su esfuerzo invaluable en la construcción de mi carrera profesional

A mi esposo

Luis.

Por brindarme siempre un abrazo, una palabra de aliento, por su infinito amor, por ser un guía en mi vida, por creer en mis capacidades al no permitir que me rindiera en ningún momento.

¡Gracias a ustedes!

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora

Msc. Jovanna Acero Godoy

Por ofrecerme todas las herramientas académicas, humanas y su empeño profesional para el desarrollo de esta investigación

A mi Alma Mater

Universidad colegio Mayor de Cundinamarca

Por ser parte fundamental de mi formación profesional

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	14
LISTA DE FIGURAS.....	17
LISTA DE FORMULAS	19
LISTA DE ANEXOS	1
GLOSARIO	1
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. ANTECEDENTES	4
4. MARCO TEORICO.....	8
4.1. Marco legal.....	8
4.2. Agua residual	11
4.3. Propiedades fisicoquímicas del agua residual	11
4.3.1. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	12
4.3.2. Demanda Química de oxígeno (DQO)	13
4.3.3. OD (Oxígeno Disuelto)	14
4.4. Metales pesados	18
4.4.1. Efectos de los metales pesados sobre la salud	22
4.5. DETECCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS.....	26
4.5.1. Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).....	26

4.5.2. Espectrofotometría de Absorción Atómica por Generación Continua de Hidruros (HG-AAS)	26
4.5.3. Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama (FAAS)	28
4.5.4. Espectroscopia de Absorción Atómica- Horno de grafito (EAA-HG) ..	29
4.5.5. Espectrometría de Fluorescencia Atómica (AFS).....	31
4.5.6. Espectrometría de Absorción Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).....	32
4.5.7. Voltamperometria de redisolución anódica y catódica.	32
4.6. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) ..	34
4.6.1. Cribado.....	36
4.6.2. Sedimentación	36
4.6.3. Neutralización	37
4.6.4. Coagulación – Floculación	37
4.7. Tratamientos convencionales empleados en la remoción de metales pesados	37
4.7.1. Filtración por membrana	37
4.7.2. Nanofiltración	38
4.7.3. Intercambio iónico	38
4.7.4. Adsorción (convencional)	39
4.7.5. Precipitación química	40
4.7.6. Decantación	40
4.7.7. Tratamiento secundario (no convencional) de aguas residuales	41
4.8. Tratamientos biológicos por metabolismo aerobio	42
4.7.1. Lodos activados	43
4.7.2. Filtros percoladores.....	46

4.7.3.	Biodiscos.....	47
4.8.	Tratamientos biológicos por metabolismo anaerobio	50
4.8.1.	Digestión anaerobia mesófila	51
4.9.	Tratamientos no convencionales de aguas residuales.....	53
4.9.1.	Hidrogeles	53
4.9.2.	Ceniza Volante	53
4.10.	Biorremediacion	54
5.	METODOLOGIA.....	64
5.1.	Tipo de investigación.....	64
5.2.	Recopilación de la información	64
5.2.1.	Revisión de Artículos.....	64
5.3.	Criterios de inclusión	64
6.	RESULTADOS	65
7.	RESULTADOS MÁS RELEVANTES OBTENIDOS DE LOS DOCUMENTOS REVISADOS	70
7.1.	Cuantificación.....	70
7.2.	Métodos de detección	77
7.3.	Quelación y remoción por tratamientos primarios	81
7.4.	Quelación y remoción por tratamientos convencionales	82
7.5.	Remoción por tratamientos secundarios biológicos aerobios	85
7.6.	Remoción por tratamientos no convencionales.....	89
7.7.	Tratamientos de biorremediacion	90
8.	DISCUSION.....	97
9.	CONCLUSIONES.....	106

10. REFERENCIAS.....	109
ANEXOS.....	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco legal vigente en cuanto a disposición del recurso hídrico en Colombia.	9
Tabla 2. Metales pesados y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas, (ARD) y de las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD), de los prestadores del servicio público de alcantarillado en Colombia.	10
Tabla 3. Límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal en México en mg/L.....	10
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del agua.....	16
Tabla 5. Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.	19
Tabla 6. Métales pesados y valores límite de As en lodos de aguas residuales para uso agrícola (mg. Kg-1).....	22
Tabla 7. Dosis de referencia (RfD) y factor dependiente cancerígeno (SF) para diferentes metales pesados.....	23
Tabla 8. Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos (NCM) establecidos por (USEPA) y por la legislación colombiana.....	24
Tabla 9. Límites de detección y longitud de onda predilecta en la detección y cuantificación de metales pesados por (FAAS).....	29
Tabla 10. Géneros de microorganismos involucrados en el proceso de tratamiento de aguas residuales por lodos activados.	45
Tabla 11. Características principales de tratamientos biológicos aerobios (Lodos activados, Filtro percolador y Biodiscos).	48
Tabla 12. Rendimientos de depuración en diferentes tipos de lagunaje.	50
Tabla 13. Microorganismos utilizados en la remoción de metales pesados de sitios contaminados.	56
Tabla 14. Materiales biosorbentes usados para la adsorción de metales pesados.	59
Tabla 15. EPS bacterianos comerciales y su microorganismo de origen.	60
Tabla 16. Biosorción de metales por diferentes biosorbentes microbianos.....	62
Tabla 17. Ventajas y desventajas de Espectrometría de Absorción Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).....	68

Tabla 18. Ventajas y desventajas de los mecanismos de captación de iones metálicos. Ojo sopesa si podría ser un resultado.....	69
Tabla 19. Concentración de metales pesados en agua influente y efluente de las PTAR`S y ER (Eficiencia de Remoción).	70
Tabla 20. Valores de los parámetros físicos y químicos y metales traza en los influentes y efluentes de la PTAR Atapaneo.....	71
Tabla 21. Concentraciones de metales pesados (mg / kg) en lodos de alcantarillado de 9 EDAR de Shanxi, China.....	72
Tabla 22. Análisis de aguas residuales recolectadas de diferentes regiones industriales de Egipto.	73
Tabla 23. Concentración de metales pesados en lodos deshidratados de 2 PTAR`S Bursa – Turquía. Al y Fe Total como metales más abundantes.	74
Tabla 24. NCM (Niveles de Contaminación Máximos) de metales pesados según FAO-OMS.	75
Tabla 25. Concentración de metales pesados hallados en PTAR área minera en.....	75
Tabla 26. Metales pesados en afluentes captados en PTAR en diferentes países.	77
Tabla 27. Límites de detección por espectrofotometría de fluorescencia en plantas de tratamiento de aguas residuales en Shanxi, China.	79
Tabla 28. Límites de detección de ICP (“Inductively Coupled Plasma”) Pekin Elmer Optima 5300.....	80
Tabla 29. Comparación de resultados del método voltametrico OSWV frente al método de referencia EAA (espectrometría de Absorción Atómica)	81
Tabla 30. Remoción de metales pesados mediante Coagulación-Floculación.....	81
Tabla 31. Caracterización de aguas residuales sin procesar producto de la obtención de perfiles de aluminio.....	82
Tabla 32. Condiciones y eficiencia de remoción de filtración por membrana y precipitación química.....	82
Tabla 33. Técnica de Nanofiltración en diferentes estudios.....	83
Tabla 34. Eficiencias de remoción de metales pesados empleando técnicas de precipitación química.	83
Tabla 35. Condiciones experimentales de algunos carbones implementados como absorbentes en varios estudios	84

Tabla 36. Adsorción o eliminación de metales pesados, utilizando residuo industrial, desechos agrícolas y minerales.....	84
Tabla 37. Análisis de sustancias de interés sanitario del lixiviado de la Pradera	86
Tabla 38. Revisión: recuperación de metales pesados de fuentes de desechos y aguas residuales por medio de biodiscos.....	87
Tabla 39. Empleo de hidrogeles para remover metales pesados y sus condiciones experimentales.....	89
Tabla 40. Condiciones experimentales de absorción de metales pesados con cenizas volantes.....	90
Tabla 41. Eficiencia de remoción de metales pesados en experimentos llevados a cabo en ausencia y / o presencia de EPS, con o sin microorganismos	91
Tabla 42. Representación comparativa de la eficiencia de biosorción (%) de diversos metales pesados Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Zn ²⁺ en diferentes sistemas de metal por los aislamientos biosorbentes de Actinomicetos.....	93
Tabla 43. Efecto de la dosificación de biosorbente sobre la eficiencia de remoción (%) de metales pesados (Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Zn ²⁺) por biomasa muerta de Nocardiosis sp. MORSY1948 y Nocardia sp. MORSY2014 (44).....	93
Tabla 44. Efecto de la dosificación de biosorbente sobre la eficiencia de remoción (%) de metales pesados (Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Zn ²⁺) por biomasa muerta de Nocardiosis sp. MORSY1948 y Nocardia sp. MORSY2014.....	94
Tabla 45. Genes que codifican resistencia a metales pesados en bacterias y protozoos.	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Lesiones en piel, Arsenicosis</i>	25
Figura 2. El ataque de metales pesados sobre una célula y el equilibrio entre la producción de ROS y la posterior defensa presentada por antioxidantes	25
Figura 3. Método de determinación de Arsenico inorgánico por generación de Hidruros	27
Figura 4. Metodología Espectrofotometria de Absorción Atómica de Llama.....	29
Figura 5. Sistema de obtención de átomos en estado fundamental en EAA con Horno de Grafito(49)	30
Figura 6. Diagrama general de tratamiento de aguas residuales	35
Figura 7. Balance del Carbono como elemento químico, del metabolismo aerobio en tratamientos biológicos de aguas residuales(64).	43
Figura 8. Las 2 etapas del tratamiento biológico de tipo “Lodos Activados”	45
Figura 9. Estructura modelo de filtro percolador.....	46
Figura 10. Sistema de tratamiento con Biodiscos (biomasa fija)	47
Figura 11. Tipos de lagunaje según su atmosfera.....	49
Figura 12. Balance del Carbono como elemento químico, del metabolismo aerobio en tratamientos biológicos de aguas residuales.....	51
Figura 13. Fundamento digestión anaeróbica	52
Figura 14. Distribución porcentual de las principales aplicaciones de cenizas volantes. .	53
Figura 15. Mecanismos de biosorción basados en: A) dependencia del metabolismo celular; B) ubicación celular donde ocurre la remoción del metal.....	55
Figura 16. Sitios activos de unión a iones metálicos en proceso de intercambio iónico mediado por bacterias.	56
Figura 17. Mecanismos de absorción de metales pesados por microorganismos.	58
Figura 18. Diagrama comparativo entre bioacumulación y bioadsorción mediada por microorganismos.	58
Figura 19. Numero de documentos revisados por año entre los años 2008-2018.....	66
Figura 20. Idioma de publicación de los documentos consultados.....	66
Figura 21. Bases de datos científicas consultadas.....	66
Figura 22. Eje central de investigación de cada documento revisado.	67

Figura 23. a. Concentración de metales pesados en agua afluyente a PTAR`S 1 Y 2 b. Concentración de metales pesados en agua efluente de PTAR`S 1 (East – Este) Y 2 (West- Oeste)	74
Figura 24. (a) Concentraciones de metal promedio en influente mg/L (b) Eficiencia promedio de eliminación de metal en efluente.	76
Figura 25. (a) Efecto de diferentes temperaturas en la capacidad de biosorción de Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ y Zn ²⁺ (%) a partir de la solución acuosa por las células vivas y muertas de Nocardiosis sp.MORSY1948. (b) Efecto de las diferentes temperaturas sobre la capacidad de biosorción de Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ y Zn ²⁺ (%) a partir de una solución de resolución por las células vivas y muertas de Nocardia sp.MORSY2014.....	95

LISTA DE FORMULAS

Fórmula 1. Reacción química: oxidación de materia orgánica, en la determinación de DQO.	14
Fórmula 2. Intercambio iónico en resinas que poseen grupos de ácido sulfónico	39
Fórmula 3. Intercambio iónico en resinas que poseen grupos de ácido carboxílico	39
Fórmula 4. Balance de carbono en el tratamiento aerobio	43

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Comparación de la normatividad internacional, valores máximos permisibles de metales pesados (mg/L) en efluentes de aguas residuales.....	127
Anexo 2. Metales pesados, sus fuentes, vías de exposición, implicaciones clínicas y Valores Máximos Admisibles según Decreto 0631 de 2015 (Colombia)	129
Anexo 3. Toxicidad de metales pesados a formas de vida (plantas y microorganismos)	131

GLOSARIO

- **Absorción:** proceso por el cual una sustancia (absorbido) es tomada e incorporada en otra sustancia (absorbente).
- **Acuicultura:** cultivo de la flora o fauna acuática con fines comerciales, de investigación o de conservación, empleando métodos y técnicas especializadas en ambientes acuáticos naturales o artificiales
- **Acuíferos:** formación geológica de la corteza terrestre en la que se acumulan las aguas infiltradas, de afluencia o de condensación
- **Adsorción:** la adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.
- **Aerobio:** organismo que necesita de oxígeno para vivir.
- **Afluente:** curso de agua residual cruda
- **Agua:** líquido inodoro, incoloro e insípido, ampliamente distribuido en la naturaleza. Representa alrededor del 70% de la superficie de la Tierra. Componente esencial de los seres vivos. Está presente en el planeta en cada ser humano, bajo la forma de una multitud de flujos microscópicos.
- **Agua potable:** agua apta para el consumo humano sin riesgo para la salud
- **Aguas residuales:** aquellas procedentes de cualquier actividad humana, las cuales, según la fuente, pueden ser: industriales, agrícolas o de uso doméstico, entre otras. También se les denomina efluentes.
- **Agua superficial:**
- **Alcantarillado:** red de tuberías que recogen y transportan aguas pluviales y residuales a una planta de tratamiento de aguas
- **Algas:** organismos uní o pluricelulares, autótrofos fotosintéticos, casi en su totalidad acuáticos de agua dulce y marino. Son responsables del grueso de la

productividad primaria en los ecosistemas acuáticos y del aporte de oxígeno al agua y a la atmósfera.

- **Anaerobio:** organismo que puede desarrollarse en ausencia total de oxígeno libre.
- **Anión:** un anión es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica negativa, es decir, con exceso de electrones. Los aniones se describen con un estado de oxidación negativo.
- **Ánodo:** electrodo positivo
- **Antropogénico:** de origen humano, humanizado, opuesto a lo natural.
- **Bacterias:** microorganismos unicelulares procariontes, que se multiplican por división simple. Muchas son heterótrofas, responsables de la putrefacción de la materia orgánica y de las fermentaciones. Otras son autótrofas fotosintéticas o quimio sintéticas. Pueden ser de vida libre, simbióticas o patógenas responsables de enfermedades en el hombre y otros seres vivos.
- **Bacterias autótrofas:** las que tienen la facultad de alimentarse a sí mismas a partir de sustancias inorgánicas.
- **Biodegradable:** residuo que puede ser descompuesto en sustancias inorgánicas por la acción de microorganismos como las bacterias o los hongos.
- **Biomasa:** volumen o masa total de todos los organismos vivientes de una zona particular, una comunidad o un ecosistema.
- **Biopelícula:** organizaciones microbianas compuestas por microorganismos que se adhieren a las superficies gracias a la secreción de un exopolímero
- **Carcinógeno:** cualquier sustancia o agente capaz de desencadenar un cáncer en las células sanas
- **Catión:** un catión es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva, es decir, ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo.
- **Cátodo:** electrodo negativo

- **Coliformes:** grupo de bacterias aerobias y facultativamente anaerobias. Habitantes típicos del intestino grueso humano y animal.
- **Coloidal:** Cuerpo que al disgregarse en un líquido aparece disuelto por la extremada pequeñez de las partícula en que se divide
- **Contaminación:** presencia de sustancias exógenas en los sistemas naturales, los agroecosistemas o los ecosistemas humanos, que ocasionan alteraciones en su estructura y funcionamiento.
- **Decantación:** proceso en el cual ocurre la separación de un sólido o líquido denso de otro fluido.
- **Degradación:** término aplicado a cualquier proceso de transformación de un sistema, orden, estructura o sustancia compleja, a un nivel inferior. Así tenemos la degradación geológica, biológica (biodegradación), química o entrópica
- **Desechos:** se aplica a todo producto residual, proveniente de la industria, la agricultura, el hogar, el comercio.
- **Desinfección:** proceso físico o químico que mata o inactiva agentes patógenos tales como bacterias, virus y protozoos
- **Desnitrificación:** es la transformación biológica del nitrato en gas nitrógeno, óxido nítrico y óxido nitroso.
- **Detección:** es la cantidad mínima de una sustancia (definida en término de cantidad absoluta o concentración) que proporciona una respuesta medible para un método descrito.
- **Disposición Final:** fase mediante la cual se dispone en forma definitiva, sanitaria y ambientalmente segura, los residuos y desechos sólidos. La disposición final de los desechos recolectados es el eslabón final de la cadena de saneamiento ambiental y consiste en toda operación de eliminación de residuos y desechos que impliquen la incorporación de los mismos a cuerpos receptores, previo tratamiento obligatorio en los casos que así correspondan.

- **Ecosistema:** conjunto o sistema formado por una o más comunidades bióticas (seres vivos) con el medio físico (recursos abióticos) que le rodea, en un espacio y escala determinada.
- **Efluente:** descarga de desecho de naturaleza gaseosa, líquida o sólida que se libera al medio ambiente, esté o no depurado.
- **Electrodo:** conductor eléctrico
- **Elemento traza:** cualquier elemento que está presente en el medio en concentraciones muy bajas
- **Endotérmico:** se denomina reacción endotérmica a cualquier reacción química que absorbe energía
- **Escorrentía:** movimiento superficial de aguas continentales no encauzadas a favor de la pendiente. La forma de movimiento del agua puede ser laminar, turbulenta o de arroyada. Se produce cuando el agua de la lluvia y de los deshielos recorre la superficie de la tierra y se introduce bajo la capa vegetal.
- **Especificidad:** habilidad de un método para responder exclusivamente a la sustancia que se desea analizar.
- **Exactitud:** es la cercanía del valor analítico al "valor verdadero" de concentración del compuesto de interés en el material bajo examen.
- **Fluorescencia:** propiedad que tienen algunas sustancias de reflejar luz con mayor longitud de onda que la recibida.
- **Fotosíntesis:** proceso bioquímico que tiene lugar en las plantas verdes y en el que la energía de la luz del sol se transforma y almacena en forma de energía química.
- **Galvanoplastia:** es el proceso en el que, por medio de la electricidad, se cubre un metal sobre otro; a través de una solución de sales metálicas (electrólisis).
- **Hongo:** organismos pluricelulares o unicelulares que juegan un papel importante en el proceso de degradación de la naturaleza así como en el tratamiento de residuos y de aguas residuales (formación de compost, lodos activos).

- **Inerte:** objeto inanimado que carece de vida.
- **Inorgánico:** cuerpos desprovistos de vida, no organizados, como por ejemplo, los minerales.
- **Límite de detección:** es la concentración más baja a la cual puede detectarse el analito pero no necesariamente cuantificarse.
- **Lixiviación:** separación de los componentes de una mezcla sólida por la acción de un disolvente adecuado.
- **Longitud de onda:** La distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos, necesaria para la cuantificación de un analito.
- **Mesófilo:** organismo cuya temperatura de crecimiento óptima está entre los 15 y los 40°C (un rango considerado moderado). Este término es usado sobre todo en el campo de la microbiología.
- **Metabolismo:** es la suma de todas las reacciones físicas y químicas que suceden en el interior de las células que permiten realizar todas las funciones primordiales para la vida, como respirar, moverse, crecer, reproducirse, realizar la digestión y reaccionar ante distintos estímulos.
- **Metalurgia:** una ciencia y una técnica que consiste en obtener el mineral útil, procesarlo para obtener el metal, fundirlo, darle forma con moldes, y hacerlo más duro o maleable por medio de aleaciones.
- **Nitrificación:** la nitrificación es el proceso a través del cual las bacterias nitrificantes transforman el amonio en nitrato.
- **Orgánico:** sustancia cuyo componente básico estructural molecular, es una cadena de átomos de Carbono. Está presentes en los seres vivos en forma de moléculas biorgánicas, pero también en el petróleo, el carbón y hasta en formas simples en el espacio.
- **Organoléptico:** son todas aquellas descripciones de las características físicas que tiene la materia en general, según las pueden percibir los sentidos, como por ejemplo su sabor, textura, olor, color o temperatura.

- **Osmosis inversa:** migración de moléculas de agua a través de una membrana semipermeable desde la solución concentrada a la solución diluida, bajo una presión mayor que la presión osmótica, permite separar las sales del agua, por lo que se utiliza industrialmente en la desalinización de agua en plantas potabilizadoras.
- **Precisión:** disposición de las medidas alrededor de su valor medio o central y corresponde al grado de concordancia entre ensayos individuales cuando el método se aplica repetidamente a múltiples alícuotas de una muestra homogénea
- **Protozoo:** son los animales más sencillos, por lo general microscópicos. Su protoplasma carece de divisiones, por lo cual se consideran organismos acelulares. Pertenece a los Protistas.
- **Quelación:** método en el que interviene una agente quelante, que secuestra, y es antagonista de metales pesados, es una sustancia que forma complejos con iones de metales pesados. A estos complejos se los conoce como quelatos.
- **Sensibilidad:** capacidad analítica de un ensayo, para detectar la mínima cantidad de analito
- **Tóxico:** sustancia que puede causar perturbaciones sobre una especie animal o vegetal, el medio o el hombre.
- **Vertimiento líquido:** cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o a un alcantarillado.
- **Vertimiento no puntual:** aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al recurso, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares.
- **Vertimiento puntual:** aquel en el cual se puede precisar el punto exacto de descarga al recurso, tal es el caso de vertimientos provenientes de industrias o alcantarillado.



UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGIA Y LABORATORIO CLINICO

***PRESENCIA, DETECCIÓN, Y REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVISIÓN DE UNA
DÉCADA DE LITERATURA.***

RESUMEN

La contaminación ambiental por metales pesados sobre el recurso hídrico y terrestre del planeta, es una gran problemática que compromete la seguridad alimentaria y salud pública mundial. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), captan, tratan y redistribuyen el agua residual de origen doméstico e industrial. Los metales pesados son uno de los contaminantes que presentan mayor resistencia al tratamiento recibido en las PTAR, resultan ser muy difíciles de erradicar de los efluentes hídricos, y de los lodos obtenidos en las PTAR, que son destinados con fines orgánicos y reúso al igual que el agua tratada, generando inseguridad al implementar su uso en actividades agrícolas como el riego. Con esta revisión se pretende conocer la presencia de metales pesados en PTAR`s a nivel global, describiendo los diferentes métodos para su detección, y comparar la eficacia de los métodos de remoción de metales pesados en aguas residuales a nivel global, contemplados dentro de sistemas de tratamiento primario, convencionales, no convencionales y secundarios o

biológicos, con su respectivo fundamento, ventajas y desventajas, Se abordaron casos de estudio y resultados obtenidos en algunos países del mundo incluido Colombia, en un periodo determinado de 10 años (2008-2018). Los metales pesados de interés de detección y eliminación en PTAR son, Cd, As, Pb, Hg, Cr, Cu, Ni y Zn. Cada PTAR, debe seleccionar los métodos de detección y remoción de metales pesados más adecuados en función de la carga contaminante, estructura, normatividad vigente para cada país o región y presupuesto disponible.

Palabras clave: metales pesados, detección de metales pesados, PTAR, toxicidad, aguas residuales, biorremediación, tratamiento de aguas residuales.

1. INTRODUCCION

El agua es un recurso natural universal, el cual debe ser aprovechado bajo políticas de manejo integral, en las que se contemplen el ahorro, la reutilización y la no contaminación del mismo. Por otro lado, el replantear y considerar nuevas tecnologías que permiten el uso sostenible de este recurso, se convierte en una meta inamovible para optimizar y preservar la calidad y cantidad del agua en el mundo. Con el fin de dar cumplimiento a esta meta, organizaciones internacionales como la OMS (2006, Organización mundial de la salud) y la FAO (2017, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) fomentan el reusó de aguas residuales de origen domestico para fines agrícolas, reconociendo que puede generar un riesgo para la salud y el medio ambiente de no ser sometida rigurosamente al tratamiento en una planta de aguas residuales, o por tecnologías no convencionales(1,2).

En algunos países, por ejemplo, México, cerca del 50% de las aguas residuales no logran ser tratadas de manera adecuada y finalmente son utilizadas para el riego de cultivos o son vertidas directamente a cuerpos de agua superficial, causando un problema ambiental mucho más severo. Aguas de origen doméstico y principalmente industrial, aportan grandes cantidades de agentes biológicos, y sustancias químicas, entre estas los metales pesados(3).

La presencia de metales pesados en aguas residuales a causa de descarga directa o indirecta a fuentes de agua superficiales e incluso que son reutilizadas, ha incrementado significativamente sobre todo en países considerados en vía de desarrollo. Este incremento resulta ser preocupante, debido a que los metales pesados son el único contaminante que no es biodegradable en un organismo, produciendo una serie de efectos tóxicos e incluso carcinógenos. Los metales pesados que poseen mayor relevancia al ser removidos en una planta de tratamiento de aguas residuales son el mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), Níquel (Ni), cobre (Cu) y plomo (Pb).

En cuanto a la determinación y detección de metales pesados en aguas residuales, se encuentran disponibles técnicas, con diferentes variaciones metodológicas, con las cuales varios autores buscan comparar su sensibilidad, especificidad, rentabilidad y acciones amigables con el ambiente, partiendo de la técnica de referencia para determinación de metales pesados, la espectrofotometría de Absorción atómica.

En la actualidad existen diversas técnicas empleadas en la remoción de metales pesados en aguas residuales; técnicas convencionales y técnicas no convencionales, las técnicas convencionales se denominan de esta manera debido a que son metodologías empleadas de forma rutinaria en las plantas de tratamiento, mientras que las no convencionales, buscan ser tecnologías innovadoras, que proporcionen alternativas nuevas para la remoción del material contaminante, contemplando la implementación de microorganismos, plantas, algas marinas entre otros. Se consideran métodos convencionales, la filtración por membrana, intercambio iónico, adsorción, precipitación química, electrocoagulación, electrofloculación, coagulación- floculación, flotación y fotocatalisis. Algunas metodologías no convencionales incluyen, biopolímeros, hidrogeles, ceniza volante, adsorción con residuos agrícolas industriales y mineros entre otros.

La presente revisión busca conocer la presencia, de metales pesados en PTAR, así como tratar sobre las técnicas de detección y remoción de metales pesados encontrados en PTAR`S durante los últimos 10 años, resaltando sus ventajas y desventajas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica de los últimos diez años (2008 - 2018), sobre la presencia, técnicas de detección y remoción de metales pesados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la presencia de metales pesados en plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel global durante los últimos diez años (2008-2018).
- Describir los diferentes métodos implementados en la detección de metales pesados en plantas de tratamiento aguas residuales a nivel global durante los últimos diez años (2008-2018).
- Comparar la eficacia de las técnicas de remoción de metales pesados en aguas residuales a nivel global durante los últimos diez años (2008-2018).

3. ANTECEDENTES

Cuizano N. & Navarro A. 2008, evaluaron las algas marinas como principales organismos con capacidades mecánicas y químicas de adsorción y biosorción sobre metales pesados. Se ha demostrado que algas como *Undaria pinnatifida* posee 403 mg/metal por gramo de biomasa seca como capacidad de adsorción de plomo (Pb). Así mismo *Ascophyllum* sp con 529,4 mg/MI para Cadmio (Cd) y *Spriullina* spp con 391,8 y 556,4 mg/MI para cobre (Cu) y cromo (Cr) respectivamente. Además mostraron que *Sacharomyces cerevisiae* tiene un potencial similar a las algas mencionadas como biomaterial en biosorción y adsorción de metales pesados(4).

Chávez A, Cristancho D, Ospina E. 2009, presentan una revisión bibliográfica sobre las aguas residuales generadas por industrias galvánicas y muestran la electrocoagulación como proceso óptimo de tratamiento para disminuir los contaminantes propios como microorganismos, aceites, N, P, Sólidos suspendidos y metales pesados (Cd, Cu, Cr, Sn, Ni, Zn), lo cual permitiría recuperar parte de las aguas para reuso, esta técnica presentó un porcentaje total de remoción total del 95% frente a otros métodos(5).

Fenglian Fua y Qi Wangb. 2011, realizaron una revisión bibliográfica tomando como periodo de investigación (1988-2010) basados en alrededor de 185 estudios publicados, sobre tecnologías más utilizadas que permiten la remoción de metales pesados en plantas de tratamiento de aguas residuales, entre estas tecnologías se incluyen: precipitación química, intercambio de iones, adsorción, filtración de membrana (remoción >90% para Cromo Total (CrT) y Níquel (Ni), coagulación-floculación, flotación y métodos electroquímicos. Las concentraciones iniciales halladas fueron: Aluminio (Al) 67–134 (mg/L), Níquel (Ni) 3.2–5.3 (mg/L) y Cromo (Cr) 0.2–1.3 (mg/L). concluyendo que el intercambio iónico, la adsorción y la filtración de membrana son los más estudiados para el tratamiento de aguas residuales de metales pesados(6).

Lasso J. & Ramírez J. 2011, hicieron una aproximación desde una perspectiva ambiental, hidroclimatológica y normativa para determinar el potencial de reúso de aguas residuales para el riego de cultivos de caña de azúcar y palma de aceite en Colombia, el cual se encontró viable, ya que las condiciones climáticas hacen que las aguas residuales sean vistas como un recurso que genera beneficios agronómicos cuyos impactos ambientales son controlables, si se lleva a cabo una adecuada gestión. También resaltaron la importancia de algunos parámetros fisicoquímicos de calidad del agua para riego por gravedad como sólidos disueltos totales (<450 mg/L), pH (6.5 – 8.4) y metales como hierro (<5meq/L) y manganeso (<0,2 meq/L), (7).

Mancilla y colaboradores. 2012, analizaron 91 muestras de agua para riego de Puebla y Veracruz por duplicado, determinándose el potencial hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica (CE), As y metales pesados totales: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn. La determinación de metales pesados se llevó a cabo por la metodología ("Inductively Coupled Plasma") con la cual demostraron que el riesgo de intoxicación era mayor en agua para consumo humano al obtener concentraciones superiores a 20% para Cd, 20% y 2% para mercurio (Hg) y Pb respectivamente en el 50 % de las muestras analizadas; concentraciones que sobrepasan los límites permisibles para estos metales pesados según la legislación de México (SSA 2000). Lograron establecer que un pH ácido reducía la biodisponibilidad de la mayoría de los metales pesados(8).

Londoño. 2016, relaciona la explotación minera, la contaminación producida por la industrialización mundial, el uso desmedido de fertilizantes, organofosforados en la elaboración de insecticidas entre otras, como actividades causantes del elevado aumento de metales pesados biodisponibles en el medio ambiente, como: mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), entre otros(9).

Ates N. y Uzal N. 2017, evaluaron la mejor alternativa de tratamiento y reutilización para las aguas residuales producto del recubrimiento por oxidación anódica para la obtención de aluminio en una planta en Kayseri, Turquía,

utilizando filtración por membrana, con membranas de ultrafiltración (PTUF), nanofiltración (NF270) y ósmosis inversa (SW30) con MWCO 5000, 200-400 y 100 Da, respectivamente. A la vez, los resultados se evaluaron comparando el análisis por precipitación química, tratamiento habitual en la industria del aluminio. La precipitación química, se consideró como el método con menor porcentaje de remoción en cuanto a Al y Cr, siendo menor a 35%. La filtración de membrana experimental podría eliminar eficazmente el aluminio, el cromo total y el níquel (> 90%) de las aguas residuales de producción de aluminio(10).

Duan B. y colaboradores et al. 2017, analizaron la concentración de siete metales pesados (Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, As, Cd) en los lodos de alcantarillado de 9 plantas municipales de tratamiento de aguas residuales (EDAR) en Shanxi, China, con el fin de determinar el riesgo ecológico de los metales pesados en los lodos cloacales. Demostraron que el lodo de alcantarillado de todas las estaciones era seguro para el uso de la tierra con respecto a la presencia de metales pesados, a excepción de 3 estaciones, las cuales se hallaron en emergencia por la elevada concentración de Cr, As y Ni(11).

Macías y colaboradores. 2017, validaron el método de voltamperometría de onda cuadrada (OSWV) para la detección de Cd^{+2} y Pb^{+2} en aguas superficiales de la quebrada Las Torres del sector Parque Industrial en Sogamoso (Colombia). Obtuvieron concentraciones de 0,750 mg/L 0,570 mg/L, para Plomo y Cadmio respectivamente, niveles que sobrepasan los límites máximos establecidos por las normas nacionales (Decreto 4728/2010) e internacionales vigentes para aguas residuales. Estos resultados fueron contrastados con el método de referencia, espectrofotometría de absorción atómica, donde se obtuvo un nivel de confianza del 95% al implementar el método electroquímico voltamperométrico(12).

Feng J. y colaboradores et al. 2018, determinaron las concentraciones de efluentes de nueve metales tóxicos en 12 depuradoras a gran escala en Shanghai, China. Los resultados obtenidos indicaron una disminución en las eficiencias de eliminación de metales pesados del 92% (Cr) al 16,7% (Hg).). A pesar de un

efecto significativo del tratamiento en As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Pb y Zn, con eficiencias de eliminación del 92% (Cr) al 16,7% (Hg), se reflejó un potencial efecto agudo y/o crónico del Cu, Ni, Pb y Zn en la vida acuática y el posible efecto nocivo de As (Arsenicosis) y Mn (fiebre del soldador) en la salud humana, Lo que demuestra que algunos contaminantes, no logran ser removidos en su totalidad y permiten un margen no delimitado sobre el riesgo para la salud (13).

4. MARCO TEORICO

4.1. Marco legal

Existen diferentes normativas y leyes bajo las cuales se rige la calidad del agua, y que permiten garantizar los derechos de la población mundial en cuanto al pleno acceso a un ambiente limpio, sano y apropiado para la satisfacción de las necesidades de saneamiento ambiental. Las tablas 1 y 2 muestran las principales normas aplicadas en Colombia en cuanto Metales pesados y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas, (ARD) y de las Aguas Residuales no Domésticas (*ARnD*), Dichas disposiciones han estado enmarcadas desde el establecimiento de la Constitución política de Colombia de 1991, las cuales deben tener estricto seguimiento por autoridades ambientales pertinentes(14); A nivel internacional, en las Guías sobre el Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura, como documento anexo por OMS (Organización Mundial de la salud) e implementado desde el año 1989, se busca fomentar el uso seguro de aguas residuales y excretas en la agricultura y la acuicultura de una manera que protege la salud de los trabajadores involucrados y del público en general. En esta recopilación, es posible encontrar las disposiciones legales en cuanto a los restringidos reuso del agua residual, así como de sus requerimientos microbiológicos, ambientales y fisicoquímicos para poder aplicar a un sistema de reuso hídrico(15). Otros países como México, Colombia, Guatemala, Costa Rica, Nicaragua, establecen valores máximos permisibles para metales pesados y otros contaminantes de las aguas residuales, respecto a la actividad para la cual de disponga el reuso de estas aguas, así como del tipo de cuerpo receptor (Anexo 1)(16). En la tabla 3 aparecen los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o

municipal en México, uno de los países centroamericanos más contaminados(17).

Tabla 1.Marco legal vigente en cuanto a disposición del recurso hídrico en Colombia.

NORMATIVA	DISPOSICION LEGAL
Constitución política de Colombia de 1991	Art. 79. “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. Es deber del estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”(18)
Constitución política de Colombia de 1991	Art. 80. “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.”(18)
Decreto 3930 de 2010	Se relacionan usos del agua, y disposición de residuos líquidos, en cuanto al ordenamiento y vertimientos al recurso hídrico, al suelo y alcantarillados(19).
Resolución 0631 de 2015	Establece parámetros y valores máximos de contaminantes permitidos en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillado público, provenientes de los sectores Agroindustria, Ganadería, Minería, Hidrocarburos, entre otros(14).
Resolución 1096 de 2000, y resolución 0330 de 2017	Por las cuales se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, RAS(20)

Fuente: Autor

Tabla 2. Metales pesados y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas, (ARD) y de las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD), de los prestadores del servicio público de alcantarillado en Colombia.

Parámetro	Unidades	ARD, ARnD de prestadores del servicio público de alcantarillado, con una carga $\geq 625,00$ kg/día $\leq 3.000,00$ kg/día DBO5	ARD Y ARnD de prestadores del servicio público de alcantarillado, con una $\geq 3.000,00$ kg/día DBO5
Cadmio (Cd)	mg/L	0,10	0,10
Cinc (Zn)	mg/L	3,00	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50	0,50
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50
Plomo (Pb)	mg/L	0,50	0,50

***Tomado de:** Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015. 17 Marzo [Internet]. 2015; 62. Available from: [http://www.fenavi.org/images/stories/estadisticas/article/3167/Resolucion_0631_17_marzo_2015.pdf\(14\)](http://www.fenavi.org/images/stories/estadisticas/article/3167/Resolucion_0631_17_marzo_2015.pdf(14)).

Tabla 3. Límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal en México en mg/L.

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES (MEXICO)			
PARAMETROS	PROMEDIO MENSUAL	PROMEDIO DIARIO	INSTANTANEO
Grasas y aceites	50	75	100
Solidos sedimentables (mg/L)	5	7.5	10
Arsenico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

***Tomado de:** SEMARNAT. Normas Oficiales Mexicanas Normas Oficiales Mexicanas NOM-003-SEMARNAT-1997. Conagua [Internet]. 2013; 1–65. (17).

4.2. Agua residual

Se conoce como agua residual, a todo desecho líquido, producto y residuo de la actividad humana e industrial, también son llamadas aguas servidas. Actividades domésticas, y actividades industriales de diferente índole constituyen el uso total del agua que es vertida a puntos de descarga directa, dentro de las aguas residuales domésticas, producto del desecho de áreas residenciales, comerciales e institucionales, se encuentran las aguas negras, que no son más que aguas residuales que se usan para la descarga y limpieza de inodoros, que permiten el desagüe de desechos biológicos como excretas humanos, que aportan la presencia de compuestos nitrogenados, y de microorganismos intestinales tales como los coliformes fecales, los cuales representan una gran importancia sanitaria a nivel del agua de consumo humano entre otras(21). Las necesidades fisiológicas y de supervivencia humanas, involucran el uso de agua, que al ser utilizada para estos fines, es eliminada y pasa a ser agua residual de origen doméstico. Estas aguas ARD provienen de duchas, y tuberías en donde las grasas corporales, shampoo, jabones, rinses, residuos de lavado de ropas entre otros, de esta manera, se aporta gran parte de la DBO, sólidos suspendidos, fósforo, y coliformes fecales, entre otros al agua residual; este tipo de aguas se denominan aguas grises, y, encajan dentro de la definición de aguas residuales domésticas(21). Las aguas residuales, poseen una caracterización diferente a las que poseen aguas de origen natural superficial, por lo cual es importante conocerlas a la hora de evaluarlas, controlarlas, tratarlas y reusarlas(21,22).

4.3. Propiedades fisicoquímicas del agua residual

En una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se evalúan parámetros de calidad del agua, para conocer su composición, condiciones, y

estado biológico, lo que a su vez ha permitido establecer el uso adecuado de cada recurso hídrico en particular; así mismo permite caracterizar la muestra de agua, lo cual es muy importante a la hora de ejecutar un plan de tratamiento y saneamiento del recurso hídrico, así como de sus posibles usos(22). Un influente y efluente deben ser analizados en una PTAR a través de tres tipos de propiedades generales; físicas, químicas y microbiológicas. Se consideran propiedades fisicoquímicas del agua, el color, olor, DBO₅ (Demanda Biológica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno) OD (Oxígeno Disuelto), presencia de metales pesados entre otras: Estas propiedades, son aquellas que le generan características organolépticas, visuales y metabólicas y tóxicas al agua. en la tabla 4 se relacionan parámetros fisicoquímicos a tener en cuenta en el análisis y tratamiento de aguas residuales (Conductividad, pH, Turbiedad, Sólidos Totales Disueltos (STD, Dureza, Alcalinidad)(23).

4.3.1. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

La Demanda Biológica de Oxígeno, mide el contenido de materia orgánica biodegradable en un cuerpo de agua. La DBO₅ manifiesta el requerimiento de oxígeno por los microorganismos para degradar por medio de oxidación aerobia, el contenido orgánico presente en el agua(24,25). Este parámetro es cuantificable, a una temperatura promedio de 20 ° C (a mayor temperatura menor cantidad de oxígeno), su denominación DBO₅, hace referencia a cinco días de incubación, y cuyos resultados son expresados en mg/L O₂(26). Cuando el agua analizada es residual, la demanda de oxígeno proviene de tres tipos de materiales: Material orgánico, carbónico, que sirve como suministro para el desarrollo y supervivencia de organismos y microorganismos aeróbicos(23).por otro lado el Nitrógeno que deriva de nitritos, amoniaco y, nitrogenados constituyen fuentes de alimento y sustento para bacterias nitrificantes especialmente(25).

Por último los Compuestos químicos reductores (iones ferrosos, sulfitos, sulfuros) que por medio de oxidación le proporcionan requerimientos nutricionales a diferentes organismos, y a su vez le proporcionan características fisicoquímicas y organolépticas al agua; de este modo podría decirse que una agua altamente contaminada, puede tener una mayor demanda biológica de oxígeno (27).

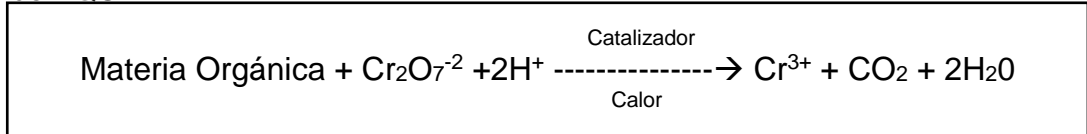
La medición de DBO, es esencial tanto en aguas residuales como superficiales en la elaboración, diseño, evaluación y eficacia de programas de tratamiento biológico, y en el establecimiento de contenido orgánico permitido en una fuente hídrica receptora, en ese contexto se han establecido contenidos menores a 7.0 mg/L en aguas que abastecen acueductos(28). Su cuantificación no tiene relevancia en el análisis de agua potable para consumo humano, debido a que es un indicador de contaminación en aguas residuales, y los niveles de microorganismos en aguas potables deben ser nulos(19).

4.3.2. Demanda Química de oxígeno (DQO)

“La DQO es una medida del oxígeno equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible a oxidación por un oxidante químico fuerte”, como por ejemplo el dicromato de potasio. La transformación de materia orgánica tiene como producto final el dióxido de carbono y agua(29)(30). Un agua residual puede componerse de compuestos orgánicos muy resistentes, en estos casos un agente catalizador como el sulfato de Plata, puede permitir su degradación. En aguas residuales de origen industrial, pueden encontrarse desde cantidades ínfimas a niveles de traza, así como niveles elevados de metales pesados como por ejemplo el mercurio, el cual puede interferir de manera drástica en la cuantificación de DQO, esta interferencia puede eliminarse agregando sulfato mercúrico teniendo como producto final $HgCl_2$. En la (Formula 1) se

observa la reacción química que explica en detalle durante la determinación de DQO(31).

Fórmula 1. Reacción química: oxidación de materia orgánica, en la determinación de DQO.



***Tomado de:** Ivan M, German G, Sergio V. Remoción de Niquel y DQO presentes en las aguas residuales de la industria automotriz mediante electrocoagulación. 2013(31)

4.3.3. OD (Oxígeno Disuelto)

El oxígeno es un elemento en estado gaseoso vital para el desarrollo de la vida en organismos aerobios, el cual comprende la cantidad de oxígeno que se encuentra presente y disuelto en el agua(32). Al ser el oxígeno vital para la evolución de la mayoría de especies, y a la vez fundamental en procesos de oxidación de manera natural, es decir sin que se involucre la acción metabólica de microorganismos, una baja concentración de oxígeno disuelto (OD) puede afectar procesos de autopurificación de un cuerpo de agua, momento en el cual el tratamiento de aguas residuales para su posterior descarga en ríos y embalses se hace necesario(25). La concentración de saturación de OD es función de la temperatura, de la presión atmosférica y de la salinidad del agua(22). Los niveles de OD funcionan como indicadores de contaminación acuática, indicando si las condiciones del recurso hídrico son óptimas para la vida; un nivel alto de OD indica que el agua presenta mejor calidad biológica; y la vida no podría originarse en ecosistemas acuáticos con niveles muy bajos de OD(23,30)

“La determinación del OD sirve de base para el análisis de la DBO, así la determinación del OD y la DBO son considerados como indicadores

para medir el grado de contaminación de las aguas residuales, domesticas e industriales”(Jouanneau S, et al; 2014)(30)

La deficiente oxigenación en el agua provoca: muerte de especies acuáticas y semiacuaticas, donde su reproducción y crecimiento se estancan. Algunas plantas como las algas y micro algas proveen de oxígeno el ecosistema por medio de procesos fotosintéticos sucesivos, esto podría explicar el hallazgo de niveles más elevados de OD en horas de la tarde(23,25,30).

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del agua

Parametro (Unidad)	Definición	Importancia	Parámetros que intervienen
Conductividad Us/cm3 (microsiemens)	Capacidad que posee una solución acuosa de conducir la corriente eléctrica, en función de la temperatura, a 25°C(33).	depende de la presencia y concentración de diferentes iones metálicos, y la temperatura del agua, influyendo en enlaces químicos de los iones, donde podría decirse que a una menor(33).	<ul style="list-style-type: none"> • STD • Temperatura, a mayor temperatura mayor conductividad • pH (reacciones químicas)
pH (Potencial de Hidrogeno) unidades de pH	Permite conocer el perfil ácido o básico del agua, lo cual permite diferenciarla de una agua natural, tratada y residual. La neutralización, precipitación, coagulación y desinfección son dependientes del pH,(23).	Niveles de pH menor a 6.0 dificultan la implementación de sistemas de tratamiento biológico sobre aguas residuales al favorecer la sobrevida de hongos, sobre agentes bacterianos usados en sistemas biológicos(23).	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura, en la efectividad de reacciones químicas en especial en procesos de precipitación(23).
Turbiedad (NTU) Unidades Nefelométricas	propiedad óptica, en la cual los rayos de luz incidentes son absorbidos y dispersados en lugar de ser transmitidos, por partículas presentes en el agua(22,23).	La materia orgánica e inorgánica, sedimentos, microorganismos, contaminantes de origen químico y biológico, entre otros, son causantes del cambio de calor y turbidez del agua	El grado de contaminación del agua a tratar(27).
Sólidos Totales Disueltos (STD) (ppm – partes por millón)	Todo material o elemento ya sea disuelto o en suspensión, constituye los sólidos totales presentes en el agua, es decir microorganismos, materia orgánica, residuos de suelo entre otros(27).	Las partículas consideradas STD, atrapan sustancias tóxicas como metales pesados, medicamentos y sustancias químicas, además afectan la calidad del agua(27).	<ul style="list-style-type: none"> • Causan turbiedad en el agua(33). • Afectan la conductividad(27).

Tabla 4. Continuación.

<p>Dureza (mg CaCO₃/L)</p>	<p>La suma de iones calcio, magnesio, hierro y aluminio, por lo cual la dureza determina la capacidad del agua de precipitar detergentes(27).</p>	<p>Los depósitos de detergentes precipitados crean incrustaciones en tuberías e interfieren con liberación de aguas residuales a puntos de descarga</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de iones metálicos (aluminio, hierro y magnesio)
<p>Alcalinidad (mg CaCO₃/L)</p>	<p>Capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar Protones(25).</p>	<p>Su medición establece un parámetro de carácter obligatorio en aguas residuales en tratamiento(25).</p>	<p>equivale a la suma de la bases “titulables” de una muestra de agua, carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, y sales de ácidos débiles boratos, silicatos, y fosfatos(25).</p>

Fuente: Autor

4.4. Metales pesados

Se considera como metal pesado, a cualquier elemento químico cuya densidad sea mayor 5g/cm^3 , y que sea capaz de ser tóxico o producir envenamamiento a bajas concentraciones, los elementos enumerados en la tabla 5 son los que tienen relevancia en el contexto ambiental(34). Pueden estar presentes como contaminantes de fuentes hídricas, alimentos, pero también se encuentran en estado atmosférico en forma gaseosa(35). Otras características atribuibles a este grupo de metales, podría hacer alusión no solo a su densidad, sino también a su número y peso atómico como una característica especial a la hora de clasificar estos elementos, el cual debe estar comprendido entre 63,546 y 200,590. En cuanto a su acción, se consideran tóxicos a su exposición para cualquier organismo vivo(36).

Su presencia en los diferentes organismos y ecosistemas es algo contradictoria, debido a que algunos de ellos se consideran esenciales para la vida, comportándose como nutrientes para plantas y animales como Mn (Manganeso), Mo (Molibdeno), Cu (Cobre), Co (Cobalto), Zn (Zinc), Sc (Escandio) y V (Vanadio), mientras que otros elementos como el Ni (Níquel), Cr (Cromo), Sn (Estaño), entre otros resultan ser tóxicos a elevadas concentraciones. Cuando un metal pesado se encuentra en un ecosistema acuático, básicamente puede deducirse que se encuentra a bajas concentraciones, denominándose como elementos traza. Debido al desarrollo industrial, agrícola y minero, pueden encontrarse niveles de metales pesados en el agua (Tabla 6)(37).

Tabla 5. Estándares MCL (Maximum Contaminant Level/ Nivel Máximo de Contaminante) para los metales pesados más peligrosos (USEPA 2003).

Metal pesado	Toxicidad	MCL (mg/L)
Arsénico	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad vascular	0.050
Cadmio	Daño renal, trastorno renal, carcinógeno humano	0.01
Cromo	Cefalea, diarrea, náuseas, vómitos, carcinogénico.	0.05
Cobre	Daño hepático, enfermedad de Wilson, insomnio.	0.25
Níquel	Náuseas, asma crónica, tos, carcinógeno humano.	0.20
Zinc	Depresión, letargo, signos neurológicos y aumento de la sed.	0.80
Plomo	Daño al cerebro fetal, enfermedades de los riñones, sistema circulatorio y sistema nervioso.	0,006
Mercurio	Artritis reumatoide y enfermedades de los riñones, el sistema circulatorio y el sistema nervioso.	0,00003

***Tomado de:** (Babel and Kurniawan, 2003), Zhao M y colaboradores. Nuevas tendencias en la eliminación de metales pesados de aguas residuales. Appl Microbiol Biotechnol 2016(34).

Tabla 6. Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.

INDUSTRIA	METALES	CONTAMINACIÓN DERIVADA
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos
Fundición	As, Cd, Pb, Ti	Procesado del mineral para obtención de metales
Metalurgia	Cr, Cu, Mn, Pb, Sb, Zn	Procesado térmico de metales
Aleaciones y aceros	Pb, Mo, Ni, Cu, Cd, As, Te, U, Zn	Fabricación, eliminación, y reciclaje de metales. relaves y escoriales
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento
Pinturas y pigmentos	Pb, Cr, As, Ti, Ba, Zn	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido de la pila de residuos, la contaminación del suelo y las aguas subterráneas
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosa y sólida desde el proceso de fabricación y reciclaje
Agricultura y ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas, la bioacumulación en plantas.

*Tomado de: Rubio DIC, Calderón RAM, Gualtero AP, Acosta DR, Rojas IJS. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Rev Ing y Región. 2015;(37)

La contaminación de suelos y agua por estos metales, se deriva de la explotación y la fundición de metales, de los insumos agrícolas, de lodos y de sedimentos residuales, de la combustión del carbón y del petróleo,

industrias químicas y de la inadecuada disposición de desechos urbanos e industriales(38).

Los metales pesados no requieren de altas concentraciones para considerarse tóxicos, y generar serios riesgos al ser humano y la salud de un ecosistema(38) Como producto de la actividad antropogénica, se vierten toneladas de residuos químicos al medio ambiente, entre ellos residuos de metales pesados, que por procesos de escorrentía, concentración en áreas terrestres o filtraciones, contaminan fuentes hídricas, suelos y acuíferos; su importancia contaminante radica en la incapacidad de diferentes mecanismos biológicos para degradarlos, y de esta forma su vida útil en el medio ambiente se extiende a través del tiempo así como su potencial toxico(39).

Los metales pesados pueden interactuar con componentes biológicos de las plantas y de organismos y microorganismos, pudiendo interrumpir, impulsar, acelerar o detener sus procesos metabólicos y biológicos. Estos elementos, se han clasificado tanto en esenciales como no esenciales, entendiéndose por esenciales a aquellos Los metales pesados necesarios para la supervivencia y maquinaria biología de un organismo, se consideran metales pesados esenciales al cobre (Cu), y zinc (Zn)(36), por otra parte, metales tales como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) y mercurio (Hg) no se consideran biológicamente necesarios, sin embargo estos pueden bioacumularse y generar toxicidad con potencial de transferencia a niveles tróficos superiores de un ecosistema(38).

Como es sabido, las aguas residuales tratadas, poseen un alto potencial de reutilización para el riego de cultivos agrícolas, razón por la cual, distintas entidades entre ellas la USEPA, y en diferentes investigaciones se han establecidos los valores máximos permitidos en cuanto a metales pesados aptos para el reuso de aguas residuales y sus subproductos como los lodos en el sector agrícola (tabla 7)(11).

Tabla 7. Metales pesados y valores límite de As en lodos de aguas residuales para uso agrícola (mg. Kg-1)

	Cu	Zn	Hg	Pb	Cr	As	Cd
US EPA ^a	1500	2800	-	300	1200	41	39
Unión Europea ^b	1000-1750	2500 – 4000	16-25	750 -1200	-	-	20-40
España c-							
pH < 7	1000	2500	16	750	300	-	20
pH > 7	1750	4000	25	1200	400	-	40
Canadá ^d	500	2000	10	200	1000	10	20
CJ/ 309 – 2009 ^e							
Grado A ^f	500	1500	3	300	500	30	3
Grado B ^g	1500	3000	15	1000	1000	75	15

a) USEPA. Una guía para las evaluaciones de riesgo de biosólidos, Norma 40, parte 503 de la EPA, 1995; b) EUR-ley. Directiva del Consejo sobre la protección del medio ambiente, y en particular del suelo, cuando los lodos de aguas residuales se utilizan en la agricultura, 1986; c) Przewrocki, P Et al. Análisis de riesgos del lodo de aguas residuales-Polonia y enfoque comparativo de la UE. Polish Journal of Environmental Studies 2004, 13, 39-59; d) Cao, J.Z. El análisis del valor agrícola del lodo excedente de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Taiyuan SCI-TECH 2003, 3, 14-15; e) Eliminación de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales-Norma de control para la agricultura (CJ / T 309-2009); f) El grado A se aplica a los vegetales y los cultivos alimentarios; g) El grado B se aplica a cultivos oleaginosos, árboles frutales, piensos y cultivos de fibra.

***Tomado de:** Duan B, Zhang W, Zheng H, Wu C, Zhang Q, Bu Y. Disposal situation of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China. Int J Environ Res Public Health. 2017;14(11).

4.4.1. Efectos de los metales pesados sobre la salud

Los metales pesados presentes en aguas residuales pueden acumularse en los tejidos grasos humanos, afectando el sistema nervioso, el sistema endocrino, el sistema inmunológico, la función hematopoyética y el metabolismo celular normal, entre otras funciones. Debido a estos efectos nocivos, La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) desarrollo una norma integral, basada en el riesgo comúnmente conocida como la regla 40 parte 503, en la cual se evalúa el riesgo de múltiples vías de contaminación, y se establecen límites para el manejo de metales pesados en el lodo de aguas residuales tratadas(11,40).

Un claro ejemplo de efectos adversos causados por metales pesados en aguas residuales, es Taiyuan, considerada la más grande zona industrial de China, donde la metalurgia se ha convertido en la principal actividad

económica, y por lo tanto ha incrementado la tasa de contaminación local por metales pesados afectando especialmente a población infantil(11).

Según la US EPA (United States Environmental Protection Agency), Metales pesados como Cu, Zn, Hg, Pb, Cr son considerados como contaminantes carcinógenos. Por otro lado el Cd se ha clasificado como un contaminante carcinógeno (IARC – International Agency for Research on Cancer & OMS – Organización Mundial de la Salud)(40,41).

La evaluación de riesgos para la salud, “se usa para estimar el potencial de riesgos para la salud, y la probabilidad de efectos adversos causados por los productos químicos en un ambiente contaminado” (Baoling D. Et al. 2017)(11). Por tal razón, en cinco PTAR de Taiyuan China, se identificó la inhalación y la ingestión como las dos principales vías de exposición humana a metales pesados presentes en lodos de las plantas, donde la vida inhalatoria parece ser la más frecuente a través de sustancias volátiles o partículas (polvo) (Tabla 8). Se logró determinar que metales pesados como Cu, Zn, As, Hg, Pb, Cr, Cd pueden causar un potencial efecto adverso y toxico sobre la salud humana y ambiental, principalmente el estudio realizado por Baoling D. Et al., se cataloga el Cu como el metal más abundante en los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, estableciendo de esta manera un menor riesgo cancerígeno para la población infantil y adulta de Taiyuan(11).

Tabla 8. Dosis de referencia (RfD) y factor dependiente cancerígeno (SF) para diferentes metales pesados.

Metal pesado	RfD (mg.kg ⁻¹ .d ⁻¹)		SF (Kg.d.mg ⁻¹)
	Ingestión	Inhalación	
Cu	0.004	0.004	
Zn	0.300	0.300	
Hg	0.0001	0.0001	
Pb	0.038	0.038	
Cr	0.005	0.005	
As			1.5
Cd			6.1

*Tomado de: Duan B. et al. Disposal situation of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China;2017(11).

“La toxicidad de los metales pesados depende de su movilidad en el medio, que, a su vez, depende de su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación” (Doménech & Peral, 2008. Kumar, *et al*; 2012. Caviedes et al. 2015) entidades internacionales como la USEPA establecen Niveles de Contaminación Máximos (NCM), niveles frente a los cuales diversos países ejercen su control ambiental frente al tratamiento de aguas residuales y superficiales (Tabla 9)(37,40) . Las fuentes por las cuales niveles de metales pesados y otros contaminantes son rescatados en plantas de tratamiento de aguas residuales, son diversas, pero constituyen básicamente suplir la demanda de países industrializados o que dependen de ellos para su desarrollo, de igual manera la variedad de síntomas y patologías dependerá en su presentación por la vía de exposición (Anexo 2), siendo la Arsenicosis la presentación más común, en la figura 1 se presenta una lesión cutánea característica de la intoxicación por Arsenico.(29,42).

Tabla 9. Síntomas de la intoxicación típicos y los niveles de contaminación máximos (NCM) establecidos por (USEPA) y por la legislación colombiana.

MP	Toxicidad	DL dieta humana mg/día	NCM (mg/L)	
			USEPA	Colombia
As	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad vascular	50-340	0,05	0,1-0,5
Cd	Daño renal, trastorno renal, y efectos carcinógenos	1,5k – 9 k	0,01	0,1
Cr	Dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vómito carcinógeno	3k – 8k	0,05	0,5
Cu	Daños hepáticos, enfermedad de Wilson, insomnio	175- 250	0,25	1
Ni	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, carcinógeno	--	0,2	0,5
Zn	Depresión, Letargo, signos neurológicos, y aumento de la sed	6k	0,8	3
Pb	Teratogenicidad cerebral, enfermedades renales, vasculares y neuronales	10k	0,006	0,2 – 0,5
Hg	Artritis reumatoide, enfermedades renales, vasculares y neuronales	150-300	0,00003	0,02

*Tomado de: (Adaptado de la Secretaría Distrital de Ambiente Bogotá (SDAB), 2010; Nguyen, et al; 2013; MADS, 2015; Caviedes Et al 2015)(37).

El principal mecanismo mediante el cual los metales pesados producen efectos adversos para un organismo, se basa en la toxicidad causada en las células vivas por medio de mecanismo iónico y de estrés oxidativo, el cual es causado por el desequilibrio entre la producción de radicales libres y la generación de antioxidantes para desintoxicar los intermedios reactivos o reparar el daño resultante. La figura 2 muestra el ataque de metales pesados sobre una célula y el equilibrio entre la producción de ROS (especies de oxígeno reactivo) y la posterior defensa presentada por antioxidantes P- glutatión, presente en la célula que la protege de los radicales libres como el peróxido de hidrogeno H_2O_2 (peróxido de hidrogeno), sin embargo, el ROS aumenta y el nivel de antioxidantes disminuye(42).

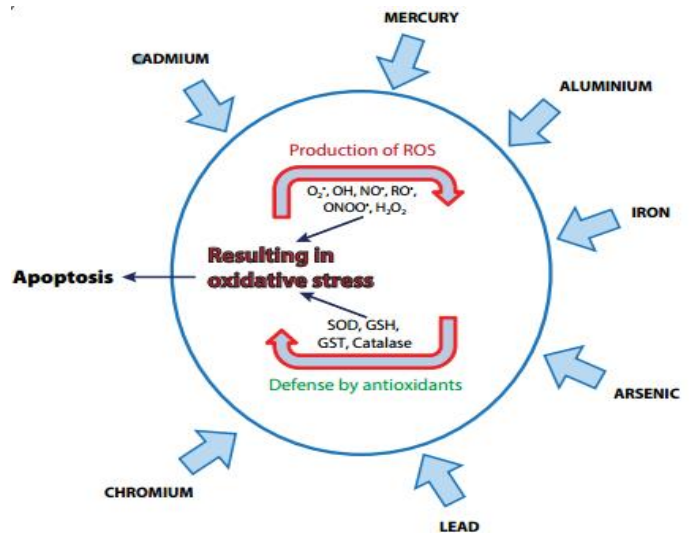


Figura 1. Lesiones en piel, Arsenicosis

*Tomado de: Jaishankar M. et al. Toxicidad, mecanismo y efectos sobre la salud de algunos metales pesados. Interdiscip Toxicology. 2014(42).

Figura 2. El ataque de metales pesados sobre una célula y el equilibrio entre la producción de ROS y la posterior defensa presentada por antioxidantes

*Tomado de: Jaishankar M. et al. Toxicidad, mecanismo y efectos sobre la salud de algunos metales pesados. Interdiscip Toxicology 2014(42).



4.5. DETECCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS

4.5.1. Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

Kirchhoff: «cualquier materia que pueda emitir luz a una cierta longitud de onda también absorberá luz a esa longitud de onda». Esta idea fue desarrollada en 1955 por el australiano Walsh, dando origen a los primeros instrumentos comerciales a principios de 1960 (Razmilic B 1994)(43).

Es el método más utilizado detectar metales pesados en aguas superficiales e industriales. Esta técnica se basa en la absorción de la energía radiante de los átomos en su estado fundamental para medir la concentración de la fase gaseosa de átomos. La absorción es directamente proporcional a la concentración del analito. Este método requiere un pretratamiento de la muestra, con el fin de disminuir la interferencia producida por material orgánico contenido en la muestra, lo cual permitirá que el metal se encuentre en una forma libre determinable; por lo tanto, aguas con turbidez > 1 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) deben ser sometidas a digestión como pretratamiento(26).

La EAA, puede llevarse a cabo mediante diferentes variaciones como HG-AAS (Espectrofotometría de Absorción Atómica por Generación Continua de Hidruros), FAAS (Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama), EAAVF, entre otras(44).

4.5.2. Espectrofotometría de Absorción Atómica por Generación Continua de Hidruros (HG-AAS)

El As es uno de los elementos químicos que puede existir en cuatro estados de valencia As^{3-} , As^0 , As^{3+} y As^{5+} . Su presentación más

abundante se encuentra en estado $\text{As}^{5+ (V)}$, el cual debe cambiar su estado de oxidación V a III, esto con el fin de poder formar un compuesto hidruro volátil (AsH_3), lo cual es posible con la reducción causada por borohidruro de sodio (NaBH_4) en solución acida. La espectroscopia de absorción atómica por generación de hidruros, debido a que esta técnica considera propiedades químicas de elementos como el As y Se, los cuales tienen la facultad de formar hidruros volátiles, al reaccionar un agente reductor, en este caso, el ya mencionado borohidruro de sodio, NaBH_4 . Una vez formado el compuesto hidruro en estado gaseoso, este es transportado hacia una celda calentada eléctricamente donde se descompone, de esta manera el analito es liberado, produciendo un haz de luz que atraviesa los átomos presentes, donde la disminución en su intensidad es directamente proporcional a la concentración del analito en la muestra (Figura 3). “Esta técnica de atomización produce 500 - 1 000 veces más sensibilidad que la clásica técnica de llama”(44).

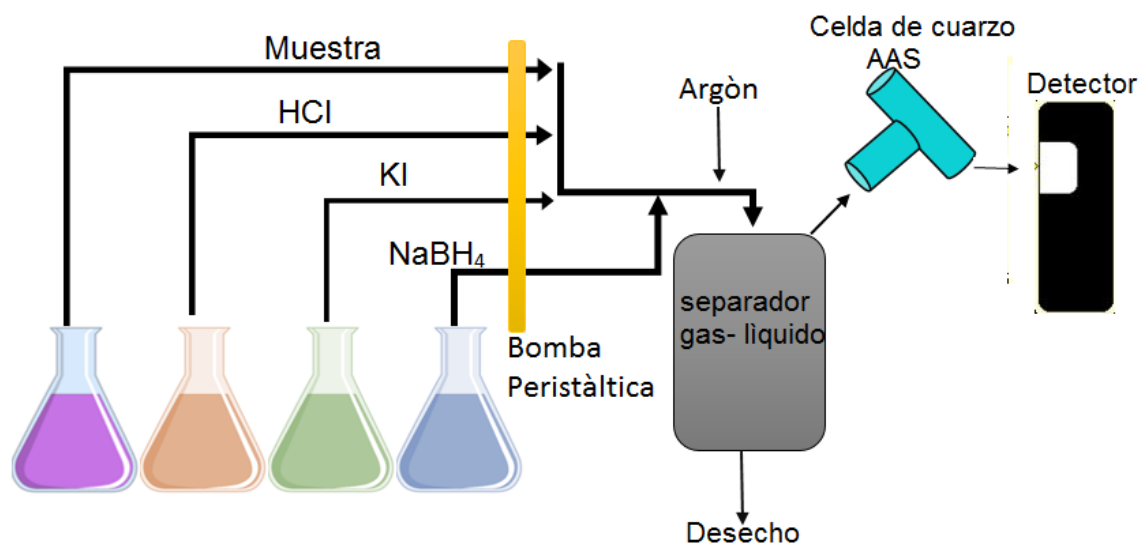


Figura 3. Método de determinación de Arsénico inorgánico por generación de Hidruros

Adaptado de: Morand EE, Giménez MC, Benitez ME, Garro OA. Determinación de arsénico en agua por espectrometría de absorción atómica con generación de hidruro (HG-AAS). 2008: (45)

La espectrometría de absorción atómica junto con la generación continua de hidruros, proporciona una alternativa segura y rápida en cuanto a la determinación de metales pesados como As y Se, ya que ha mostrado una precisión con coeficientes de variación mínimos (< 10 %), descartando un sesgo en la fase analítica. Debido a que las concentraciones máximas permisibles en agua potable son de 0,01 mg/l, se establecen valores de 0,002 y 0,003 mg/l como la concentración (mínima) a reportar para As y Se, respectivamente. Por lo tanto, este método “Se vuelve un método de referencia para otros laboratorios que deseen aplicarlo en Colombia, al estar estos parámetros acreditados ante el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en Colombia, ya que pueden reportar resultados correctos y confiables, además de ser una guía a nivel internacional”(44).

4.5.3. Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama (FAAS)

La espectroscopia de absorción atómica de llama, es un método sensible y confiable en la determinación de metales pesados, al proporcionar una energía de transmisión electrónica única para cada metal. Las determinaciones de metales pesados por FAAS, pueden realizarse en partes por millón – ppm. Al igual que EAAGH, las muestras requieren de métodos de pretratamiento, en donde la digestión es la técnica más común y más rápida, sea húmeda, seca o asistida por microondas (Figura 4).(46)

FAAS se convierte en un método con amplia aplicación en la detección y cuantificación de casi todos los elementos de la tabla periódica, y generalmente de cualquier tipo de muestra(46). Según el método 3111 de Standar Methods -AWWA (American Public Health Association - American Water Works Association). Esta metodología permite la detección de metales pesados como Cd, Zn, Cu, Cr, Mg, Ni y Pb, cuyos límites de detección y longitud de onda se relacionan en la (Tabla 10)(47).

Tabla 10. Límites de detección y longitud de onda predilecta en la detección y cuantificación de metales pesados por (FAAS)

ANALITO	LIMITE DETECCION	LONGITUD DE ONDA
Cd	0,025 mg/L – 3 mg/L	228.8 nm
Zn	0,01 mg/L – 1.5 mg/L	213.9 nm
Cu	0,05 mg/L – 15 mg/L	324 nm
Cr	0.25 mg/L – 10 mg/L	357.9 nm
Mg	0.02 mg/L – 1.0 mg/L	285.2 nm
Ni	0.2 mg/L – 20 mg/L	230.0 nm
Pb	0.3 mg/L – 25.0 mg/L	217.0 nm

*Fuente: Autor. Información tomada de: método 3111 de Standar Methods -AWWA (American Public Health Association - American Water Works Association)(47).

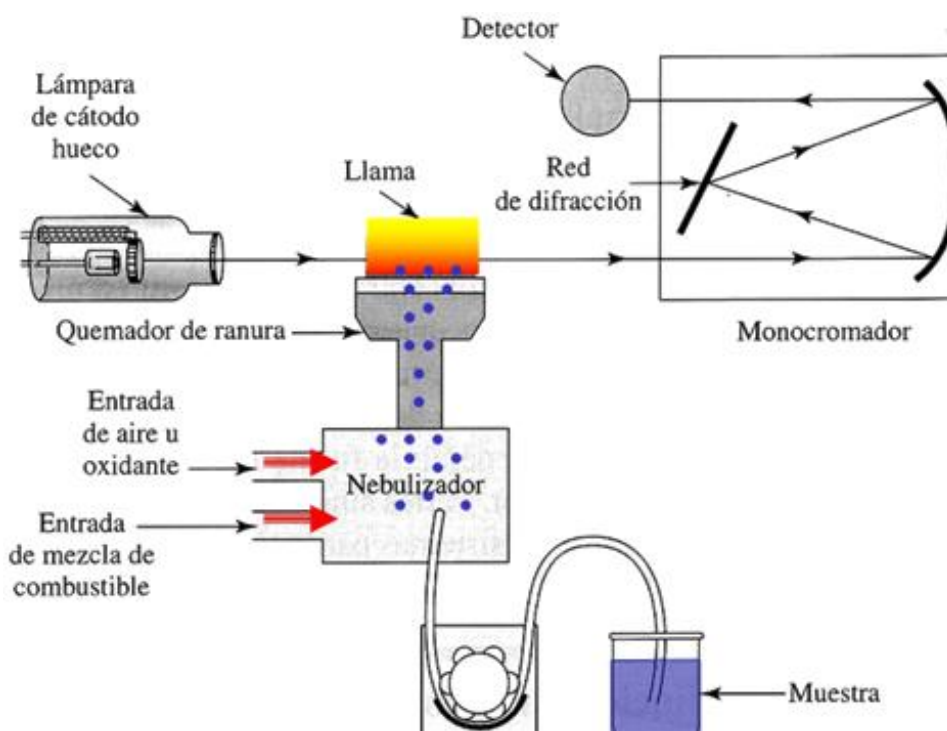


Figura 4. Metodología Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama
*Tomado de: <http://slideplayer.es/slide/8951316/>

4.5.4. Espectroscopia de Absorción Atómica- Horno de grafito (EAA-HG)

Es una de las formas de EAA de mayor sensibilidad al requerir de una mínima cantidad de muestra, (permite detectar concentraciones hasta 1000

unidades inferiores que las detectables con EAA de llama), permitiendo análisis de ultra-trazas(48).

La energía requerida para la atomización en esta técnica se obtiene de un tubo de grafito, en el cual se deposita la muestra en vez de una llama convencional, este tubo está alineado con la luz de la lámpara que posee el instrumento de EAA. De esta manera, el vapor generado por la muestra, por acción de temperatura proporcionada el horno, absorberá luz proveniente de la lámpara del analito traduciéndose a su concentración final (Figura 5)(48).

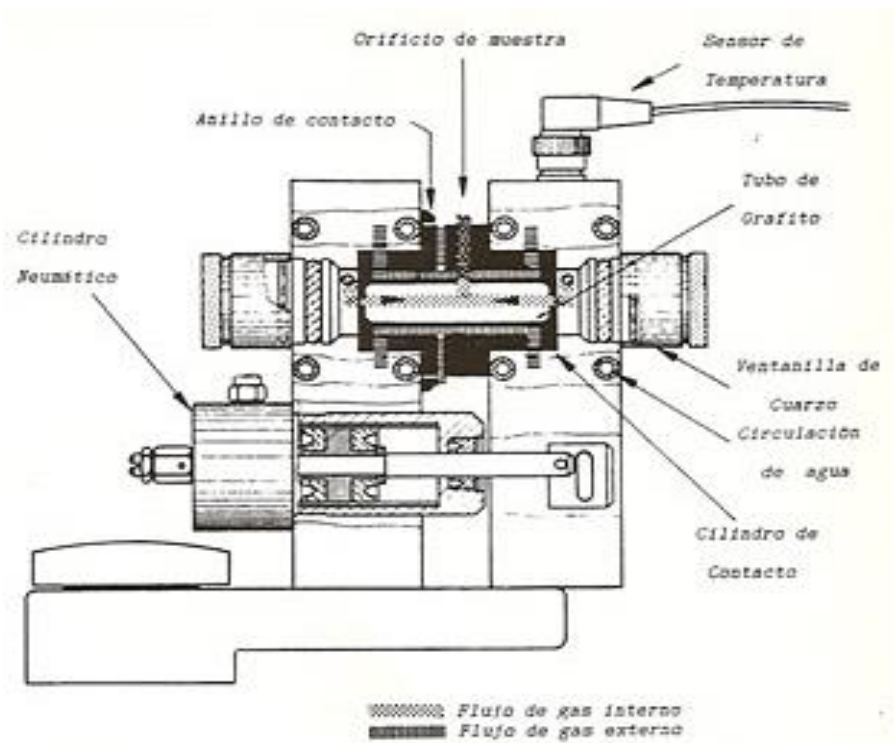


Figura 5. Sistema de obtención de átomos en estado fundamental en EAA con Horno de Grafito(48)

***Tomado de:** Hernández FG et al. Determinación de Metales por absorción atómica - Horno de Grafito; 2009(48).

4.5.5. Espectrometría de Fluorescencia Atómica (AFS)

La espectrometría de fluorescencia atómica (AFS) es una técnica de detección ideal para estudiar elementos con la capacidad de formar hidruros (principalmente As, Se y Sb) y Hg. El límite de detección se encuentra por debajo de 1 mg/L^{-1} , así como un amplio rango de calibración lineal, hasta de 1 mg/L^{-1} permitir su aplicación a una gran variedad de muestras ambientales, biológicas y de alimentos(49). La técnica se basa en la absorción de la radiación de longitudes de onda específicas por un vapor atómico con la detección subsiguiente de radiación desactivada a través de la emisión una fuente de excitación. Tanto la absorción como los procesos de emisión atómica subsiguientes ocurren a longitudes de onda que son características de las especies atómicas presentes(49).

La intensidad de la radiación de fluorescencia depende de una serie de factores: (a) la intensidad de la fuente de excitación, (b) las concentraciones de los átomos, es decir, el atomizador, (c) la relación de la energía emitida en la fluorescencia a la energía absorbida por unidad de tiempo) y (d) la extensión de cualquier auto absorción en el atomizador. La intensidad de AFS es adicionalmente proporcional a la concentración de analito en la muestra(49).

La AFS se considera superior a EAA y similar a ICP-MS en cuanto a sensibilidad y rango de calibración lineal, además de ser más simple, económica, practica y accesible, para la especiación de metales como el arsénico y selenio. A pesar de ser un método prometedor, AFS cuenta con desventajas tales como: el enfriamiento e interferencias espectrales generadas por fuentes de dispersión y emisión de atomizador de carácter genérico(49).

4.5.6. Espectrometría de Absorción Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

Esta técnica está basada en la atomización con plasma, la cual es una mezcla gaseosa (Argón - Ar) conductora la electricidad. Los iones Argón absorben suficiente potencia de una fuente externa, como para mantener un nivel de temperatura, esta fuente de alimentación que mantiene la temperatura (10000K) es la de plasma acoplado inductivamente (ICP) denominada antorcha. Una fuente de plasma acoplado inductivamente se compone de tres estructuras concéntricas elaboradas en cuarzo, a través de los cuales fluye una corriente de argón(50).

4.5.7. Voltamperometria de redisolución anódica y catódica.

Los métodos electroquímicos para la extracción de metales pesados representan una alternativa interesante por su sensibilidad, versatilidad, bajo costo y confirmación del analito, incluso han sido recomendados por de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para el análisis electroquímico para la cuantificación de metales pesados como mercurio(40)

El agua se presenta como una muestra diluida, por lo cual se necesita o requiere una etapa de pre-concentración del analito que se desea cuantificar, cuando su concentración está por debajo del límite de detección de la técnica empleada, como es el caso de concentraciones a rangos de ppm (partes por millón) incrementando de esta manera el límite de detección(51). El fundamento de esta técnica electrométrica, realmente es la pre concentración de los iones metálicos en la superficie de un electrodo con la ayuda de una película que se forma en el extremo del electrodo, seguida de una cuantificación por medio de Pulsos o señales producidos por una corriente

(voltios), generados por la presencia del analito, es importante resaltar que este método requiere un pre tratamiento de la muestra.(51)

Esta técnica parece tener una desventaja metodológica, y es la implementación de Oro (Au) y Mercurio (Hg) como soluciones acondicionadoras de electrodos de trabajo, sin embargo, a pesar de su toxicidad las concentraciones de mercurio son mínimas(51,52).

Los equipos que emplean este fundamento teórico, cuentan con al menos tres electrodos, un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un contra electrodo, donde la solución acondicionadora dependerá del analito a detectar, los electrodos más comunes son de oro sólido giratorio como electrodo de trabajo (ánodo), un Ag / AgCl como electrodo de referencia y un contra electrodo de carbono vítreo (cátodo)(52).

4.6. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

Una planta de tratamiento de aguas residuales, el conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales, en donde se busca la descontaminación del agua captada. Estos procesos, permiten desde la remoción de material sólido macroscópico, como escombros y residuos (basura), hasta la eliminación de diferentes microorganismos patógenos(53).

El tratamiento primario, es indispensable en el tratamiento de aguas residuales, este tratamiento inicial incluye procesos que permiten la separación de materiales sólidos, flotantes y de mayor tamaño, a través de rejillas que atrapan y separan estos residuos. Inicialmente la homogenización del efluente, el cribado, la neutralización o estabilización del pH (6.5 – 8.5) para optimizar la actividad biológica durante el tratamiento secundario biológico no convencional; la precipitación de metales pesados, la cual depende de la solubilidad del metal presente en el agua, y de un pH óptimo obtenido en el proceso previo de neutralización(37,53). Posteriormente, procesos de coagulación y floculación por medio de sales de aluminio y hierro que permitirán la precipitación de lodos que acompañan el agua captada. En un nuevo proceso se busca separar y eliminar materiales en suspensión, este proceso es la decantación. Por último, la filtración de aquellos materiales que no pudieron ser removidos en los pasos anteriores, la cual se lleva a cabo a partir de resinas, arenas, carbón activado y silica, que constituyen materiales de retención (Figura 6) (54).

Una vez realizado el tratamiento primario se procede a aplicar un segundo tratamiento. La tecnología escogida para el tratamiento secundario de aguas residuales, es seleccionada de acuerdo a las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua como la DBO, STD, pH, productos tóxicos entre otros, así como del grado de calidad y descontaminación requerido una vez el agua captada haya sido tratada. Estas condiciones son definidas como Calidad del efluente de salida requerido, idea antes concebida

como remoción, que ha pasado a denominarse concentración final según el decreto 3930 de 2010(19). En la obtención de estas condiciones generales, intervienen factores estructurales, como adecuación de terrenos en el caso de disponer de ciertos tratamientos secundarios o biológicos, que requieran áreas como estanques de estabilización de microorganismos(55).

Dentro de la oferta tecnológica para el tratamiento y saneamiento de aguas residuales, se encuentran dos grandes grupos principales, que dependen netamente del tipo de microorganismo que posea la capacidad de remover la materia orgánica disponible en el agua(56). Los requerimientos nutricionales y de crecimiento de estos microorganismos degradadores de materia orgánica, influyen en las condiciones de los procesos de tratamiento secundario, catalogándose como aerobios o anaerobios(57).

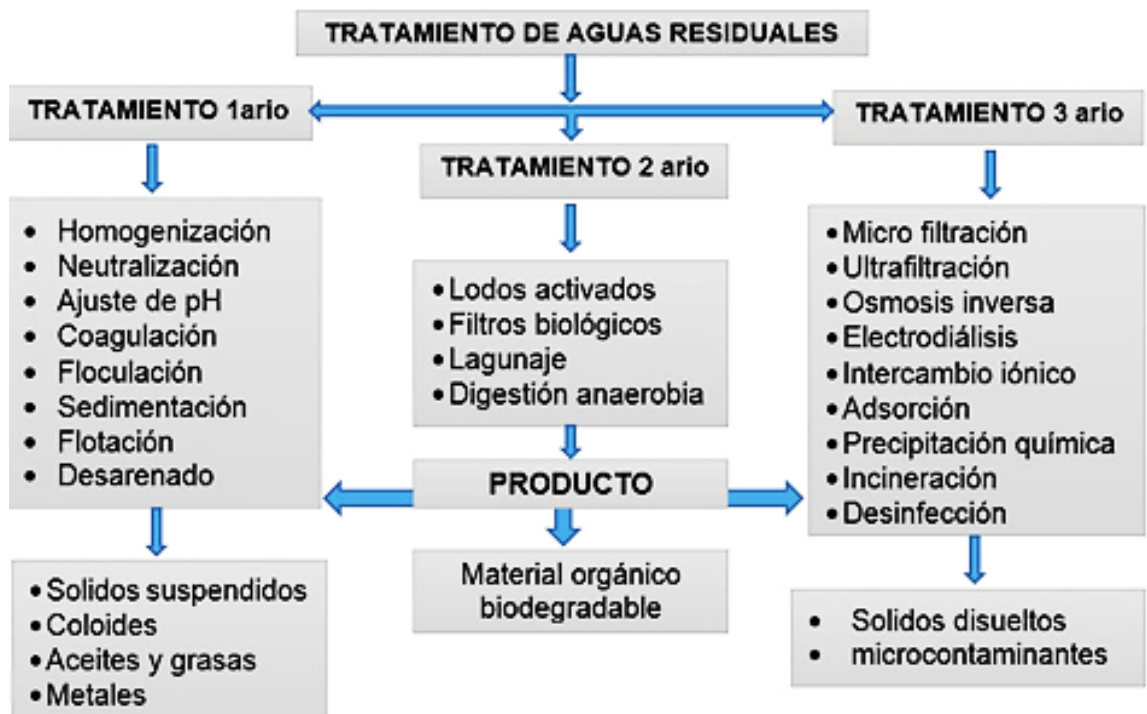


Figura 6. Diagrama general de tratamiento de aguas residuales
 *Tomado de: Limón Macías JG. Tratamiento De Aguas Residuales, ¿Problema O Recurso ? 2013; 45(58).

Las fases implicadas en el proceso de tratamiento primario de aguas residuales. Es importante recordar, que las características fisicoquímicas pueden alterar las fases de tratamiento tanto primario como secundario.

4.6.1. Cribado

Es el primer paso del tratamiento primario de aguas residuales, en el que Los residuos obtenidos directamente del afluente. Gracias a rejillas con aberturas mínimas de 5.0 mm de diámetro, el material solido puede clasificarse en fino y grueso. Para cada tipo de solido cribado, existen rejillas con aberturas de diferentes diámetros, para el caso de retención de material fino, las aberturas de las rejillas metálicas no pueden superar los 5.0 mm. Por medio del cribado se llega a eliminar entre un 5.0 – 25% de sólidos en suspensión Sin embargo, aunque puede llegarse a eliminar entre un 5.0 y un 25% de sólidos en suspensión, el 40-60% restante se elimina por medio de la sedimentación; por tal motivo es muy usual encontrar rejillas con diámetro de abertura mayor, para eliminar material mucho más grande que produzca atascamiento de los ductos(54).

4.6.2. Sedimentación

Todo el material que no logra rescatarse y eliminarse durante la fase de cribado, logra hacerlo en función del peso de las partículas que lo componen, llegando al fondo de tanques colectores. Habitualmente, es un proceso sucesivo dentro de la planta, que puede suceder en varias etapas y diferentes fases del proceso. “En una planta típica de lodos activos, la sedimentación se utiliza en tres de las fases del tratamiento”(59):

- a. En los desarenadores, eliminando material inorgánico.

- b. En los sedimentadores primarios, que preceden al reactor biológico, y en el cual los sólidos (orgánicos y otros) se separan en sedimentadores secundarios, que siguen al reactor biológico, en los cuales los lodos del biológico se separan del efluente tratado.

4.6.3. Neutralización

La neutralización básicamente es un tratamiento ácido-base del agua residual, en la que busca equilibrar el pH. Este proceso tiene dos finalidades importantes, la primera del ajuste del pH (6.5 – 8.5) antes del tratamiento secundario, con el fin de optimizar la actividad biológica degradadora, por otro lado se lleva a un ajuste de pH (5,5-9.0) del efluente para su posterior descarga en la fuente receptora(60).

4.6.4. Coagulación – Flocculación

Esta fase del proceso permite la eliminación de sólidos totales y en suspensión, así como de material coloidal, el cual se desestabiliza por acción de agentes químicos coagulantes que logran neutralizar la carga eléctrica del material coloidal. Una vez desestabilizado este material, por medio de la flocculación, es aglutinado a tal punto de formar agregados o flóculos que se sedimentan por su peso(22).

4.7. Tratamientos convencionales empleados en la remoción de metales pesados

4.7.1. Filtración por membrana

Después de concentrar y eliminar gran parte del material contenido en el agua tratada, se procede a hacer pasar el agua por unas membranas filtradoras, que solo permiten el paso de sustancias líquidas en

este caso el agua, reteniendo a su vez partículas sólidas de tamaño diminuto(37).

Esta fase constituye el último paso de separación de partículas sólidas del agua tratada, de estas maneras partículas insolubles separadas del agua por el proceso de separación de fases, en el cual se separan sólidos de líquido por medio de sedimentación, la flotación y la filtración, procesos mencionados anteriormente. Por otro lado la separación líquido de líquido, como la separación de aceites y grasas es la aplicación más frecuente(37,61)

Esta tecnología presenta alta eficiencia, y de fácil operación, su principal desventaja es la generación de una gran cantidad de lodos con elevadas concentraciones de metales pesados(37).

4.7.2. Nanofiltración

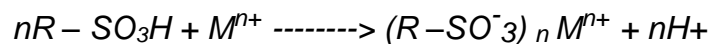
Constituye la técnica de filtración más reciente en el mercado, utiliza membranas con poros muy pequeños (<1 nm) por lo cual requiere de presión para su funcionamiento (10-50 bar), reteniendo partículas con peso molecular <200- 300 g/mol. Presenta un mecanismo selectivo, lo cual la diferencia de la filtración por membrana convencional, por medio del cual rechaza iones inorgánicos, sus ventajas son; su baja presión de funcionamiento, mayor flujo y menor consumo de energía en comparación con la osmosis inversa(37).

4.7.3. Intercambio iónico

En este proceso, los iones de metales pesados en solución se transfieren a una matriz sólida, conocida como resina de intercambio iónico (sintética o natural) que, a su vez libera iones de un tipo diferente, pero de la misma carga. “El intercambio iónico es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifiquen químicamente” (Rubio

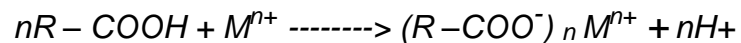
DI, et al; 2015)(37). La recuperación del valor del metal, la selectividad, menor cantidad de lodos obtenidos, alta capacidad de tratamiento, alta eficiencia de remoción y rápida cinética son las principales ventajas de esta técnica(37). Los intercambiadores iónicos más utilizados son resinas que poseen grupos de ácido sulfónico ($e^{-}SO_3H$) (Formula 2) y resinas débilmente ácidas compuestas por grupos de ácido carboxílico ($e^{-}COOH$) (Formula 3). En ambos tipos de resinas, los iones hidrogeno presentes en los grupos sulfónico o grupos carboxilo, son los principales candidatos para el intercambio iónico con los cationes del metal pesado(6).

Fórmula 2. Intercambio iónico en resinas que poseen grupos de ácido sulfónico



***Tomado de:** Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. J Environ Manage; 2011. Pag 3(6).

Fórmula 3. Intercambio iónico en resinas que poseen grupos de ácido **carboxílico**



***Tomado de:** Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. J Environ Manage; 2011. Pag 3(6).

4.7.4. Adsorción (convencional)

Permite la remoción de una variedad de contaminantes, orgánicos, inorgánicos, químicos farmacológicos, que puede comportarse como una técnica selectiva dependiendo del adsorbente utilizado. Algunas de los absorbentes más utilizados son; los carbones activados, arcillas, biopolímeros, Zeolitas, perlas de sílice y plantas(37).

4.7.5. Precipitación química

En esta técnica, se busca separar los contaminantes químicos del agua, es fundamental la intervención de diferentes factores: producto de solubilidad del metal, pH óptimo de precipitación, concentración del metal y del agente precipitante, presencia de agentes complejantes del metal (cianuros, amonio). Los metales pesados se precipitan normalmente en forma de hidróxidos, utilizando cal hasta alcanzar el pH óptimo de precipitación(37).

“Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente sencilla de operar, económica y selectiva, aunque su mantenimiento si es costoso debido a la alta generación de lodos”(37).

4.7.6. Decantación

“Se utiliza para la eliminación de materia en suspensión que pueda llevar el agua residual, eliminación de los floculos precipitados en el proceso de coagulación floculación o separación de contaminantes en un proceso de precipitación química”(Noyola A, et al;2015)(61).

La decantación es el último proceso dentro del tratamiento primario. El cribado, desengrasado, y desarenado son procesos previos a la decantación. Es posible que algunas plantas incluya la decantación en tratamientos secundarios y terciarios La decantación es un proceso físico, en el que las partículas que se encuentran suspendidas en el medio acuoso, por acción de la gravedad, (partículas con densidad mayor que el agua) se depositen en el fondo de un contenedor (decantador), de esta manera el agua libre de partículas de mayor densidad ahora será considerada como agua decantada o clarificada, y ahora podrá ser sometida a un tratamiento secundario e incluso terciario(62).

4.7.7. Tratamiento secundario (no convencional) de aguas residuales

Los procesos de tratamiento primario, permiten eliminar residuos que se separan más fácilmente que compuestos biológicos y orgánicos. Los procesos que involucran atmosferas aerobias son los más frecuentes, y se dividen principalmente en procesos con medios fijos o adheridos y medios suspendidos, cuando se hace referencia a medios fijos o suspendidos, se parte básicamente de población microbiana (biomasa) que se encarga de degradar material orgánico(58). En los procesos con medios fijos o adheridos se implementan Biodiscos impregnados con el microorganismo de trabajo; filtros percoladores (biofiltros), y lechos fluidizados, sistemas en los que se profundizara más adelante. Otros sistemas no convencionales como los sistemas anaerobios ofrecen reactores anaerobios de flujo ascendente, reactores continuos y discontinuos, y reactores de flujo pistón(56).

El tratamiento biológico de las aguas residuales consiste en el aprovechamiento de la capacidad metabólica de los microorganismos para transformar materia orgánica, principalmente en minerales y gases, su principal objetivo es remover la materia orgánica en términos de DQO de las aguas residuales. Las bacterias son microorganismos procariontes unicelulares, (constituidas por una sola célula que carece de núcleo). Su tamaño (entre 1.0 y 10 μm .) y su gran tasa de reproducción, les permite absorber y transformar contaminantes disueltos en el agua (1/1000 μm .) en CO_2 y partículas sólidas suspendidas. Además de su capacidad biotransformadora, pueden formar una especie de red, al aglomerarse y adherirse a partículas inertes propiedad aglomerarse entre ellas y adherirse a las partículas inertes, formando floculos que permiten la separación física del agua ya clarificada de los lodos obtenidos durante el proceso de tratamiento(63).

Los sistemas biológicos de tratamiento de aguas, están condicionados a la presencia o ausencia de oxígeno, condición que estará dada por el tipo de microorganismos involucrados (aerobios y anaerobios). Los diferentes procesos de tratamiento biológico se pueden dividir en: (64).

a. Procesos aerobios: la presencia de oxígeno se hace obligatoria para la supervivencia y acción metabólica microbiana

b. Procesos anaerobios: implementan microorganismos que no requieren la presencia de oxígeno para su supervivencia y acción metabólica microbiana.

Por otra parte el tratamiento biológico puede clasificarse según el estado en el que se hallen los microorganismos involucrados, los cuales pueden encontrarse como(64):

a. Medios fijos o inmovilizados: los cuales están adheridos sobre superficies inertes.

b. Medios en suspensión: donde los microorganismos se encuentran suspendidos dentro del agua residual a tratar.

4.8. Tratamientos biológicos por metabolismo aerobio

En este tipo de tratamientos, los microorganismos involucrados descomponen la materia orgánica, gracias a la intervención del oxígeno como requerimiento metabólico, el cual permite una hidrólisis inicial de las moléculas orgánicas complejas a monómeros, para que finalmente se lleve cabo el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria, en donde el aceptor final de electrones es el oxígeno formando la molécula de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3) como productos finales de descomposición. Ver (Figura 7) y (Formula 4) (63).

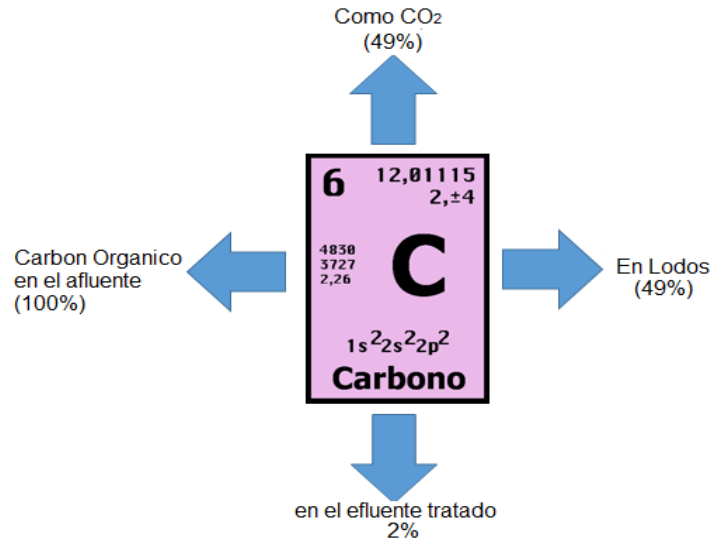
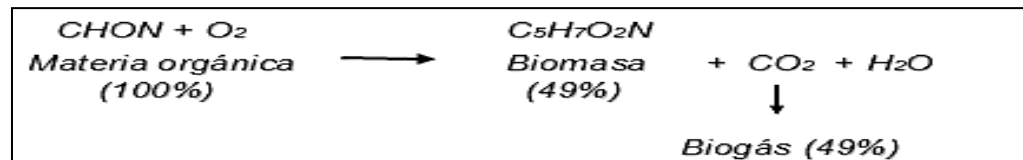


Figura 7. Balance del Carbono como elemento químico, del metabolismo aerobio en tratamientos biológicos de aguas residuales(63).

Adaptado de: Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model [Internet]. 2013.

Fórmula 4. Balance de carbono en el tratamiento aerobio



***Tomado de:** Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model; 2013. Pag. 9(63)

4.7.1. Lodos activados

“Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa, el ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos que pueden estar ubicados en el lecho o superficie del mismo” (Eduardo F, López D; 2008) (64). “Un tratamiento biológico implica 2 etapas: una etapa que consiste en formar los flóculos (etapa aireación) y la etapa separación (etapa decantación)” (Charpentier J; 2014) (Figura 8).

Las aguas residuales captadas en una PTAR (EDAR – WWTPS) (poseen C, N, y P) pasan inicialmente por un sedimentador primario, para luego ser sometida a un tanque de aireación, en el que se encuentra un

cultivo de microorganismos, simultáneamente será proporcionado oxígeno como requerimiento nutricional (depende del tipo de microorganismo) para la posterior eliminación gases como N_2 (Nitrógeno Atmosférico) y CO_2 (Dióxido de Carbono). Luego, el agua es conducida hasta un tanque de sedimentación secundario para ser separados por decantación del agua residual tratada junto con C, N, y P. Una parte de la biomasa sedimentada retorna al tanque de aeración para permitir mantener una concentración base de agentes metabólicos (microorganismos), y la otra parte se retira del sistema como desecho, denominado "lodo residual" Finalmente, en un tanque decantador, los lodos son deshidratados totalmente(64). El empleo de lodos activados en el tratamiento de aguas residuales se muestra como una metodología biológica y convencional eficiente al poseer una diversidad de biomasa con la capacidad de remover materia orgánica, patógena y nutriente (Nitrógeno y Fósforo)(64).

Los lodos activados como sistema en las plantas de tratamiento de aguas residuales, además de su sobreproducción y contenido elevado de contaminantes como metales pesados, presentan una desventaja frente a concentraciones elevadas de Cr (VI) y Cr (III), el cual limita el crecimiento del lodos activados a concentraciones de Cr (III) de hasta 15 mg/L^{-1} con dosis letales por encima de $160 \text{ mg Cr (III) L}^{-1}$, afectando parámetros, como el pH, la concentración de biomasa, la presencia de células extracelulares, polímeros, tiempo de exposición, aclimatación, etc. Sin embargo no debe descartarse el hecho de que algunos microorganismos utilicen estos inhibidores no orgánicos como benefactores metabólicos en su nutrición(65).

Son muchos los microorganismos involucrados en el proceso de lodos activados, entre estos microorganismos se encuentran bacterias, hongos, protozoos (ciliados y flagelados) entre otros (Tabla 11)(63).

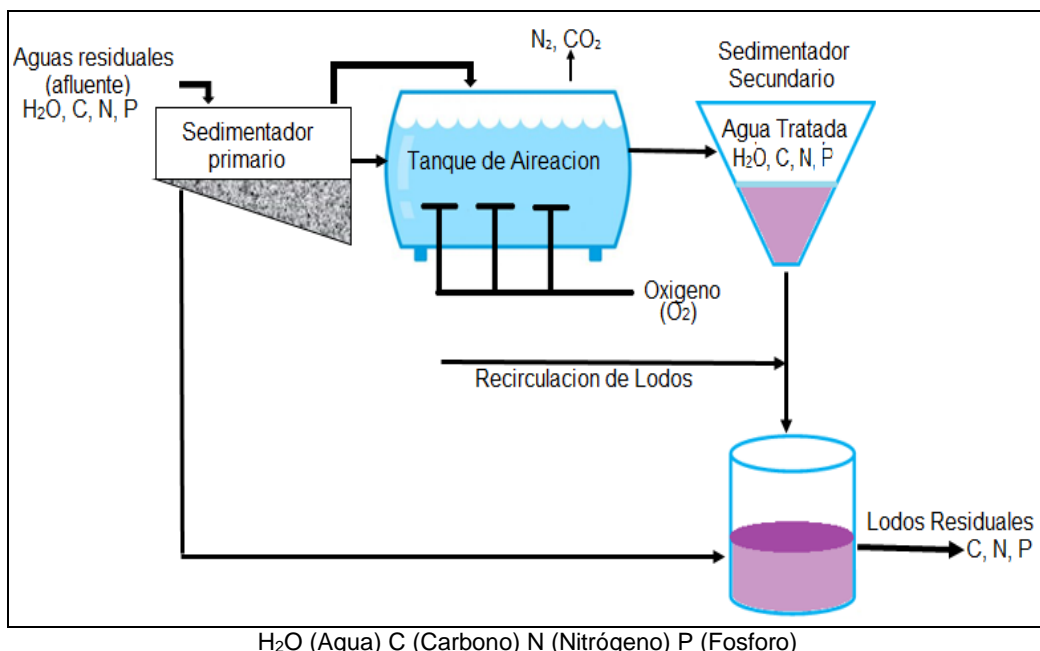


Figura 8. Las 2 etapas del tratamiento biológico de tipo “Lodos Activados”

Fuente: autor **información tomada de:** Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model [Internet]. 2013 (63).

Tabla 11. Géneros de microorganismos involucrados en el proceso de tratamiento de aguas residuales por lodos activados.

Bacterias	Hongos	Protozoarios	
		Ciliados	Flagelados
<ul style="list-style-type: none"> - Zooglea - Pseudomonas - Flavobacterium - Alcaligenes - Bacillus - Achromobacter - Corynebacterium - Comomonas - Brevibacterium - Acinetobacter - Sphaerotilus - Beggiatoa) - Nitrosomonas - Nitrobacter - Rhodospirillaceae 	<ul style="list-style-type: none"> - Geotrichium - Penicillium - Cephalosporium - Cladosporium - Alternaria 	<p>Libres:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Chilodonella - Colpidium - Blepharisma - Euplotes - Paramecium - Leonotus - Trachelophylum - Spirostomum <p>Trepadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aspidisca - Euplotes <p>Anclados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vorticella - Corchesium - Opercularia - Epystilis 	<ul style="list-style-type: none"> - Pleuromonas - Monosiga

Fuente: autor- **información tomada de:** Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model [Internet]. 2013(63).

4.7.2. Filtros percoladores

“Se emplea un amplio espectro de materiales biológicos, especialmente las bacterias, algas, Levaduras y hongos han recibido una atención creciente para la eliminación y recuperación de metales pesados, debido a su buen rendimiento, bajo coste y grandes cantidades disponibles”. (Rubio DIC. Et al; 2015). Esta metodología puede conocerse como lechos o filtro bacterianos, filtros biológicos, lechos filtrantes o percoladores y filtros biológicos percoladores(37).

Los filtros percoladores son biorreactores contenidos en un tanque, que actúan por medio de biomasa fija adherida (microorganismos que forman una biopelículas) a un medio permeable (empaque), permitiendo la depuración de aguas residuales por medio de reacciones metabólicas aerobias (Figura 9). El material orgánico depurado sirve como sustrato nutricional de los microorganismos involucrados(66).

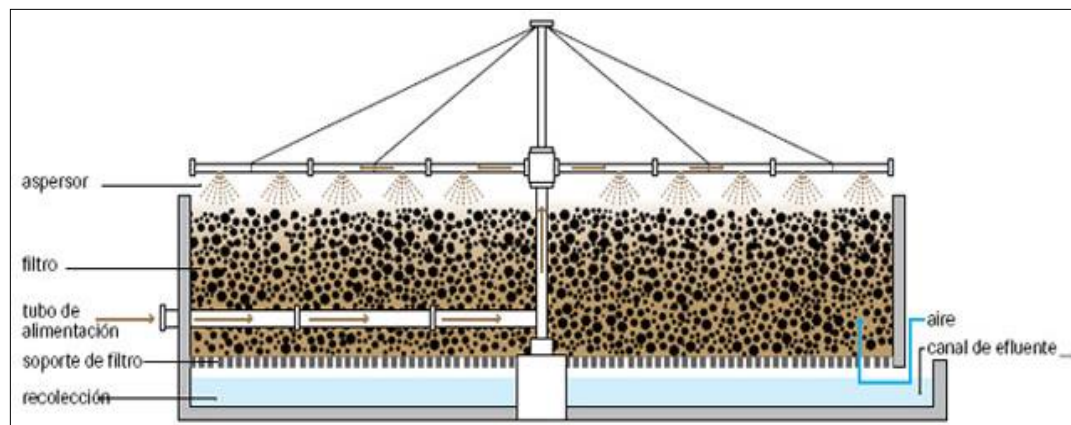


Figura 9. Estructura modelo de filtro percolador

*Tomado de: Tilley E, Lüthi C, Morel A, Zurbrügg C, Lexia T, Alianza PSL, et al. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento [Internet]. 2008. p. 164. (67)

4.7.3. Biodiscos

Los Biodiscos o RBC (Rotating Biological Contactors) o "Biodisco" aplicable a líquidos residuales urbanos o industriales son mecanismos de tratamiento de aguas residuales o superficiales contaminadas, que se componen de biomasa en estado fijo adherida a un material liviano que absorbe los contaminantes presentes en el agua residual, al igual que los filtros percoladores y los lodos activados este método busca la remoción de material orgánico y otros contaminantes químicos que resultan ser sustrato para la supervivencia de la biomasa(68).

Estructuralmente el sistema de Biodiscos cuenta con una cámara de fase líquida: contenedor semicilíndrico en posición horizontal, posee un soporte proporcionado por discos plásticos, unidos a un eje horizontal que produce el movimiento rotatorio constante, permitiendo el contacto de los microorganismos adheridos a los mismos (biopelículas) con el agua a tratar (Figura 10) (68).

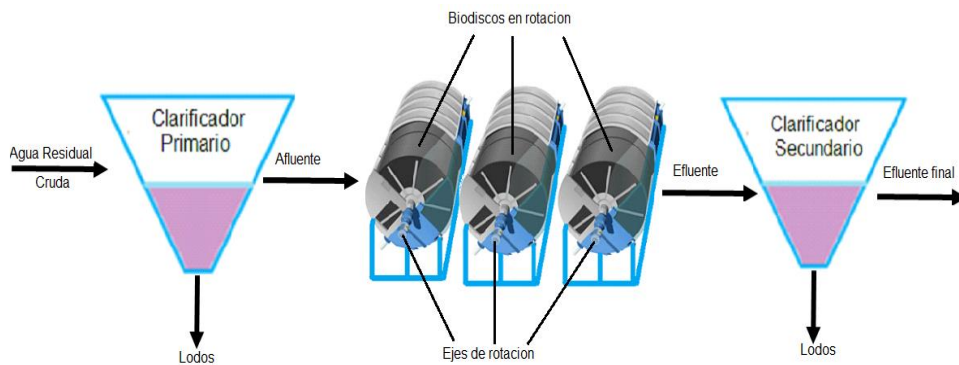


Figura 10. Sistema de tratamiento con Biodiscos (biomasa fija)

Fuente: autor

Los tratamientos biológicos aerobios, (Lodos activados, filtro percolador y Biodiscos), manejan un único principio en común, y es el uso de microorganismos como biomasa fija, o en suspensión. Estos métodos difieren en algunos procesos metodológicos como fase de contacto, fuente de aireación y necesidades energéticas(Tabla 12)(66).

Tabla 12. Características principales de tratamientos biológicos aerobios (Lodos activados, Filtro percolador y Biodiscos).

condiciones	Lodos activados	Biopelículas fijas	
		Filtro percolador	Biodiscos
Contacto	Choques en el reactor	Percolación a través del lecho	Remojado
Aireación	Aireación mecánica	Efecto chimenea o ventilación artificial	Rotación de tambores y exposición de los elementos soportes al aire
Biomasa	Floculos en suspensión	Biopelículas fijas al soporte	Biopelículas fijas a elementos de soporte o en suspensión
Necesidades energéticas	Agitación y aireación	Bombeo y aireación	Rotación de los tambores

***Tomado de:** Muñoz-Sánchez TJ, Reyes-Mazzoco R. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nitrógeno en un filtro percolador con nuevo empaque. Rev Mex Ing Qum. 2013(66).

4.7.4. Lagunaje

El Lagunaje consiste en almacenar aguas residuales durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y las condiciones climáticas (tiempo de retención), tiempo durante el cual la materia orgánica presente será degradada por acción de microorganismos heterótrofos, esto debido a que el lagunaje es un proceso biológico donde no hay ningún tipo de intervención mecánica, y por lo tanto los microorganismos serán autónomos y totalmente responsables de la transformación biológica(69).

El lagunaje puede clasificarse como un sistema aerobio, anaerobio o facultativo (Figura 11). Las lagunas anaerobias son estanques profundos de 2,5 a 5 metros de profundidad allí los sólidos suspendidos se decantan hacia el fondo de la laguna donde la materia orgánica es estabilizada por acción de bacterias anaerobias, de allí la importancia de la profundidad de la laguna. La estabilización de la materia orgánica comienza con su transformación en ácidos volátiles, y luego en dióxido de carbono y biogás como el metano (CH₄). Por medio del lagunaje se retienen la mayor parte

de material sólido que luego pasará a formar parte de fangos acumulados en el fondo de las lagunas(69).

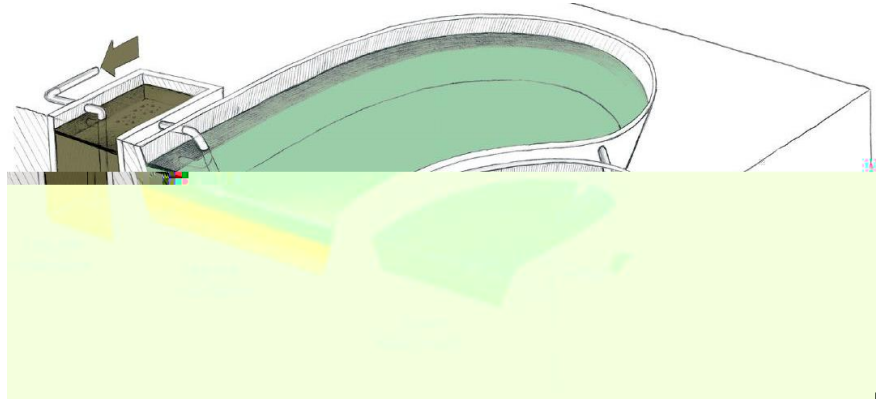


Figura 11. Tipos de lagunaje según su atmosfera.

***Tomado de:** Fuentes R. Sistemas de Depuración Natural [Internet]. Tecnología para la depuración sostenible del agua residual. 2008. p. 1-43(70).

Otro tipo de lagunas, son las lagunas aerobias o de maduración, que para lograr el ambiente, soportan bajas o nulas cargas orgánicas. Al ser tan poco profundas los rayos de sol permiten que la delgada capa de agua se evapore mucho más rápido, de esta manera microorganismos como bacterias aerobias, protozoos y algas ejercen su actividad fotosintética con el fin de proporcionar la atmosfera aerobia a la laguna. La escasa profundidad permite la insolación de la casi totalidad de la capa de agua, proliferando, además de bacterias aerobias protozoos y algas que mediante la actividad fotosintética, suministran el oxígeno necesario para la acción degradadora de las bacterias aerobias, esta actividad fotosintética incrementa el pH proporcionando un ambiente no favorable para organismos patógenos(63,69).

Un punto atmosférico medio puede encontrarse en lagunas facultativas donde la profundidad se encuentra en un término medio en cuanto a lagunas aerobias y anaerobias (1.0–2.0 m). En esta laguna, puede diferenciarse un ambiente aerobio (superficie) y un ambiente anaerobio (fondo). El oxígeno es suministrado por diferentes mecanismos como la fotosíntesis (algas) y la reaeración a través de la superficie. En este tipo de

lagunaje, las algas fotosintéticas son quienes se encargan de la mayor actividad estabilizadora de materia orgánica. Este método de tratamiento, puede no resultar viable en aguas altamente contaminadas, como es el caso de aguas residuales de origen industrial, debido a la toxicidad presentada por los componentes inorgánicos presentes en el afluente. Por lo tanto, en el lagunaje se muestra como una opción viable para la remoción de materia orgánica presente, en afluentes de origen urbano y doméstico, además resulta ser más económico que otras alternativas. Sin embargo, el lagunaje posee porcentajes de remoción considerables en cuando a DBO₅, sólidos en suspensión, N-amoniaco, y fosfatos, principales contaminantes orgánicos de las aguas residuales (Tabla 13)(69).

Tabla 13. Rendimientos de depuración en diferentes tipos de lagunaje.

PARAMETRO ELIMINADO	LAGUNAS		
	ANAEROBIAS	FACULTATIVAS	AEROBIAS
DBO₅	50 -75 %	75 – 95%	100%
STD	50 – 80 %	80- 95%	100%
N-amoniaco	0 – 15%	30 – 60%	35- 80%
Fosfatos	0 – 30%	0 – 30%	10- 60%

*Tomado de: Jaime LIG. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización Índice. 2016; 16. Pag 23(69).

4.8. Tratamientos biológicos por metabolismo anaerobio

En el metabolismo anaerobio se producen compuestos orgánicos internamente, esto quiere decir, que en ningún momento los microorganismos involucrados en descomposición de materia orgánica, tienen contacto con el oxígeno, pues sus requerimientos metabólicos así lo exigen. Al igual que en los procesos aerobios, el carbono hace parte fundamental de las reacciones químicas que participan en el metabolismo de microorganismos y ambientes anaerobios (Figura 12). Parte de la materia orgánica, CO₂, nitritos (NO₂⁻) y nitratos (NO₃⁻) o los sulfatos (SO₄⁻) participan como aceptores finales de

electrones en una cadena de transporte electrónico para la respiración anaerobia (Formula 5)(63).

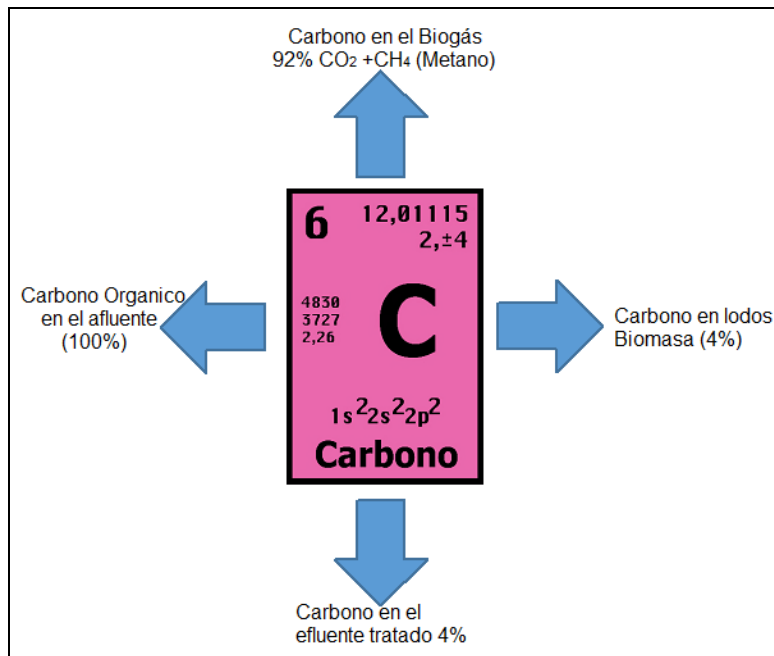
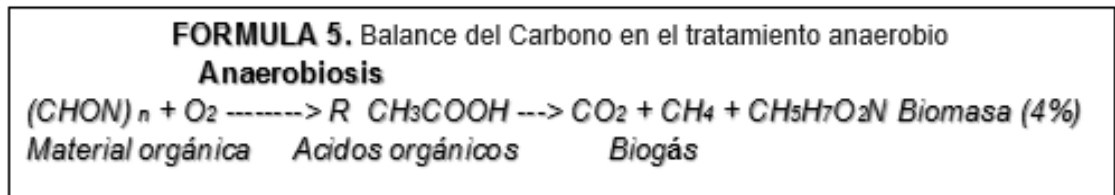


Figura 12. Balance del Carbono como elemento químico, del metabolismo aerobio en tratamientos biológicos de aguas residuales.

Fuente: autor- **información tomada de:** Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model [Internet]. 2013(63).



***Tomado de:** Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model; 2013. Pag. 9(63).

4.8.1. Digestión anaerobia mesófila

“Es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (CH₄, CO₂, H₂, H₂S, etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación”(71). Este proceso se

lleva a cabo a una temperatura de 35° C con la finalidad de cumplir con los requerimientos metabólicos de los microorganismos mesófilos. El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, constituida por metano (50 a 70 %) y dióxido de carbono (30 a 50 %), este biogás puede ser utilizado para la producción de gas natural domiciliario e industrial (Figura 13). Por otra parte, los microorganismos que no son utilizados en la producción del biogás al interior del reactor anaerobio, pueden tener un destino benéfico en la producción de biofertilizantes de suelos y alimentación animal(71).

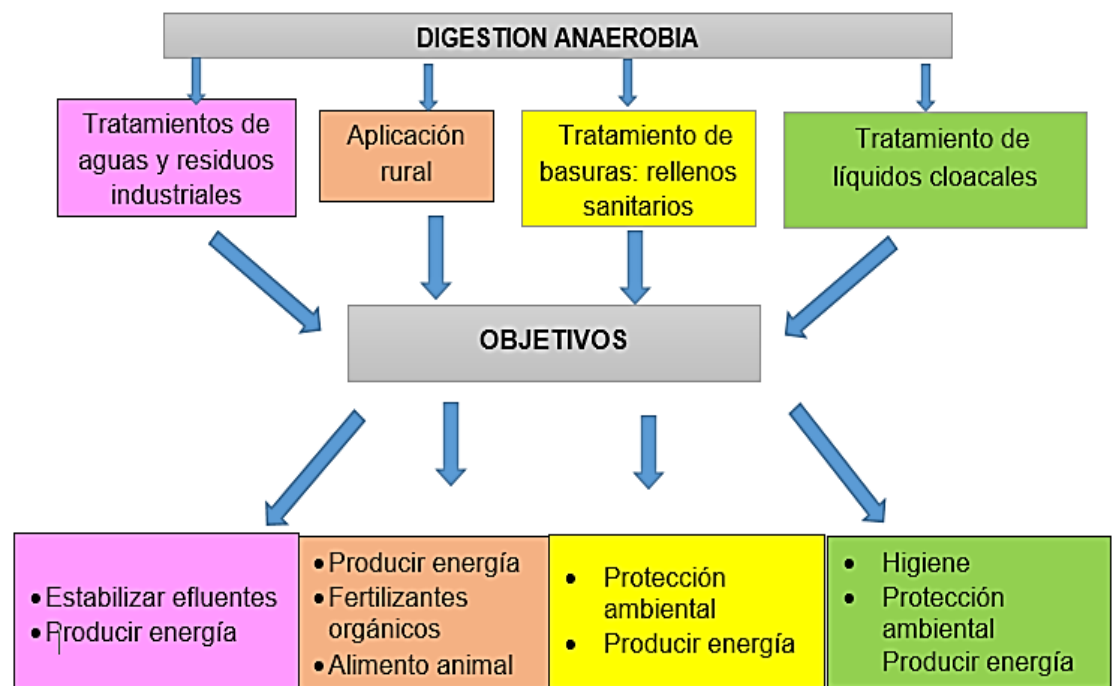


Figura 13. Fundamento digestión anaeróbica

*Adaptado de Mass K1 y Medrano Y. Artículo De Revisión: Tratamiento De Aguas Residuales a Partir De Digestión Anaerobia. Artículo. 2013(71).

4.9. Tratamientos no convencionales de aguas residuales

4.9.1. Hidrogeles

“Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales” (Barakat, 2011; Hua, et al; 2014; Rubio DI, 2015)(37).

4.9.2. Ceniza Volante

La ceniza volante, es producto de la combustión de carbón para la producción de energía, es un subproducto industrial con un elevado índice de contaminación ambiental, potencial toxico al componerse de elementos traza condensados del gas de combustión(72). La ceniza volante es utilizada como materia prima de materiales utilizados en ingeniería civil, principalmente, en la construcción de vías y carreteras, rellenos de minas, materia prima en cementos, bloques, aditivo de hormigón y ladrillos entre otros (Figura 14)(72,73). Su costo es muy bajo, motivo por el cual, a pesar de ser toxico para el ambiente, ha sido reutilizado por sus propiedades absorbentes sobre compuestos orgánicos, gases de combustión, y metales pesados(72).

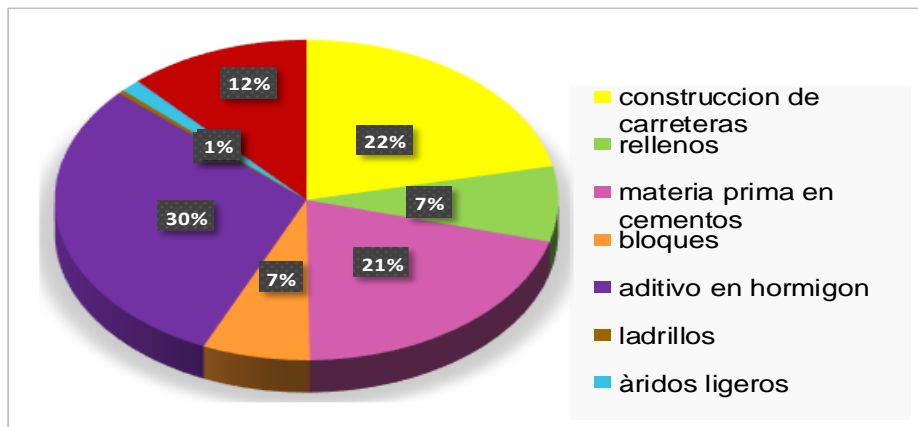


Figura 14. Distribución porcentual de las principales aplicaciones de cenizas volantes.
*Tomado de: Muñoz Lucas MI. Caracterización y acondicionamiento de cenizas volantes para la eliminación de metales pesados en aguas contaminadas;2012.(72).

4.10. Biorremediación

Algunos metales resultan ser esenciales para llevar a cabo funciones biológicas de organismos animales y vegetales, no obstante, cuando logran alcanzar concentraciones muy elevadas su efecto es revertido, causan una interferencia en las capacidades y reacciones metabólicas de dichos organismos, incluso en microorganismos; para las plantas, metales como el Pb, Cd, Hg, Cr, Zn, U, Se, Ag, Au, Ni, y As, resultan no ser tóxicos al no ser esenciales en su fisiología, y al reducir de manera drástica su crecimiento por inhibición de mecanismos fotosintéticos, nutrición minera y enzimas esenciales para el metabolismo vegetal en el (Anexo 3) se exponen los diferentes efectos tóxicos de metales pesados a formas de vida (plantas y microorganismos (74).

La biorremediación es el conjunto de técnicas que busca eliminar los contaminantes ambientales de un ecosistema, donde los sistemas biológicos como microorganismos, macrofitos, plantas entre otros para erradicar los contaminantes peligrosos y restaurar el ecosistema a su condición original, o a un estado menos toxico(73).

En la biorremediación, se aprovecha al máximo, la maquinaria microbiana en la degradación de contaminantes presentes en un ambiente estudiado, en donde los microorganismos cumplen con esta capacidad por mecanismos como la reducción de la solubilidad del medio por cambios de pH, reacciones de óxido-reducción (precipitación, secuestro y cambio de estado de oxidación en la remoción de As, Cr, Hg, y Se) y adsorción de contaminantes entre otros; el secuestro es uno de estos mecanismos, mediado por componentes de la pared celular microbiana, produciéndose una unión intracelular de proteínas, péptidos y sideróforos bacterianos con el fin de captar iones metálicos; también es posible que este metal secuestrado logre ser modificado enzimáticamente por acción bacteriana en un producto inocuo, es decir casi inactivo(74).

La mayoría de tratamientos biológicos no convencionales, buscan la eliminación total del metal hallado en el recurso que se busca desintoxicar, la biosorción se presenta como la técnica más adecuada, ofreciendo mecanismos dependientes e independientes del potencial metabólico de la biomasa, en la (Figura 15) se muestra el mecanismo de biosorción y sus variantes en la remoción de metales pesados(74).

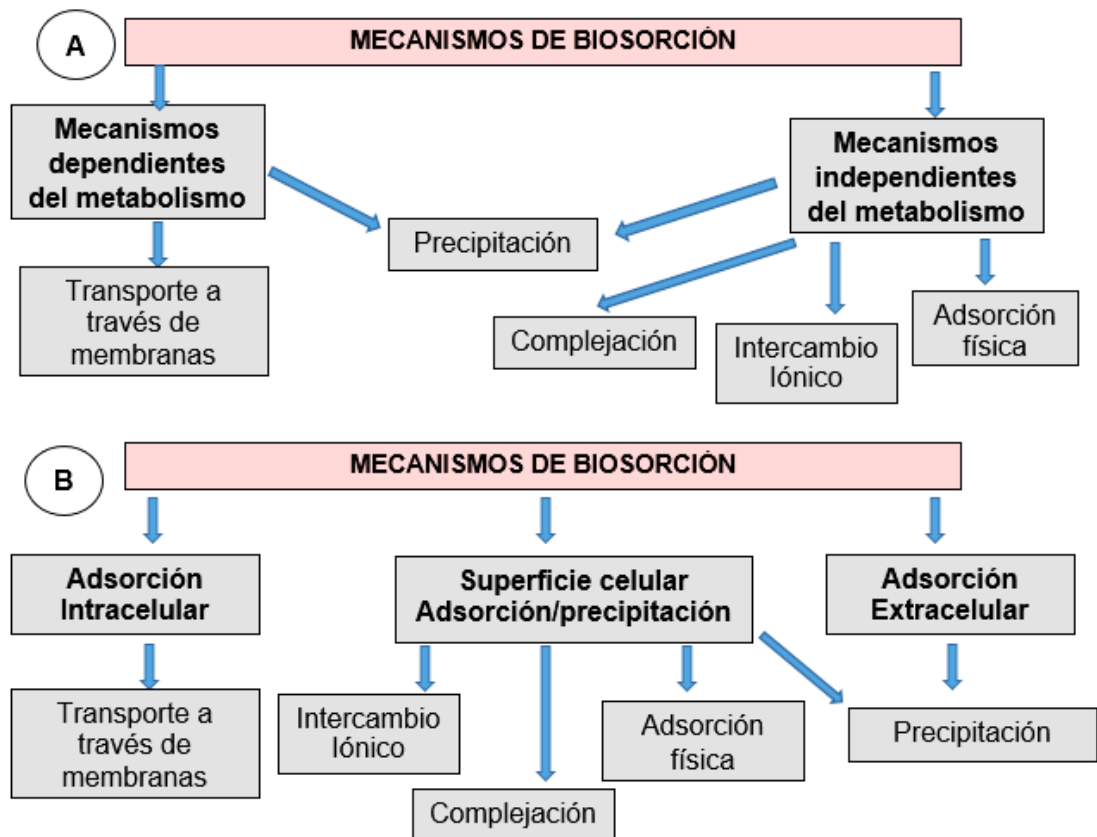


Figura 15. Mecanismos de biosorción basados en: A) dependencia del metabolismo celular; B) ubicación celular donde ocurre la remoción del metal.

*Tomado de: Ojuederie OB, Babalola OO. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. Int J Environ Res Public Health. 2017; 14(12).

Las bacterias, implementadas en la biorremediación de aguas residuales contaminadas con metales pesados, deben poseer una fuerte afinidad por los iones metálicos, afinidad que es proporcionada por grupos

funcionales que tengan carga electronegativa, como lo son los grupos hidroxilo (OH⁻), fosfato (PO₄), carbonilo (-CO), grupos carboxilo (-COOH), y grupos sulfato (SO₄), estos grupos funcionales cooperan en la remoción de iones metálicos por el mecanismo de intercambio iónico, en la (Figura 16) se comparan bacterias Gram positivas, con bacterias Gram negativas, las cuales poseen otros componentes bioquímicos microbianos que pueden hacerse participes del intercambio iónico según su naturaleza; en la (Figura 17) se muestran detalladamente los mecanismos de absorción de metales pesados por microorganismos(75). Algunos autores han reportado eficiencias de remoción de Cd, y Pb de 15,3 % - 84,6 a través de intercambio iónico por grupos carboxilo, Sulfonato, amino y sulfhidrilo presentes en algunas algas fotosintéticas; este mecanismo es también efectuado por la levadura *Sacharomyces cerevisiae*(74). En la (Tabla 14) se relacionan los microorganismos (bacterias, hongos, levaduras y algas) utilizados en la remoción de metales pesados en sitios contaminados(74).

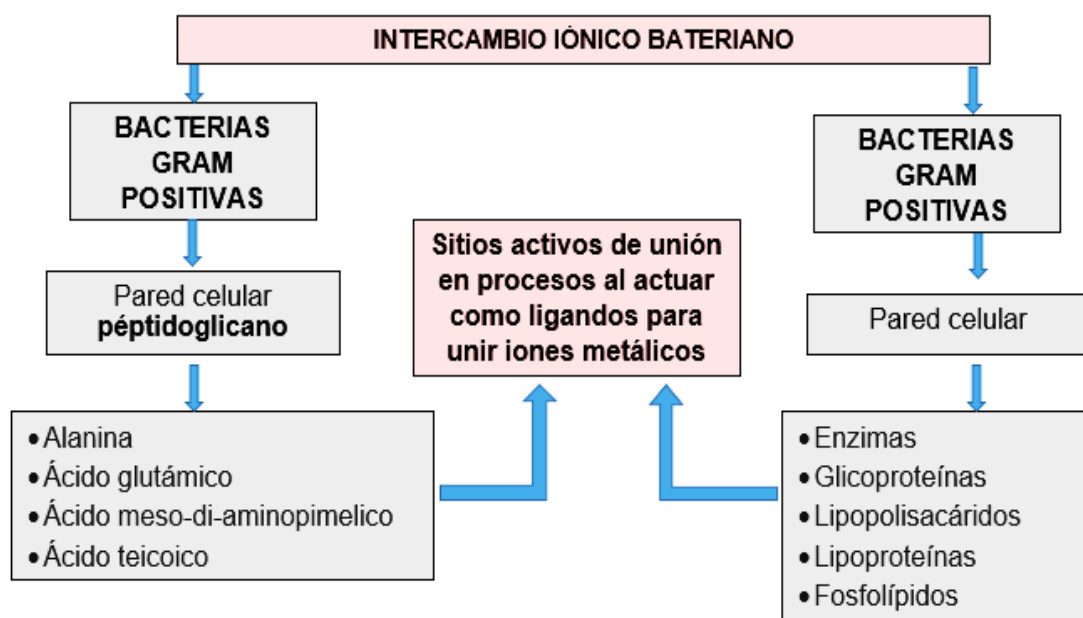


Figura 16. Sitios activos de unión a iones metálicos en proceso de intercambio iónico mediado por bacterias.

Fuente: Autor **Información Tomada de:** Ojuederie OB, Babalola OO. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. Int J Environ Res Public Health; 2017(94).

Tabla 14. Microorganismos utilizados en la remoción de metales pesados de sitios contaminados.

Bacterias	
Microorganismo	Metal pesado removido
<i>Bacillus cereus strain XMCr-6</i>	Cr
<i>Kocuria flava</i>	Cu
<i>Bacillus cereus</i>	Cr (VI)
<i>Sporosarcina ginsengisoli</i>	As (III)
<i>Pseudomonas veronii</i>	Cd, Zn, Cu
<i>Pseudomonas putida</i>	Cr (VI)
<i>Enterobacter cloacae B2-DHA</i>	Cr (VI)
<i>Bacillus subtilis</i>	Cr (VI)
Hongos	
<i>Aspergillus versicolor</i>	Ni, Cu
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Pb
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	Cr (VI)
<i>Rhizopus oryzae (MPRO)</i>	Cr (VI)
Levaduras	
<i>Sacharomyces cerevisiae</i>	Pb & Cd
Algas	
<i>Spirogyra spp. & Cladophora spp</i>	Pb (II), Cu (II)
<i>Spirogyra spp. & Spirulina spp</i>	Cr Cu, Fe, Mn, Zn
<i>Hydrodictylon, Oedogonium & Rhizoclonium spp.</i>	As

***Adaptado de:** Ojuederie & Babalola. Biorremediación microbiana y asistida por plantas de ambientes contaminados con metales pesados: una revisión. 2017(74).

La adsorción de metales pesados en aguas residuales usando material biológico comprende la captura activa o pasiva de iones metálicos por parte de microorganismos (biomasa) ya sea viva o muerta (inerte). Para comprender este mecanismo, es importante diferenciar la bioadsorción de la bioacumulación (Figura 18). En la bioadsorción se incluyen los fenómenos de adsorción y absorción, por medio de materiales sorbentes constituidos de biomasa viva o muerta, la adsorción y absorción se llevan a cabo gracias a la afinidad presentada por grupos funcionales microbianos por los iones metálicos presentes, mientras la bioacumulación solo podrá ser efectiva mediante biomasa viva(76).

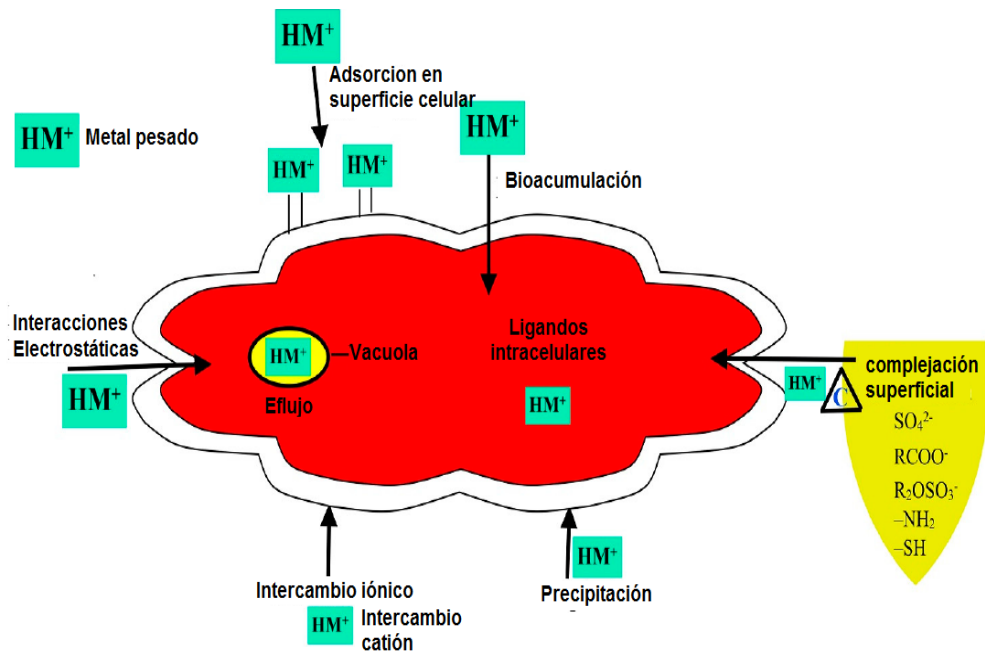


Figura 17. Mecanismos de absorción de metales pesados por microorganismos.
 *Tomado de: Ojuederie OB, Babalola OO. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. Int J Environ Res Public Health. 2017; 14(12).

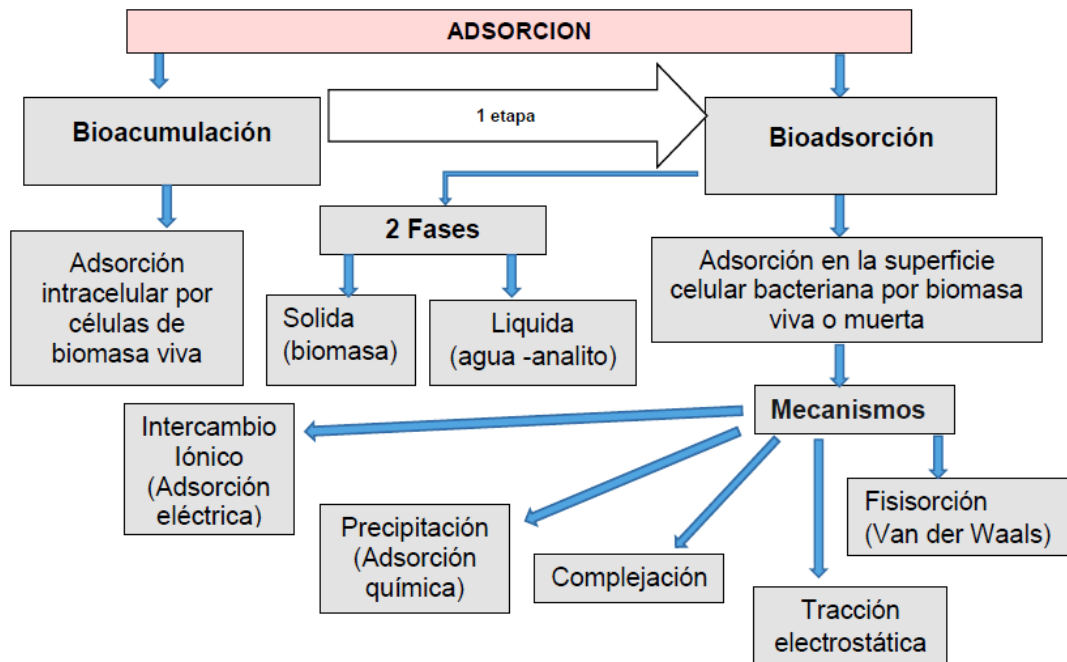


Figura 18. Diagrama comparativo entre bioacumulación y bioadsorción mediada por microorganismos.
 Fuente: Autor Información tomada de: Tejada C, et al; 2015. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. Tecno Lógicas (76).

La bioadsorción, es una técnica no convencional que puede operar a un bajo costo al no requerir de nutrientes adicionales y capacidad auto regenerativa de los microorganismos, es una técnica de alta eficiencia, en la que se minimiza el uso de productos químicos, y se reduce la producción de lodos biológicos al darle un uso eficiente a desechos agrícolas que carecían de tratamiento y que además son de fácil obtención, cascara de diferentes alimentos se han probado como material biosorbente de metales pesados, en la (Tabla 15) se relacionan algunos de estos desechos agrícolas usados como medio biosorbente(76).

Tabla 15. Materiales biosorbentes usados para la adsorción de metales pesados.

Tipo de adsorbente	Biosorbente
Organismos Vivos	<i>Penicillium</i> <i>Aspergillus Rizopus</i> <i>Paecilomyces</i>
Biomásas	Cáscara de tamarindo Cáscara de naranja Cáscara y semilla de manzana Cebada (<i>Hordecum vulgare</i>)
Biopolímeros	Bentonita – Quitosano Quitosano Epiclorhidrina trifosfato
Carbones activados	Carbón activado a partir de <i>Escherichia coli</i> y carbón activado a partir de <i>Arthrobacter viscosus</i> Carbón activado a partir de cáscara de naranja Carbón activado a partir de cáscara de coco
Modificación Químicas	Biomasa reticulada con glutaraldehído Biomasa reticulada con cloruro de calcio Biomasa modificada con ácido cítrico
Otros materiales	Arena Zeolita Cenizas volantes

*Tomado de: Tejada C, et al; 2015. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. Tecno Lógicas (76).

La bioadsorción parece ser la mejor alternativa, en cuanto que los microorganismos involucrados no son vivos, y de esta manera altas concentraciones del metal contaminantes, no tendrán efectos tóxicos que afecten su capacidad adsorbente, ni su metabolismo al no requerir nutrientes, además al ser un proceso

reversible, la biomasa puede ser recuperada para continuar con un nuevo ciclo de remoción(76).

Por otro lado, cuando se emplea biomasa viva, existen diversos factores fisiológicos propios de los microorganismos, y factores ambientales que pueden afectar tanto su crecimiento como su metabolismo. Por tal motivo microorganismos como *Agrobacterium* spp, *Alcaligenes faecalis*, *Xanthomonas campestris*, *Bacillus* spp, *Zygomonas mobilis*, *Leuconostoc*, *Pseudomonas* spp y *Acetobacter xylinum*, son algunos de los microorganismos seleccionados como biosorbentes por ser productores de EPS (Exopolisacáridos), una sustancia polimérica extracelular bacteriana, que les permite protegerse de tensiones ambientales causadas por la toxicidad, deshidratación, salinidad, pH entre otros(74). Los EPS pueden ser incorporados en procesos de biorremediación en los que se desconozca la producción de estos por parte de los microorganismos, esto es posible gracias a la implementación de EPS comerciales que incluyen alginato, gelano, ácido hialurónico, xantano, galactopol, fucopol entre otros (Tabla 16).

Tabla 16. EPS bacterianos comerciales y su microorganismo de origen.

EPS bacterianos comerciales	Microorganismos de origen
Alginato	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Gelano	<i>Azotobacter vinelandii</i> <i>Sphingomonas paucimobilis</i>
Ácido hialurónico	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Pasteurella multocida</i> cepas atenuadas de <i>estreptococos</i>
Xantano	<i>Xanthomonas campestris</i>
Galactopol	<i>Pseudomonas oleovorans</i>
Fucopol	<i>Enterobacter</i> A47

Fuente: Autor **Información Tomada de:** Ojuederie OB, Babalola OO. Biorremediación microbiana y asistida por plantas de ambientes contaminados con metales pesados: una revisión; 2017(94).

La capacidad de remoción de contaminantes por parte de los microorganismos propuesta por la biorremediación, depende de factores ambientales como temperatura, pH, y humedad, por lo cual el potencial de remoción se puede mejorar si se utilizan consorcios de cepas bacterianas en vez de un único cultivo, pues el sinergismo elaborado por consorcios

bacterianos generan una mayor resistencia al efecto toxico de los contaminantes, en la tabla 17 se muestran resultados de biosorción de metales por diferentes biosorbentes microbianos, asociando las condiciones de operación (pH, Temperatura, y tiempo)(74). “el pH de la solución acuosa es el parámetro más importante, ya que los iones hidrogeno se constituyen en un absorbato fuertemente competitivo, la adsorción de cationes se ve favorecida a $\text{pH} > 4.5$ y la adsorción de aniones a un pH bajo 1.5-4” (Ojuederie OB, Babalola OO;2017)(74).

Tabla 17. Biosorción de metales por diferentes biosorbentes microbianos.

Grupo microbiano: Bacterias						
Biosorbente microbiano	Metal	pH	T (° C)	Tiempo (h)	[] inicial de metal (mg/L)	Capacidad de sorción (Mg/g)
<i>Bacillus cereus</i> (Inmovilizado en alginato)	Hg	7	30	72	10	104.1
<i>B. laterosporus</i>	Cd Cr (VI)	7 2.5.	25	2	1000	159.5 72.6
<i>B. licheniformis</i>	Cd Cr (VI)	7 2.5	25	2	1000	142.7 62
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> (inmovilizado en zeolita)	Cu Ni Cr (VI)	7.8	37	168	100 100 100	98.2 90.1 99.8
<i>Enterobacter cloacae</i>	Pb	-	30	48	7.2	2.3
<i>Kocuria rhizophila</i>	Cd Cr	8 4	35	1	150 150	9.07 14.4
<i>Micrococcus luteus</i>	Cu Pb	7	27	12	80.24 272.39	408 1965
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Co Ni Cr (III)	5.2 5.5 3.4	25	10	58.93 58.69 52	8.92 8.26 6.42
<i>P. jessenii</i>	Ni Cu Zn	-	25	6	275 300 400	1.36 10.22 4.39
<i>Pseudomonas sp</i>	Ni Cu Zn	-	25	6	275 300 275	2.79 5.52 3.66
Bacterias sulfato reductoras	As (III) As (V)	6.9	-	24	1	0.07 0.11

Tabla 17. Continuación

Grupo microbiano: Hongos						
Biosorbente microbiano	Metal	pH	T (° C)	Tiempo (h)	[] inicial de metal (mg/L)	Capacidad de sorción (Mg/g)
<i>Aspergillus niger</i>	Cu	5	30	1	100	15.6
	Pb	4.5			100	34.3
	Cr (VI)	3.5			50	6.6
<i>Botrytis cinereal</i>	Pb	4	25	1.5	350	107.1
<i>Phanerochaete chrysosporium</i> (inmovilizado - esponja de lufa)	Pb	6	20	1	100	88.16
	Cu				100	68.73
	Zn				100	39.62
<i>Pleurotus platypus</i>	Ag	6	20	2	200	46.7
<i>Rhizopus oryzae</i>	Cu	4	35	2	100	34
Grupo microbiano: Algas						
<i>Asparagopsis armata</i>	Cd	6	-	2	135	32.3
	Ni	6	-		141	17.7
	Zn	6	-		182	21.6
	Cu	5	-		134	21.3
	Pb	4	-		124	63.7
<i>Codium vermilara</i>	Cd	6	-	2	135	21.8
	Ni	6	-		147	13.2
	Zn	6	-		182	23.8
	Cu	5	-		140	16.9
	Pb	5	-		83	63.3
<i>Cystoseira barbata</i>	Cd	4	20	1	117.4	37.6
	Ni				224.8	78.7
	Pb				414	196.7

*Tomado de: Tejada-Tovar C, et al. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico.2015(76)

5. METODOLOGIA

5.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo documental, que corresponde a un estudio descriptivo, en donde se realizó una clasificación de la información recopilada a partir de artículos científicos, libros y diferentes investigaciones,

5.2. Recopilación de la información

5.2.1. Revisión de Artículos

Se realizó una revisión de artículos científicos, publicados en bases de datos científicos y repositorios de tesis y proyectos de grado de diferentes Universidades del mundo

Toda la información de los artículos y demás documentos citados se digitaron en una matriz diseñada en Microsoft Office Excel®, las variables analizadas en esta matriz fueron, idioma, año, base de datos, objetivos, métodos utilizados, resultados obtenidos más relevantes y conclusiones.

5.3. Criterios de inclusión

- Artículos científicos e investigaciones, contenidas en un periodo de tiempo no mayor a diez años (2008-2018).
- Artículos científicos e investigaciones que incluyan el hallazgo (cuantificación), métodos de detección, quelación y remoción de metales pesados como contaminantes existentes en aguas captadas en plantas de tratamiento de aguas residuales en el mundo
- Origen de diversos países de todos los continentes.

6. RESULTADOS

Se revisó un total de 85 documentos de los cuales 62 cumplían con los requisitos de inclusión y exclusión propuestos en la metodología, estos documentos corresponden a artículos científicos, que enmarcan países como Colombia, México, Sudáfrica, Taiwán, Turquía, Francia, Italia, Egipto, EEUU, Brasil y China entre otros, en un periodo de tiempo comprendido entre los años 2008 – 2018 (Figura 19). 22 de estos documentos se extrajeron en idioma inglés, y 40 en español (Figura 20). Los artículos científicos fueron sustraídos de las siguientes bases de datos: Pubmed – NCBI (12 art), Scielo (15 art), Redalyc (5 art), Science Direct (6 art), GESC (3 art), Google Académico (4 art); de las bases de datos Springer, ResQue, Dialnet, Medigraphic, Openaccess, Research Gate y Wiley, se logró obtener un artículo científico por separado (Figura 21). Adicional a esto, fue posible recopilar información procedente de tesis y proyectos de grado, de repositorios de: Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia) Universidad Santo Tomas (Colombia), Universidad Autónoma de Nuevo León (México), Universidad El Bosque (Colombia) Universidad de Medellín (Colombia), Universidad de León (España) (1 documento obtenido de cada repositorio), Universidad Nacional de Colombia (Colombia) (3 documentos), Todos estos artículos científicos y demás documentos revisados, contienen datos que hacen alusión a la cuantificación (12 documentos), métodos de detección (12 documentos) , quelación y remoción (38 documentos) de metales pesados en aguas residuales tratadas en plantas de tratamiento (Figura 22). A continuación se describen los resultados obtenidos de esta revisión.



Figura 19. Numero de documentos revisados por año entre los años 2008-2018.



Figura 20. Idioma de publicación de los documentos consultados.



Figura 21. Bases de datos científicas consultadas

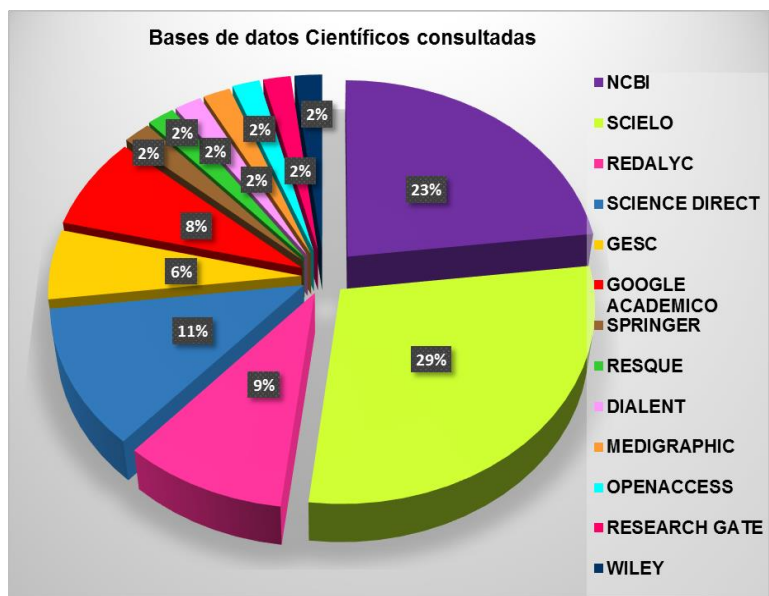


Figura 22. Eje central de investigación de cada documento revisado.

De la presente revisión, se obtuvieron los siguientes resultados:

En todas las plantas de tratamiento de aguas residuales se contempló en primera instancia la presencia de metales pesados, sobrepasando en su mayoría los valores máximos permitidos por la legislación vigente que compete a cada PTAR (Anexo 1). Los metales de interés en detección y eliminación, considerados de esta manera por su toxicidad y persistentes concentraciones fueron Cd, As, Pb, Hg, Cr, Cu, Ni y Zn.

En cuanto a técnicas de detección, en la tabla 18 se exponen ventajas y desventajas de la Espectrometría de Absorción Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) como técnica de detección(50). La técnica (HG-AAS), mostró ser una metodología aplicable a cualquier tipo de agua, en base a su acoplamiento a la caracterización química de los elementos metálicos. Con respecto a estas técnicas, la espectrometría de Absorción Atómica de llama (FAAS), es una técnica que permite una mayor especificidad, pues cada elemento puede ser detectado en un rango de longitud específico, sin embargo la Espectrometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (EAA-HG), puede ser

mucho más eficaz que (FAAS) al reemplazar la llama por el tubo de grafito como medio atomizador. Además de la detección, la recuperación de metales pesados es un parámetro importante para calificar estas técnicas, donde la fluorescencia atómica ofrece esta gran ventaja en una mayor proporción. La FAAS, (EAA-HG) y técnicas voltamperométricas, son las técnicas más sensibles capaces de detectar concentraciones a nivel de ppm.

Tabla 18. Ventajas y desventajas de Espectrometría de Absorción Atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Menor interferencia entre analitos (elevada temperatura). ✓ registrar simultáneamente espectros para docenas de elementos. ✓ determinación de bajas concentraciones de elementos que tiende a formar compuestos refractarios. ✓ Determinación de compuestos muy resistentes a descomposición. térmica, tales como B, P, U, Zr Nb. ✓ determinación de no metales como Cl, Br, I y S. ✓ Concentración en varias magnitudes. ✓ Menos tiempo de Análisis. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Instrumentación costosa. ✓ Mayor costo de operación que EAA. ✓ Menor precisión que EAA.

*Tomado de: Barve KH, Laddha KS, Jayakumar B. Extraction of saponins from safed musli. Pharmacogn J. 2010; 2(13):561–4. (50).

La coagulación-floculación fue la técnica química más eficaz puesto que alcanzó eficiencias de remoción sobre Mg y Fe del 100% con Ca (OH)₂, por otro lado, metales como Fe, Zn y Ni, fueron removidos hasta en un 98% con alumbre cloruro férrico (FeCl₃), y cloruro de polialuminio (PAC) como coagulantes. Además, es una técnica que está contemplada como parte del tratamiento primario del agua residual. Su eficiencia es crítica en la obtención de resultados óptimos de técnicas como la filtración por membrana.

De las metodologías convencionales, se puede resaltar la precipitación química, técnica que depende de un pH óptimo, parámetro vital en cualquier etapa del tratamiento tanto primario, convencional, no convencional y biológico

La alta producción de lodos residuales es la razón por la cual se ha buscado reemplazar métodos primarios y convencionales como convencionales de filtración por membrana y precipitación química.

El tratamiento biológico, como se ha descrito anteriormente se basa en la capacidad metabólica de los microorganismos, cuyo principio fundamental se ha demostrado con reacciones que involucran mecanismos de bioadsorción y bioacumulación, cuyas ventajas y desventajas se relacionan en la tabla 19. Estos mecanismos de remoción son los más innovadores, recientes, y que pueden alcanzar elevadas tasas de eliminación de metales pesados si se logran estandarizar las condiciones necesarias para el desarrollo de la biomasa involucrada.

Tabla 19. Ventajas y desventajas de los mecanismos de captación de iones metálicos.

Bioadsorción	Bioacumulación
Proceso pasivo	Proceso activo
Biomasa sin vida	Biomasa con vida
Metales unidos a la superficie celular	Metales unidos a la superficie de la pared celular y acumulados en el interior de la célula
Proceso reversible	Proceso parcialmente reversible
No requiere nutrientes	Requiere nutrientes
Rápido	Lento
No es controlado por el metabolismo	Controlado por el metabolismo
No se ve afectado por el efecto toxico de los contaminantes	Se ve afectado por el efecto toxico de los contaminantes
No hay crecimiento celular	Implica crecimiento celular
Alcanza concentraciones intermedias de equilibrio de los contaminantes	Alcanza muy bajas concentraciones de equilibrio de los contaminantes
Posibilidad de recuperación y reúso de los contaminantes mediante un proceso de desorción	Los metales no pueden recuperarse
La biomasa puede regenerarse y emplearse en varios ciclos de adsorción	La biomasa no puede recuperarse

***Tomado de:** Tejada C, et al; 2015. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. Tecno Lógicas (76).

7. RESULTADOS MÁS RELEVANTES OBTENIDOS DE LOS DOCUMENTOS REVISADOS

7.1. Cuantificación

Jingjing F. Et al 2018, evaluaron el rendimiento del tratamiento de aguas residuales captadas en 12 PTAR`S de Shanghai, la ciudad más grande de China, la cual basa su economía en la industria automotriz, petroquímica, fabricación de acero, ingeniería biomédica entre otras actividades que demandan el uso y descarte de metales pesados. En este estudio, lograron detectar niveles de Mn, As, Cr, Zn, Pb, Ni, Cu, Hg, Cd (Tabla 20). Además de detectar estos metales, y a pesar de obtener una reducción de sus niveles en el efluente de la planta, se encontraron niveles críticos para Cu, Ni, Pb, considerándose como contaminantes con potencial efecto nocivo(13).

Tabla 20. Concentración de metales pesados en agua influente y efluente de las PTAR`S y ER (Eficiencia de Remoción).

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Influente Ug/L⁻¹	3.0	0.11	37.5	87.2	0.06	262.1	86,2	1.9	311.3
Efluente Ug/L⁻¹	1.0	0.06	3.0	9.7	0.05	134.6	43.0	0.5	71.6
ER %	66.7	45.5	92.0	88.9	16.7	48.6	50.1	73.7	77.0

***Tomado de:** - Feng J, Chen X, Jia L, Liu Q, Chen X, Han D, et al. Concentración de efluentes y eficiencia de eliminación de nueve metales pesados en plantas de tratamiento secundario en Shanghai, China(13).

Concentraciones de productos farmacéuticos que oscilan entre 0,0016 a 373 ug/L. y otros contaminantes como metales pesados también se detectaron en aguas residuales industriales captadas en la PTAR Atapaneo, de Morelia, Michoacán, México. Los metales pesados detectados por espectrofotometría de absorción atómica en las muestras analizadas fueron Mn, Zn, Fe y Cu. El Fe fue

el metal que predominó en cuanto a su concentración en agua influente, pero fue uno de los metales con menor concentración post tratamiento, concentración que cumplía con los valores de referencia (Tabla 21)(3).

Tabla 21. Valores de los parámetros físicos y químicos y metales traza en los influentes y efluentes de la PTAR Atapameo.

Parámetro (unidad)	Afluente		Efluente		VR
	Rango	Media	Rango	Media	
pH	6.8 – 7.8	7.1	6.4 – 7.4	7.0	6.5 – 8.4
Conductividad(us/cm)	454 – 917	710	588 – 688	618	200 -700
STD (mg/L)	227 – 910	372	294- 345	309	
Mg (meq/L)	0.5 – 1.3	0.9	0.6 – 1.0	0.7	
Na – Sodio (meq/L)	1.9 – 4.6	3.5	2.6 – 3.9	3.1	
RAS	2.3 – 3.9	3.1	2.6 – 3.9	3.1	0 – 3
Mn - Manganeso	0.3 – 1.1	0.5	Nd – 0.3	0.1	0.2
Zn - Zinc (mg/L)	Nd – 1.2	0.3	Nd - 0.3	0.2	2.0
Fe - Hierro (mg/L)	Nd – 53.8	8.7	Nd – 1.2	0.5	5.0
Cu – Cobre (mg/L)	Nd – 1.1.	0.1	Nd - 0.1	0.01	0.2

*Tomado de: Robledo VH, et al. Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. Rev Int Contam Ambient. 2017; 33(2):221–35.

Duan B. Et al 2017, analizaron muestras de lodo de aguas residuales, con el fin de detectar siete metales pesados en los lodos de alcantarillado de 9 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (EDAR) en Taiwán que tenían la aplicación más alta para uso agrícola. Los contenidos de Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, As y Cd en los lodos de aguas residuales se encontraban dentro de los límites estándar de las Normas de Control de China para los Contaminantes en los Lodos del Uso Agrícola (GB4284-84) y menores que los de otras regiones de China. Los metales pesados se clasificaron en el siguiente orden: Cd> Zn> Cu> As> Cr> Ni> Pb, siendo la contaminación por Cd la más alta, la contaminación por Zn moderada, y la contaminación por Pb, Cu, Ni, Cr y As era menor (Tabla 22)(11).

Tabla 22. Concentraciones de metales pesados (mg / kg) en lodos de alcantarillado de 9 EDAR de Shanxi, China

Estación	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	As	Cd
1	4.13	109.88	379.00	18.50	169.88	11.88	0.87
2	2.63	115.13	381.75	84.88	169.00	10.01	0.66
3	12.75	77.38	561.00	32.50	312.00	9.82	0.69
4	3.25	84.25	436.38	30.00	87.50	11.14	0.69
5	6.50	9.88	98.50	8.25	29.50	6.61	0.52
6	32.92	66.09	203.42	29.04	76.23	8.34	0.27
7	2.99	11.95	5.98	0.75	1.49	23.90	0.45
8	14.25	177.25	531.13	66.00	239.25	8.85	0.82
9	24.88	253.00	386.38	38.63	244.63	13.48	0.83
Media	11.59	100.53	331.50	34.28	147.72	11.56	0.65
Máximo	32.92	253.00	561.00	84.88	312.00	23.90	0.87
Mínimo	2.63	9.88	5.98	0.75	1.49	6.61	0.27
VMCH	131	486	1450	77.5	185	11.5	2.97
GB4284-84 (Chínesa Control Standards for Pollutants in Sludge from Agricultural Use)							
pH < 6.5	1000	1500	3000	100	1000	75	20
pH > 6.5	300	800	2000	200	600	75	5

***Tomado de:** Duan B, et al. Situación de eliminación de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (WWTP) y evaluación del riesgo ecológico de los metales pesados para su uso de la tierra en Shanxi, China. Int J Environ Res Public Health. 2017(11).

Mervat MA, et al; 2016, en un intento por evaluar y mejorar la biorremediación de metales pesados en soluciones acuosas, detectaron en aguas residuales de diez zonas industriales de Egipto (10th Ramadan, Gesr El Suez, ciudad de Badr, 6 de octubre, Shubra El-Kheima, ciudad de Sadat, Borg El-Arab, Abu-Rawash, zona libre-ciudad de Nasr y El-Amerya) niveles altamente peligrosos de Ni (0,27 – 31,50 mg/L⁻¹), Cr (1,50 – 9,74 mg/L⁻¹), Zn (1,91 – 9,74 mg/L⁻¹). Estos niveles fueron contrastados, con la zona industrial de su detección, junto con la actividad industrial de mayor interés en cada una de las zonas, algunas de las actividades industriales involucradas fueron: virutas de acero, alto voltaje, electricidad, pinturas, alimentos, imprenta, química, medicina, ingeniería electromecánica, cloruros, suministros médicos entre otras. En donde la fabricación de pinturas y alto voltaje, generaron la mayor tasa de metales pesados en aguas residuales captadas (Tabla 23)(77).

Tabla 23. Análisis de aguas residuales recolectadas de diferentes regiones industriales de Egipto.

industria	Región	Metal analizado (mg/L)		
		Ni ²⁺	Cr ⁶⁺	Zn ²⁺
Viruta de acero	10th Ramadan	25.16	3.1	5.84
Alto voltaje	10th Ramadan	31.50	2.0	6.01
Electricidad	10th Ramadan	18.22	3.15	3.15
Pintura	10th Ramadan	2.09	7.25	9.74
Alimentos	10th Ramadan	0.85	1.80	1.9
Acero	Gesr El Suez	20.25	4.2	6.05
Imprenta	Gesr El Suez	11.38	3.0	4.00
Química/medicina	Ciudad de Badr	4.59	4.13	6.51
Ing. Electromecánica	6th Octubre	29.16	5.06	3.00
Electricidad	Shubra El-Kheima	18.41	7.41	4.83
Suministros médicos	Zona libre, ciudad de Nasr	2.90	2.80	6.10

*Tomado de: El-Gendy MMAA, Et al. Evaluación y mejora de la biorremediación de metales pesados en soluciones acuosas por *Nocardia* sp. MORSY1948 y *Nocardia* sp. MORSY2014. Brazilian J Microbiol [Internet]. 2016;(77)

Bursa, siendo la cuarta ciudad más grande de Turquía, cuenta con una población que asciende a los 2.230.000 habitantes de acuerdo a un censo poblacional realizado en el año 2008. La economía de Bursa, se basa en el desarrollo de sectores industriales como el textil, automotriz, alimentario, y metalúrgico(78). Esta ciudad debe tener la capacidad de tratar cerca de 240.000 m³ de aguas residuales. Salihoglu NK. Et al. 2012, evaluaron los niveles de metales de fuentes urbanas en afluentes, efluentes y lodos procedentes de dos PTAR`S municipales de Bursa. Evaluando la eliminación de metales como Al, As, Cd, Cr Total, Cu, Fe Total, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn y Zn, previamente determinados, siendo el Al y el Fe Total, los más abundantes tanto en aguas afluentes y efluentes, como en los lodos obtenidos de ambas plantas. Se detectaron niveles cercanos a 1,8 mg/L, y 2,6 mg/L de Al y Fe total respectivamente en ambas plantas en aguas captadas o afluentes. Estas concentraciones se mantuvieron casi constantes en efluentes de ambas plantas (Figura 23). en los lodos

deshidratados obtenidos en ambas plantas las concentraciones aumentaron proporcionalmente respecto a afluentes y efluentes (Tabla 24) (78).

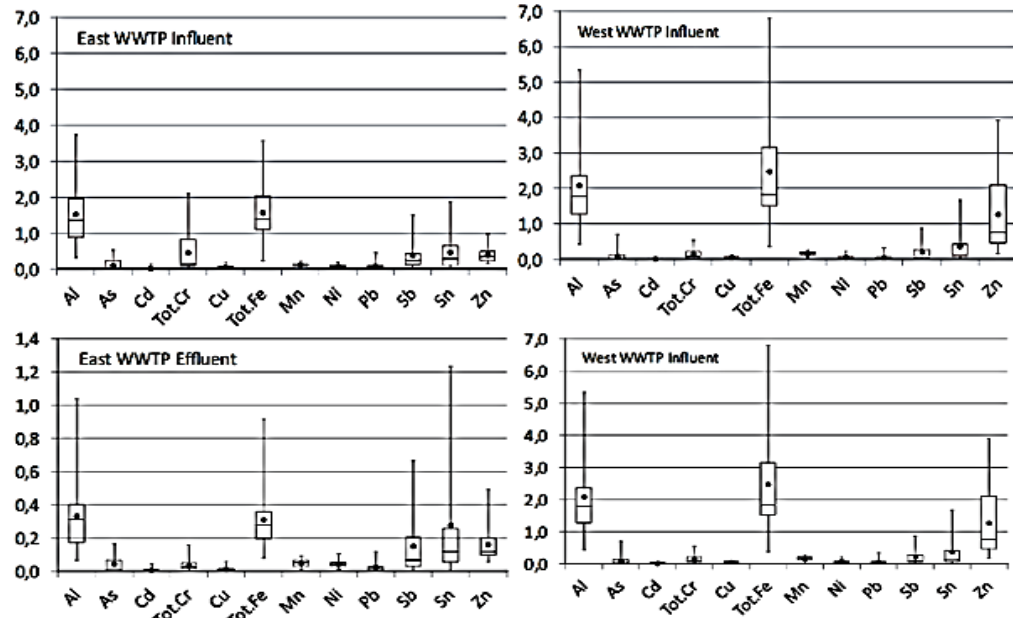


Figura 23. a. Concentración de metales pesados en agua afluente a PTAR`S 1 Y 2 **b.** Concentración de metales pesados en agua efluente de PTAR`S 1 (East – Este) Y 2 (West-Oeste).

* **Tomado de:** Salihoglu NK. Evaluación de los niveles de metales de fuentes urbanas en los efluentes, efluentes y lodos de dos plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de Bursa, una ciudad industrial en Turquía 2013(78).

Tabla 24. Concentración de metales pesados en lodos deshidratados de 2 PTAR`S Bursa – Turquía. Al y Fe Total como metales más abundantes.

Planta 1 (East) Lodo deshidratado		Planta 2 (West) Lodo deshidratado	
metal	Mg/kg dw	Metal	Mg/kg/dw
Al	6.85	Al	7.53
As	0.85	As	1.04
Cd	0.10	Cd	0.09
Cr-Total	0.81	Cr-Total	0.85
Cu	0.63	Cu	0.50
Fe-Total	5.21	Fe-Total	6.43
Mn	0.43	Mn	0.44
Ni	1.65	Ni	0.84
Pb	0.54	Pb	0.35
Sb	1.81	Sb	2.18
Sn	0.96	Sn	1.03
Zn	3.95	Zn	4.57

***Tomado de:** Salihoglu NK. Evaluación de los niveles de metales de fuentes urbanas en los efluentes, efluentes y lodos de dos plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de Bursa, una ciudad industrial en Turquía. 2013(78).

Tras analizar muestras de aguas residuales industriales de un vertedero histórico en un área minera en Witbank, Mpumalanga, sur África (Kamika I, Momba MNB I; 2013) hallaron niveles de metales pesados que exceden los límites máximos por ONU-FAO (Tablas 25 y 26) Las determinaciones de metales pesados se llevaron a cabo por el método espectrofotométrico de emisión óptica de plasma de pareja inductiva (75).

Tabla 25. NCM (Niveles de Contaminación Máximos) de metales pesados según FAO-OMS.

METAL PESADO	NCM FAO-OMS
Cobalto (Co)	0,05
Níquel (Ni)	0,2
Manganeso (Mn)	0,1
Vanadio (V)	0,1
Plomo (Pb)	0,01
Cobre (Cu)	0,01
Zinc (Zn)	0,1
Cadmio (Cd)	0,005

***Tomado de:** Kamika I, Momba MNB. Evaluación de la capacidad de resistencia y biorremediación de especies bacterianas y protozoarias seleccionadas para metales pesados en aguas residuales industriales ricas en metales.2013(75).

Tabla 26. Concentración de metales pesados hallados en PTAR área minera en Witbank, Mpumalanga, Sur África.

Parametro	Media
pH	4.06 +/- 0.09
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	132.89 +/- 15.21
OD (Oxígeno Disuelto)	6.38 +/- 0.03
Co (Cobalto)	8.82 +/- 2.14
Ni (Níquel)	11.48 +/- 8.35
Mn (Manganeso)	18.79 +/- 5.39
Mg (Magnesio)	191.25 +/- 8.79
V (Vanadio)	100.69 +/- 8.64
Pb (Plomo)	1.53 +/- 0.02
Ti (Titanio)	0.47 +/- 0.00
Cu (Cobre)	5.9 +/- 0.02
Zn (Zinc)	19.74 +/- 0.29
Al (Aluminio)	227.89 +/- 19.50
Cd (Cadmio)	24.32 +/- 0.96

***Tomado de:** Kamika I, Momba MNB. Evaluación de la capacidad de resistencia y biorremediación de especies bacterianas y protozoarias seleccionadas para metales pesados en aguas residuales industriales ricas en metales.2013(75).

En una planta de tratamiento de aguas residuales en Bangkok, Tailandia, El Fe, y el Cu, fueron los metales más abundantes detectados en agua afluyente, efluente y en lodos obtenidos en la planta (Figura 21). Las Variaciones entre afluyente y efluente fueron significativas, lo cual podría estar asociada con la actividad económica por empresas de pequeña escala. Tres distritos en el área central de Bangkok, que tienen un total de alrededor de 5235 industrias, donde el 90% de estas empresas de pequeña escala como procesadores de alimentos, textiles y prendas de vestir, galvanoplastia, fabricación de plásticos e industrias del cuidado automotriz. En este estudio, se compararon las concentraciones de metales pesados detectados entre plantas de tratamiento de diferentes países. Los metales que se encontraron presentes en todas las plantas analizadas fueron el Cd, Cu, y Pb, y en una menor proporción el Zinc, el cual estuvo ausente o no detectado en una de las plantas (Seine Aval/Paris - Francia). El metal con mayores concentraciones fue el Fe Total (Tabla 27)(79).

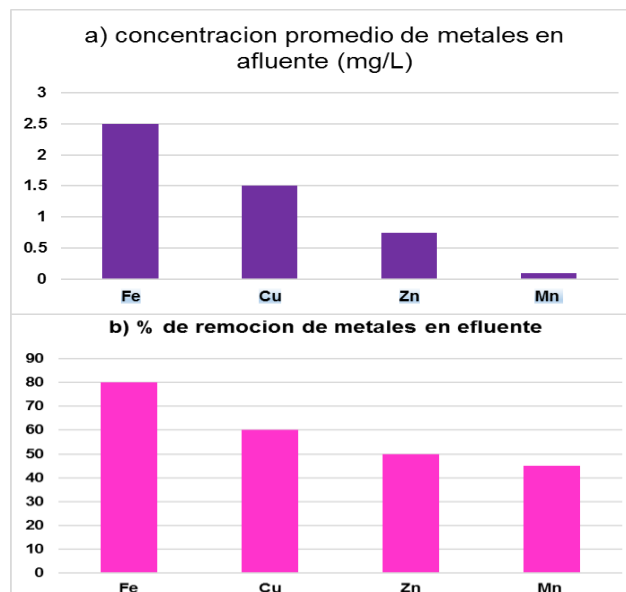


Figura 24. (a) Concentraciones de metal promedio en influente mg/L **(b)** Eficiencia promedio de eliminación de metal en efluente.

***Tomado de:** Chanpiwat P. et al. Variación del contenido de metales en aguas residuales y lodos activados de las plantas centrales de tratamiento de aguas residuales de Bangkok. 2010(79).

Tabla 27. Metales pesados en afluentes captados en PTAR en diferentes países.

REGION (PTAR)	TIPO DE AGUAS RESIDUALES	Metales en Afluentes ug/L											
		Al	As	cd	CrT	Cu	Fe T	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn
Seine – Aval (Paris - Francia)	M+I 1.740.000 m ³ /día			0.69	9.42	65.17	682.4		10.92	18.56			
Ribeirao Preto (Sao Paulo Brasil)	M+I 40.000 m ³ /día			0.15	6.87	17.31		52.53		37.42			79.2
5 Central (Bangkok –Tailandia)	M+I (25%) 577.000 m ³ /día			233	18.6	455.1	17217	209.32	32.21	13.97			310.9
Central Thessaloniki (Grecia)	M+I (10%) 135.000 m ³ /día			3.3	40	79	480	67	770	39			470
Fusina (Venecia – Italia)	M+I 100.000 m ³ /día	4320	8.4	1	17.8	108	4650	91	46	31.1			356
Gdansk WWT (Gdansk – Polonia)	M+I			13		100				50			470
WWTP Este (Bursa – Turquía)	M+I (20%) 240.000 m ³ /día	1526	105	18	456	48	1571	114	77	87	380	468	405
WWTP Oeste (Bursa - Turquía)	M+I (35%) 87.500 m ³ /día	208.4	78	7	147	51	2478	154	66	49	209	367	1266
PROMEDIO CONCENTRACION				34.5	99.4	115.4	4513.1	114.642	167	40.756			479.6

	AUSENCIA - NO DETECTADO
	MAYOR CONCENTRACION
	MENOR CONCENTRACION
	MAYOR PREVALENCIA
	MAYOR CONCENTRACION PROMEDIO

(Municipal + Industrial)

Fuente: autor – **información tomada de:** Variación del contenido de metales en aguas residuales y lodos activados de las plantas centrales de tratamiento de aguas residuales de Bangkok. 2010(79).

7.2. Métodos de detección

Álvarez C. Et al; 2014, cuantificaron la presencia de arsénico y selenio en aguas de diferentes procedencias, tanto superficiales como residuales industriales, así como con muestras certificadas, internas de control rutinario y las empleadas en las pruebas de desempeño del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y MOL LABS (Laboratorio de Metrología Química) en Colombia; con el fin de confirmar la aplicación correcta del método (HG-AAS) para el análisis de aguas(44). Este método de referencia se encuentra descrito en la edición 22 de los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales , 3114 B y C APHA-AWWA (American

Public Health Association - American Water Works Association)(80). En esta investigación, se consideró que el método puede ser aplicado de manera correcta para todo tipo de aguas; sin embargo las muestras deben sufrir un pre- tratamiento o digestión, y conservar la matriz ácida de la reacción proporcionada por ácido clorhídrico (HCl) (44).

Martins P. Et al. 2008 propone la aplicación de una sustancia polimérica extracelular (EPS) bacteriana en la biorremediación de metales pesados (Cd, Zn y Cu) por un consorcio microbiano en un sistema acuoso co-contaminado con hidrocarburos. En este estudio, con finalidades analíticas, los autores implementan la técnica de espectrometría de absorción atómica de llama para la determinación de metales pesados en las muestras obtenidas en donde tienen en cuenta una serie de longitudes de onda para la determinación de cada analito (Cd - 228.8 nm, Zn - 213.9 nm, Cu 324.8 nm). Estas características analíticas fortalecen la especificidad del método, ya que cada elemento cuantificado posee una energía de transmisión electrónica única.

Azizi S, Kamika I, Tekere M. 2016, cuantificaron la presencia de metales pesados en aguas residuales de una planta local de tratamiento en Mafikeng, Sur África con el fin de evaluar la efectiva aplicación de un bioreactor de lecho empacado y modificado (PBBR) para ser implementado como sistema para la eliminación de metales pesados. Los metales pesados analizados fueron Zn, Cu, Cd y Ni. Estos analitos fueron detectados y cuantificados por medio del analizador automatizado Shimadzu Modelo AA 6300, el cual permite un doble análisis en cuanto a la variación del método original, pudiendo determinar Pb desde 0,1 ppm en (FAAS), y hasta 0,3 ppb de plomo en horno de grafito. Los límites de cuantificación en este estudio fueron de 6 ug/L, 1,5 ug/L, 0.8 ug/L, 1,5 ug/L para Ni, Zn, Cd, y Cu respectivamente. En este caso la sensibilidad de EAA en Horno de Grafito es superior a la mostrada por FAAS(81).

Ates N. & Uzal N. 2018, propusieron la filtración por membrana como sistema de eliminación de metales pesados de aguas residuales producto de

oxidación anódica para la obtención de aluminio. Dentro de su propuesta metodológica, con el fin de evaluar las concentraciones iniciales, implementaron el método espectrométrico de absorción atómica, en la búsqueda de Al, Ni, y Cr, buscando un mínimo de detección de 0.004 mg /L de cada uno de los analitosz. Los resultados fueron satisfactorios debido a la alta sensibilidad presentada por la técnica espectrométrica(10)

Jingling F. Et 2018, determinó concentraciones de Zn, Mn, Cu, Ni, Cr, As, Pb, Cd y Hg para afluentes y efluentes con el fin de evaluar el porcentaje y eficiencia de remoción en plantas de aguas residuales en Shanxi, China, por medio de tres técnicas analíticas: fluorescencia atómica (As y Hg), EAA-HG (Cd), Y EAA convencional (Cu, Zn, Cr, Pb). Se evaluó, porcentaje de exactitud, precisión (Tabla 28). Como conclusión de este análisis, se puede decir que método con mayor exactitud, precisión y porcentaje de recuperación fue EAA-HG PARA Cd, seguido de EAA convencional para Pb(13).

Tabla 28. Límites de detección por espectrofotometría de fluorescencia en plantas de tratamiento de aguas residuales en Shanxi, China.

Metal	Exactitud %	Precisión %	Recuperación%	LD mg/kg
Cu	2,1	-20	94,5	0,9
Zn	1,3	-2,1	96,6	10
As	1,8	-1,9	97,0	0,013
Hg	5,6	-7,0	92,2	0,003
Pb	3,5	-5,1	93,2	0,5
Cd	2,8	6,4	106,1	0,06
Cr	1,8	-2,9	95,4	4,2

***Tomado de:** Feng J, et al; Concentración de efluentes y eficiencia de eliminación de nueve metales pesados en plantas de tratamiento secundario en Shanghai, China.2018(13).

Mancilla O. Et al 2011. Cuantificaron As y metales pesados totales: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn. Los metales pesados se determinaron mediante el uso de un ICP (“Inductively Coupled Plasma”) Pekín Elmer Optima 5300, utilizándose la metodología recomendada por la EPA (Environmental Protection

Agency) y APHA (American Public Health Association). Estableciendo límites de detección desde 0,024 hasta 8,5 ug/l (Tabla 29)(8).

Tabla 29. Límites de detección de ICP (“Inductively Coupled Plasma”) Pekin Elmer Optima 5300.

Metal	Límite de detección
Pb	5,0 ug/L
Hg	0,024 ug/L
Zn	8,0 ug/L
Cd	1,5 ug/L
Cu	3,0 ug/L
Cr	5,0 ug/L
Ni	1,5 ug/L
As	0,05 ug/L

***Tomado de:** Mancilla Villa ÓR, et al. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México.2011(8).

Macías C, García M& Colmenares P. 2016, validaron el método voltamperométrico de onda cuadrada (OSWV), para la cuantificación de Cd²⁺ y Pb²⁺ en aguas superficiales de la quebrada Las Torres del sector Parque Industrial en Sogamoso (Colombia), hallando una concentración de: Pb²⁺ 0,750±0,067 mg/L y Cd²⁺ 0,570±0,071 mg/L, los cuales Sobrepasan los límites máximos establecidos por las normas nacionales (Decreto 4728/2010) e internacionales vigentes para aguas residuales. En este estudio se utilizó solución Britton - Robinson como electrolito de soporte a pH 4,8, carbón vítreo como electrodo de trabajo, Ag/AgCl como electrodo de referencia y platino como electrodo auxiliar, presentando un límite de detección de 211 µg/L para Pb y 268 µg/L para Cd, donde los resultados obtenidos se compararon con el método de referencia espectrofotometría de absorción atómica, concluyendo que el método validado presentaba resultados analíticos con un nivel de confianza del 95% (Tabla 30)(12).

Tabla 30. Comparación de resultados del método voltametrico OSWV frente al método de referencia EAA (espectrometría de Absorción Atómica)

Muestra		Concentración ug/L	
		Voltametría de onda cuadrada OSWV (95 % confiable)	Espectrofotometría de absorción atómica EAA (95 % confiable)
Muestra con estandar de Pb y Cd (0,2 mg/L)	Cd	679	690
	Pb	711	705
Muestra natural	Cd	364	359
	Pb	347	339
Estandar de Cd y Pb (0,9 mg/L)	Cd	964	968
	Pb	947	944

*Tomado de: Macías Socha C, et al. Determinación Electroquímica De Plomo Y Cadmio En Aguas Superficiales.2017(12).

7.3. Quelación y remoción por tratamientos primarios

Los agentes floculantes mayormente utilizados son las sales de aluminio (sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, policloruro de aluminio y polímero inorgánico de aluminio), alumbre ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$), y Sales de hierro como el cloruro férrico ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$), sulfato de hierro (III) ($Fe_2(SO_4)_3$), los cuales muestran porcentajes de remoción significativos (hasta 100%), y en periodos de tiempo relativamente cortos (Tabla 31)(58).

Tabla 31. Remoción de metales pesados mediante Coagulación-Floculación.

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[] inicial	t _r horas	T ° C	Método y complemento		
Fe Zn Ni	7	Fe 15,2 mg/L Zn 5,8 mg/L Ni 6,7 mg/L	30 min	Am	Tres coagulantes (alumbre, cloruro férrico, y cloruro de polialuminio) y como floculante poliacrilamida anionico	98% 83% 63%	Bakar, et al; 2015
Mg Fe	8-9	308,7 mg/L 145,6 mg/L	2-15 min	28	Se utilizó como coagulante $Ca(OH)_2$	91,3% 100%	Carrera, et al; 2012

Esp (Especia metálica) [] (Concentración), t_r horas (tiempo de tratamiento en horas), T ° C (temperatura en grados centígrados), R% (porcentaje de remoción), Ref (referencia) *Tomado de: Caviedes D. Et al. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Pág. 9(37).

7.4. Quelación y remoción por tratamientos convencionales

Ates N & Uzal N; 2018, compararon la eficiencia de los métodos de filtración por membrana y precipitación química para la remoción de metales pesados en aguas residuales producto de recubrimiento de perfiles de aluminio, en una planta industrial de Turquía. Los parámetros a evaluar además de las concentraciones de metales pesados (Cr Total, Al y Ni) fueron la conductividad, y el pH principalmente, en la tabla 32 se muestra la caracterización inicial de las muestras de agua (tomadas por triplicado), y en la tabla 33 se muestra las condiciones y eficiencia de remoción de cada método utilizado en este estudio(10).

Tabla 32. Caracterización de aguas residuales sin procesar producto de la obtención de perfiles de aluminio.

Parametro	Valor
pH	2.7 – 3.3
Conductividad (uS/cm ₃)	3000 – 7600
Turbiedad (NTU)	32 – 50
Aceites/grasas (mg/L)	10 - 50
Aluminio (mg/L)	67 – 134
Níquel (mg/L)	3.2 - 5.3
Cromo (mg/L)	0.2 – 1.3

*Tomado de: Ates N & Uzal N; 2018. Eliminación de metales pesados de aguas residuales de oxidación anódica de aluminio mediante filtración por membrana. Pag 4(10).

Tabla 33. Condiciones y eficiencia de remoción de filtración por membrana y precipitación química

Método	M/R	Bar	Cond. Us/cm ³	pH	Al (mg/L)	Ni (mg/L)	Cr (mg/L)
Ultrafiltración %R: < 68%	PTUF (UF) 200 Da	20	687	7,0	74,3	34,2	3,6
Nanofiltración %R: 94 - 99%	NF270(NF) 400 Da	20	460	7,0	0,53 R: 94%	0,05 R:99%	0,04 R:99%
Método	Reactivo	[]	Rango pH	pH	% R Al	% R Cr	% R Ni
Precipitación química	FeCl ₃	750 mg/L	3-11	6,0	72	8	3 -17
	FeSO ₄	750 mg/L	3-11	6,0	90	37-67	0 - 9
	Ca(OH) ₂	750 mg/L	3-11	6,0	100	28-100	3-69

Fuente: autor. **Información tomada de** Eliminación de metales pesados de aguas residuales de oxidación anódica de aluminio mediante filtración por membrana(10).

En la tabla 34 se presentan tres estudios de remoción de metales pesados mediante otra técnica de filtración, la nanofiltración, técnica que ha demostrado eficiencias de remoción de hasta el 98,5%(37).

Tabla 34. Técnica de Nanofiltración en diferentes estudios.

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[] inicial	t _r hora	T ° C	Método y complemento		
Pb ⁺² Cd ⁺²	5,8	150 mg/L 40 mg/L	10	25	Nanofiltración, recubrimiento de poliamida aromática en sustrato de polisulfona con poros 0,262 nm	98,5 – 96	Gherasim et al; 2013
Fe ⁺² Al ⁺² Mg ⁺²	6-7	4920mg/L 3050mg/L 3400mg/L	36	25	Purificación de ácido fosfórico por nanofiltración. Membrana DS5 DL 0,5 nm	96 – 98	González, et al; 2006
Cd ⁺² Zn ⁺²	2- 11	80mg/L	4-24	20- 22	Tartrato de sodio y potasio (PST)	95,5 - 98	Liu, et al; 2012
Mg ⁺² Li ⁺²	6-7	2000mg/L 8000mg/L	NA	20	Recuperación de Li en alta relación de salmuera con membrana NF 90	80,1 – 85	Bi, et al; 2014

Esp (Especia metálica)

***Tomado de:** Caviedes D. Et al. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Pag 5(37).

En la tabla 35 se presentan eficiencias de remoción de metales pesados empleando técnicas de precipitación química(37).

Tabla 35. Eficiencias de remoción de metales pesados empleando técnicas de precipitación química.

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[]	t _r	T ° C	Método y complemento		
Ni Zn Al	12	22 mg/L	1 h	Amb	Precipitación por galvanoplastia Ni servoasistida por LDH	80 – 90%	Xu, et al; 2015
Hg ²⁺	4,7 6,4	65,6 ug/L	1 h	Amb	Precipitación con 1,3-benzenediamidoethanethiolate	>99, 9%	Blue, et al; 2008
As ⁺² Cu ⁺² Cd ⁺² Pb ⁺²	1	As 6,08 0 mg/L	1 h	Amb	Reactor con distribuidor multiarranque sumergido para la alimentación de sulfuro	>99, 9%	Prado, et al; 2014
Cd ⁺² Cr ⁺² Pb ⁺² As ⁺² Hg ⁺²	4	1 mg/L	5 Min	Amb	Nanoparticulas como microparticulas supermagneticas que actúan como semillas para precipitados de hidróxido de hierro	95- 99%	Mandel, et al; 2013

***Tomado de:** Caviedes D. Et al. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Pag 8(37).

En cuanto a métodos físicos como la absorción, en la tabla 36 se muestran diferentes tipos de carbones implementados como absorbentes en varios estudios, en los cuales, la eficiencia de remoción no supero el 50% (37).

Tabla 36. Condiciones experimentales de algunos carbones implementados como absorbentes en varios estudios

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[inicial] mg/L	t _r	T ° C	Método complemento		
Pb ⁺² Zn ⁺² Cu ⁺² Cd ⁺²	5	10-180 mg/L	24	20	Carbono mesoporoso ordenado CMK-3	Desde 29 mg/g de Zn ⁺² a 117 mg/g de Pb ⁺²	Barezak, et al; 2015
Cr ⁺²	7,8	0,12 mg/L	2 min	Amb	Fe-BC (hierro a base de carbón de bambú)	> 0,05 mg/L	Wang, et al; 2011
Pb ⁺²	4	100 mg/L	6	Amb	Carbón activado procedente de huesos de vaca	50%	Prado, et al; 2014
Cu ⁺² Ni ⁺² Zn ⁺²	5,5,	10-100 mg/L	5 Min 20 h	20- 40	Carbón activado producido a partir de piedras tunecinas	18,68 mg/g Cu 16,12 mg/g Ni 12,19 mg/g Zn	Bouhamed, et al; 2015

*Tomado de: Caviedes D. Et al. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Pag 7(37)

Algunos autores han utilizado residuos industriales, desechos agrícolas y minerales para reemplazar materiales adsorbentes como el carbono que resulta ser muy costoso, en la tabla 37 se muestran algunas alternativas de materiales adsorbentes de esta naturaleza, así como su alta eficiencia de remoción de metales pesados de ambientes contaminados(37).

Tabla 37. Adsorción o eliminación de metales pesados, utilizando residuo industrial, desechos agrícolas y minerales.

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[inicial] mg/L	t _{r,h}	T ° C	Método complemento		
Cr ⁺³ Cu ² Pb ²⁺ Zn ²⁺	5	110 110 80 80	45 min	Amb	Residuos industriales de celulosa y papel. "lodo de cal y cenizas de caldera"	93% 99% 96% 99%	Sthiannopka oet al; 2009

Tabla 37. ContinuaciónEsp (Especia metálica) [] (Concentración), T_r horas (tiempo de tratamiento en horas), T ° C

Fe Pb Cu Ni	6-7	60	2 h	Amb	Desechos agrícolas como adsorbentes “cascarilla de arroz”	92,25% 67,91% 98,17% 96,95%	Ahmed, et al; 2013
Cr⁺³ Zn²⁺ Pb²⁺	4,05 6,9	110 110 80	2 h	Amb	Vermiculitas y el efecto de la precipitación	100% 99,7% 99,1%	Hikmet, et al; 2014

(temperatura en grados centígrados), R% (porcentaje de remoción), Ref (referencia)

***Tomado de:** Caviedes D. Et al. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Pag 11(37).

7.5. Remoción por tratamientos secundarios biológicos aerobios

Aristizabal A. et al; 2010, Evaluaron la eficiencia y el comportamiento de los Contactores Biológicos Rotativos (RBC o Biodiscos) como sistema alternativo de tratamiento de los lixiviados generados en el Relleno Sanitario de La Pradera, en el municipio de Don Matías, Antioquia, Colombia, mediante la aplicación de un modelo a escala laboratorio, en cuyo estudio encontraron concentraciones de metales pesados, donde el Cr total y Hg mostraron un contenido significativo comparado con la norma de vertimientos (Decreto 1594, 1984) (Tabla 38). Estos metales pesados resultan ser tóxicos y desestabilizantes del proceso de tratamiento biológico, pero a pesar de encontrarse en altas concentraciones, el sistema de Contactores Biológicos Rotativos (RBC o Biodiscos) mostro alta estabilidad con porcentajes de remoción por encima del 90%(82). En la tabla 39 se evidencia una revisión sobre la recuperación de metales pesados de fuentes de desechos y aguas residuales por medio de Biodiscos(83).

Tabla 38. Análisis de sustancias de interés sanitario del lixiviado de la Pradera

sustancia	Concentración del lixiviado (mg(L))	Concentración máxima reglamentada para el vertimiento (mg(L))
Cadmio	0,015	0,1
Cobre total	1,29	3,0
Cromo total	1,43	0,5
Mercurio total	0,030	0,020
Plomo total	< 0,073	0,5

*Tomado de: Pérez Aristizábal JD. Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (rbc o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la pradera; 2010. Pag 89(82).

Azizi S, et al; 2016, compararon diferentes concentraciones de biomazas en un reactor de lecho biológico modificado a escala de laboratorio (PBBR), el cual se basa en la tecnología de crecimiento fijo (biomasa adherida) que crea una biopelícula en un medio de soporte físico donde tiene lugar la biosorción, sus resultados concluyeron que era posible tratar 20 mg/L de metales pesados (Zn, Cu, Cd, Ni) con un tiempo de retención de dos horas, con una concentración de licor mixto solido suspendido (biomasa) de 10.000 mg/L donde el número y diversidad es mayor que la de un sistema típico de lodos activados, demostrando a la vez que cuanto mayor era la cantidad de licor mixto solido suspendido, mayor era el porcentaje de remoción, algunos autores han reportado eficiencias de remoción mayor al 71 % bajo concentraciones de metal pesado entre 8 – 20 mg/L, afirmando que estos sistemas biológicos, funcionan mejor a concentraciones bajas donde los microorganismos no estén sujetos a ningún tipo de estrés fisiológico ni ambiental, y de esta manera evitan que su tasa de respiración se reduzca como sucede a elevadas concentraciones de un contaminante tóxico(81).

Tabla 39. Revisión: recuperación de metales pesados de fuentes de desechos y aguas residuales por medio de biodiscos.

Metales	Fuente	proceso	Microorganismo involucrado	Potencial de recuperación (%)	Referencia
Al, Mo, Ni, Va	Catalizadores de hidrotratamiento	Biolixiviación mesófila química	Cultivo mixto	65 (Al), 87 (Mo), 52 (Ni), 65 (V)	Cibati et al., 2015
Cu, Ni, Zn, Pb, Ga, Sn	Placas de circuito impreso	Biolixiviación termófila	Cultivo mixto (Leptospirillum, Acidithiobacillus, Sulfobacillus)	99 (Cu), 84 (Ni), 99 (Zn), 3 (Pb), 43 (Ga), 7 (Sn)	Guezennec et al. 2015
Cu	Cu - Ag minerales	Biolixiviación mesofílica	Lysinibacillus sphaericus JG-A12, Bacillus sp. JG-B12, Bacillus sp. JG-B5T	20-43	Kostudis et al. 2015
Fe	Aguas residuales sintéticas	Quelación	Pseudomonas fluorescens	99	Renard et al., 2005
Pt, Pd, Rh	Gastado de catalizadores automotrices	Biolixiviación	Chromobacterium violaceum	Pt, Pd, Rh 92.1 (Pt) 99.5 (Pd) 96.5 (Rh)	Shin et al., 2015
Ni, V, Mo	Catalizador de petróleo gastado	Biolixiviación Mesofílica	Acidithiobacillus thiooxidans	79 (Ni), 90 (V), 88 (Mo)	Srichandan et al., 2014
As (III), Fe cultivo mixto (II)	Aguas residuales sintéticas	Oxidación precipitación	Cultivo mixto (Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus ferrivorans, Leptospirillum ferriphilum, Leptospirillum ferrooxidans)	99.5	Ahoranta et al., 2016
Cu (II), Fe (II)	Drenaje ácido minero	Reducción / Precipitación	SRB cultivo mixto	99 (Cu), 97 (Fe)	Chen et al., 2009
Fe, As, Cu, Cd, Z	Drenaje ácido minero	Oxidación / Precipitación / Reducción /	SRB cultivo mixto	99.9 (Cd, Cu), 50 (Ni), 99.9 (Fe), 99.9 (As)	Hedrich & Johnson, 2014

Tabla 39. Continuación

Cd, Cu, Mn, Zn	Aguas residuales sintéticas	Bioacumulación Directa intracelular	Chlorella minutissima	33.7 (Zn), 21.2 (Mn), 35.4 (Cd), 3.3 (Cu) mg / g	Yang et al., 2015
Pb	Relaves mineros de plomo y zinc	Bioacumulación / biomineralización	Bacillus cereus	226 mg / g	Chen et al., 2016
Au	Aguas industriales que contienen Au	Biosorción directa en EPS	Cyanothece sp Nostoc sp. Rhodopseudomonas palustris, Rhodobacter sphaeroides	318(Cyanothece), 64 (Nostoc) 80 (R. palustris), 45(R. sphaeroides) mg/g	Colica et al., 2012
Fe	Efluente de lixiviación	Oxidación / Precipitación	Cultivo mixto (Leptospirillum ferriphilum y Ferromicrobium acidiphilum)	5-40	Nurmi et al., 2009
As	Aguas residuales sintéticas	Reducción/ precipitación	Cultivo mixto anaerobio	91.2	Rodriguez-Freire et al., 2016

***Tomado de:** Puyol D, et al. Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. Front Microbiol. 2017(83)

7.6. Remoción por tratamientos no convencionales

En la tabla 40 se muestran los resultados obtenidos tras la implementación de hidrogeles como material absorbente de metales pesados en aguas residuales.

Tabla 40. Empleo de hidrogeles para remover metales pesados y sus condiciones experimentales.

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[] inicial	^t T _r	T ° C	Método complemento y		
Cu ² Pb ²⁺ Cd ⁺² Cr ⁺³	4-6	100 ppm	24 h	22	Hidrogel funcionalizado con sulfidrilo	Absorción 9,3 mg/g 31,3 mg/g 17, mg/g 5,2 mg/g	Hua & Li, 2014
Cu ² Cd ⁺² Pb ²⁺ Co ²⁺ Ni ²⁺ Cr ⁺³	7	50 ppm	2 h	Amb	Incorporación de thiacalix areno tetrasulfonato y Fe ₂ O ₄ en Nanoparticulas de alginato de sodio (Nanogel)	90,5 % 94,5% 99,8 % 75 % 67,4 % 79,2 %	Mansour, et al; 2014
Cu ²⁺ Zn ²⁺ Fe ²⁺ Cd ⁺² Cs ⁻	5-6	2- 80Mm CuSO 4	72 h	Amb	Hidrogel de celulosa preparada utilizando disolvente LiOH/urea	100% 99,7% 99,1% 98,38%	Hikmet, et al; 2014

Esp (Especia metálica) [] (Concentración), ^tT_r horas (tiempo de tratamiento en horas), T ° C (temperatura en grados centígrados), R% (porcentaje de remoción), Ref (referencia)

***Tomado de:** Caviedes D. Et al. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. Pag 11(37)

Hernández I. et al; 2016, elaboraron un hidrogel a partir de quitosano para la eliminación de metales pesados (Cu) de dos muestras de agua, el quitosano es un biopolímero muy abundante en la naturaleza, en este estudio fue obtenido del exoesqueleto de crustáceos. Se logró concluir que a una temperatura de 25 °C y durante 180 minutos, por medio de la adsorción proporcionada por las perlas de hidrogel, había una disminución de la concentración inicial de ambas muestras a 50 y 20 ppm respectivamente(84).

En la tabla 41 se observan condiciones experimentales de absorción de metales pesados con cenizas volantes, y su eficiencia de remoción en tres estudios diferentes(72).

Tabla 41. Condiciones experimentales de absorción de metales pesados con cenizas volantes.

Esp.	Condiciones					R %	Ref
	pH	[] inicial	T _r horas	T ° C	Método y complemento		
Hg ²⁺	5	602 mg Hg/L ceniza a 100 g/L	72 h	Amb	Cenizas volantes silico-aluminoso y cenizas volantes-sulfo cálcico	53-81	Rio y Delebarre ; 2003
Pb ²⁺ Hg ²⁺	3	100 mg/L	5 h	Amb	Ceniza volante de carbón	34-17	Prasetyio & Zakki; 2013
Cr ⁺⁶	2	50 ppm	1 h	30	Ceniza volante de wollastonita	Absorción 2,92 mg/g	Hikmet, et al; 2014

Esp (Especia metálica) [] (Concentración), T_r horas (tiempo de tratamiento en horas), T ° C (temperatura en grados centígrados), R% (porcentaje de remoción), Ref (referencia)

***Tomado de:** Muñoz Lucas MI; 2012. Caracterización y acondicionamiento de cenizas volantes para la eliminación de metales pesados en aguas contaminadas(72).

7.7. Tratamientos de Biorremediación

Martins P, et al; 2008, investigaron el efecto causado por la aplicación de un EPS de origen bacteriano en la biorremediación de un sistema acuoso co-contaminado con gasolina y metales pesados por un consorcio bacteriano, para la remoción de los metales pesados Cd, Zn y Cu a una concentración de 100 ppm de cada metal, concentración que no mostro un efecto inhibitor en el crecimiento celular; el microorganismos seleccionado (*Paenibacillus* sp) fue previamente aislado de salchichas fermentadas, y fue escogido principalmente por ser Gram positivo y formador de esporas, de este microorganismo fue extraída la EPS. En este estudio se evaluó la eficiencia de remoción de metales pesados en ausencia y presencia de EPS con o sin microorganismos (Tabla 42), con unos resultados que mostraron una mayor adsorción en la superficie celular que en su interior; además el Cd resulto ser el metal pesado

menos internalizado por las células con respecto al Zn. En conclusión los autores afirman que la inclusión de EPS mejora la actividad microbiana en el proceso de bioadsorción(85).

Tabla 42. Eficiencia de remoción de metales pesados en experimentos llevados a cabo en ausencia y / o presencia de EPS, con o sin microorganismos

Experimento	EFICIENCIA DE REMOCION (%)		
	Cd	Zn	Cu
Ausencia de EPS			
MP adsorbido en superficie celular	4,33	39,05	12,36
MP internalizado en la célula	1,77	15,78	9,36
Presencia de EPS			
MP adsorbido en superficie celular	3,51	30,33	14,57
MP internalizado en la célula	1,84	17,02	10,36
MP adsorbido en EPS	87,12	19,82	37,64
Presencia de EPS sin M.O.			
MP adsorbido en EPS	98,00	53,25	51,69

*Tomado de: Martins PSDO, et al. Aplicación de una sustancia polimérica extracelular bacteriana en la adsorción de metales pesados en un sistema acuoso co-contaminado. 2008 (85)

Ahmed MMA et al; 2016, aislaron 69 cepas de Actinomicetos (biosorbentes) aislados de ambientes naturalmente ricos en metales pesados, teniendo en cuenta que las poblaciones microbianas adaptadas adquieren mayor resistencia a metales pesados y otros contaminantes en comparación con microorganismos provenientes de sitios no contaminados, y de que los Actinomicetos poseen morfología filamentosa, además de poseer una pared celular rica en fósforo, que serán útiles, debido a que el ácido teicoico funciona como principal sitio de unión de iones metálicos a su pared celular. Este estudio tenía como objetivo evaluar la capacidad de los actinomicetos para eliminar metales pesados tóxicos (Ni^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+}) de soluciones acuosas, y mejorar la capacidad de adsorción de biosorbente seleccionado con el fin de optimizar los parámetros de eliminación, ya que en este proceso el pH, temperatura, naturaleza y dosis de la biomasa mostraron ser parámetros fundamentales en la capacidad de remoción de metales pesados, esta

eficiencia de remoción se llevó a cabo por medio de sistemas de metal único, binario ($\text{Ni}^{2+} + \text{Cr}^{6+}$, $\text{Ni}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$ y $\text{Cr}^{6+} + \text{Zn}^{2+}$) y ternario ($\text{Ni}^{2+} + \text{Cr}^{6+} + \text{Zn}^{2+}$); demostrándose que la remoción es más eficiente en presencia de dos o más metales pesados; dos Actinomicetos mostraron la mayor actividad, *Nocardiosis* sp. (MORSY1948), y *Nocardia* sp. (MORSY2014), en la tabla 43 se muestra una representación comparativa de la eficiencia de biosorción (%) de diversos metales pesados Ni^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+} en diferentes sistemas de metal por los aislamientos biosorbentes de Actinomicetos (las condiciones de biosorción son 100 mg L⁻¹ de dicho metal pesado, 0.3% de biosorbente, pH 6.0 a 30 °C y 150 rpm durante 3 horas)(77).

Ahmed MMA et al; 2016, al igual que otros autores, reportan factores que pueden afectar el proceso de biosorción de metales pesados por biomasa viva y muerta, algunos de esos factores están relacionados con la temperatura, en su estudio demostró que la biosorción es una reacción netamente endotérmica al presentarse niveles de eficiencia superiores con cambios de temperatura de 30 °C – 40 °C sobre biomasa muerta lo cual puede explicarse por un aumento en el tamaño del poro del biosorbente, lo que conduce a una mayor concentración de iones metálicos captados; la creación de nuevos y más potentes sitios de unión de la pared celular, aceleramiento de procesos pasivos de biosorción, y mejora en la movilidad de iones metálicos pueden ser algunos de los efectos positivos mediados por el aumento de la temperatura (Figura 25). Otro factor determinante fue el pH, en donde una variación de 2.0 a 7.0 unidades aumento la capacidad de absorción de la biomasa viva y la adsorción por parte de biomasa muerta, es decir que el pH óptimo para MORSY 1948 y MORSY 2014 es de 7.0 – 8.0 unidades de pH, lo cual indica que un pH ácido solo proporcionaría un mayor número de iones H^+ que entrarían en competencia por los sitios de unión activos cargados negativamente en la pared celular de los biosorbentes, en la tabla 44 se presenta Efecto del pH en la eficiencia de biosorción (%) de los metales pesados Ni^{2+} , Cr^{6+} y Zn^{2+} por biomasa viva y muerta de *Nocardiosis* sp.

MORSY1948 y *Nocardia* sp. MORSY2014; la dosis del biosorbente marca un punto significativo en la proceso, ya que a mayor dosis de biomasa los metales pesados pueden eliminarse en su totalidad, al aumentar la disponibilidad de sitios activos de unión presentes, en la tabla 45 se observa un ejemplo del efecto de la dosificación de biosorbente sobre la eficiencia de remoción (%) de metales pesados (Ni^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+}) por biomasa muerta de *Nocardiosis* sp. MORSY1948 y *Nocardia* sp. MORSY2014 (44).

Tabla 43. Representación comparativa de la eficiencia de biosorción (%) de diversos metales pesados Ni^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+} en diferentes sistemas de metal por los aislamientos biosorbentes de Actinomicetos.

BS Biosorbente	Sistema metálico/ Biosorción (%)											
	Sistema de metal único			Sistema de metal binario						Sistema de metal ternario		
	Ni^{2+}	Cr^{6+}	Zn^{2+}	$\text{Ni}^{2+} + \text{Cr}^{6+}$		$\text{Ni}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$		$\text{Cr}^{6+} + \text{Zn}^{2+}$		Ni^{2+}	Cr^{6+}	Zn^{2+}
M1948	60.1	47.4	67.4	79.5	51.0	72.5	71.3	54.9	75.6	74.0	58.4	81.3
M2014	50.5	59.4	62.8	60.6	68.2	69.2	51.8	86.2	41.6	62.9	77.6	32.0
(Las condiciones de biosorción son 100 mg L⁻¹ de dicho metal pesado, 0.3% de biosorbente, pH 6.0 a 30 °C y 150 rpm durante 3 h).												

*Adaptado de: Ahmed MMA et al. Evaluación y mejora de la biorremediación de metales pesados en soluciones acuosas por *Nocardiosis* sp. (MORSY1948) y *Nocardia* sp. (MORSY2014).2016(77).

Tabla 44. Efecto de la dosificación de biosorbente sobre la eficiencia de remoción (%) de metales pesados (Ni^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+}) por biomasa muerta de *Nocardiosis* sp. MORSY1948 y *Nocardia* sp. MORSY2014 (44).

biosorbente	MP	Eficiencia de biosorción (%) - pH				
		2	5	6	7	8
Nocardiosis sp. MORSY1948 (células vivas)	Ni^{2+}	19.23	27.8	39.4	42.54	39.59
	Cr^{6+}	8.14	20.51	28.0	35.72	31.00
	Zn^{2+}	12.06	18.93	37.9	41.40	46.91
Nocardiosis sp. MORSY1948 (células muertas)	Ni^{2+}	25.39	42.17	60.5	87.90	87.90
	Cr^{6+}	18.50	20.36	47.5	63.75	63.75
	Zn^{2+}	14.92	29.08	67.8	75.15	84.15
Nocardia sp. MORSY2014 (células vivas)	Ni^{2+}	5.08	18.40	49.32	59.65	61.46
	Cr^{6+}	11.54	22.00	38.47	60.85	62.52
	Zn^{2+}	18.72	35.09	50.32	64.30	67.91
Nocardia sp. MORSY2014 (células muertas)	Ni^{2+}	14.85	47.95	80.30	88.71	93.53
	Cr^{6+}	20.04	34.78	75.52	84.57	95.22
	Zn^{2+}	25.37	50.03	76.87	87.95	90.37
MP: Metales Pesados						

*Adaptado de: Ahmed MMA et al; 2016. Ahmed MMA et al. Evaluación y mejora de la biorremediación de metales pesados en soluciones acuosas por *Nocardiosis* sp. (MORSY1948) y *Nocardia* sp. (MORSY2014).2016 (44)

Tabla 45. Efecto de la dosificación de biosorbente sobre la eficiencia de remoción (%) de metales pesados (Ni^{2+} , Cr^{6+} , Zn^{2+}) por biomasa muerta de *Nocardiopsis* sp. MORSY1948 y *Nocardia* sp. MORSY2014

biosorbente	MP	Eficiencia de biosorción (%) a diferentes dosis de biosorbentes (%)				
		0.05	0.1	0.2	0.3	0.4
Nocardiopsis sp. MORSY1948 (células muertas)	Ni^{2+}	13.77	41.90	60.19	87.90	100
	Cr^{6+}	9.52	23.37	54.48	63.75	100
	Zn^{2+}	16.05	41.5	72.57	84.15	100
Nocardia sp. MORSY2014 (células muertas)	Ni^{2+}	15.80	53.20	67.50	93.53	100
	Cr^{6+}	19.27	34.81	70.29	89.22	100
	Zn^{2+}	11.91	40.32	66.12	90.37	100
MP: Metales Pesados						

*Adaptado de: Ahmed MMA et al; 2016. Ahmed MMA et al. Evaluación y mejora de la biorremediación de metales pesados en soluciones acuosas por *Nocardiopsis* sp. (MORSY1948) y *Nocardia* sp. (MORSY2014).2016 (44)

Otro grupo de microorganismos menos estudiados en técnicas de biorremediación son los protozoos, Kamika I, Momba MNB; 2013. evaluaron la capacidad de resistencia y biorremediación de especies bacterianas (*Bacillus licheniformis* ATCC 12759, *Brevibacillus laterosporus* ATCC 64 y *Pseudomonas putida* ATCC 31483) y protozoarias (*Aspidisca* sp, *Trachelophyllum* sp y *Peranema* sp); con el fin de remover metales pesados de aguas de un vertedero histórico en una zona minera de Witbank, Mpumalanga, Sudáfrica, donde las concentraciones de metales pesados sobrepasaban los valores máximos admisibles; para ello secuenciaron cada uno de estos organismos, en donde encontraron genes que codificaban resistencia contra diferentes metales pesados, en los que *Peranema* sp, fue el único organismo que presentaba un gen adicional (resistencia Co-Ni), la presencia de genes de resistencia indicaron que los aislamientos microbianos seleccionados usaron mecanismos pasivos (biosorptivo) y mecanismos activos (bioacumulación) para eliminar los metales pesados de las aguas residuales industriales(75). En la tabla 46 se relacionan los genes encontrados en estos microorganismos así como el porcentaje de remoción alcanzado por los mismos, donde se evidencia que *Peranema* sp, correspondió al único protozoo con un gen adicional codificante a resistencia contra Cobalto y Níquel, y mostrando eficiencias de

remoción de hasta el 78%; como dato adicional *Brevibacillus laterosporus* presento índices de mortalidad mayores al 93%, mientras que *Pseudomonas putida* se mostró como la bacteria con la mayor tasa de crecimiento siendo esta del 94.6%; la DQO, fue el parámetro que puso en cierta desventaja biológica a *Peranema* sp, frente a los microorganismos bacterianos, debido a que la DQO aumento cuando se llevaron a cabo los ensayos con los organismos protozoarios(75).

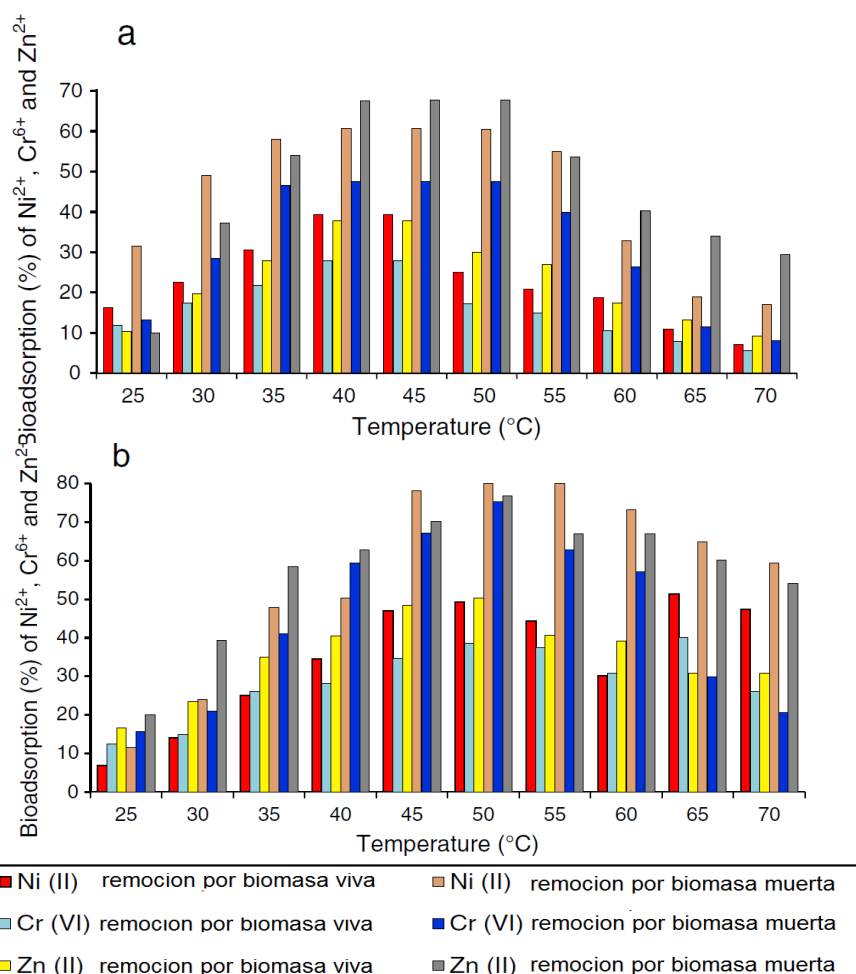


Figura 25. (a) Efecto de diferentes temperaturas en la capacidad de biosorción de Ni²⁺, Cr⁶⁺ y Zn²⁺ (%) a partir de la solución acuosa por las células vivas y muertas de *Nocardia* sp.MORSY1948. **(b)** Efecto de las diferentes temperaturas sobre la capacidad de biosorción de Ni²⁺, Cr⁶⁺ y Zn²⁺ (%) a partir de una solución de resolución por las células vivas y muertas de *Nocardia* sp.MORSY2014.

*Tomado de: Ahmed MMA et al; 2016. Ahmed MMA et al. Evaluación y mejora de la biorremediación de metales pesados en soluciones acuosas por *Nocardia* sp. (MORSY1948) y *Nocardia* sp. (MORSY2014).2016(77).

Tabla 46. Genes que codifican resistencia a metales pesados en bacterias y protozoos.

Microorganismo (Bacteria)	Metal	% remoción	Genes
<i>Bacillus licheniformis</i>	Zn	53%	CopC / Cobre
	Cd	39%	ChrB / Cromo
	Al	23%	CnrA3 / Cobalto - Níquel
	Ti	75%	nccA / Cadmio - Níquel
<i>Brevibacillus laterosporus</i>	Co	17%	CopC / Cobre
	Ni	33%	ChrB / Cromo
	Mn	21%	CnrA3 / Cobalto - Níquel
	V	35%	nccA / Cadmio - Níquel
	Pb	31%	
	Cu	29%	
	Zn	41%	
	Cd	35%	
<i>Pseudomonas putida</i>	Ti	100%	CopC / Cobre
	Pb	96%	ChrB / Cromo
	V	83%	CnrA3 / Cobalto - Níquel
	Co	71%	nccA / Cadmio - Níquel
	Ni	57%	
	Cu	49%	
	Mn	45%	
Microorganismo (protozoo)	Metal	% remoción	Genes
<i>Peranema sp</i>	Ti	78%	CopC / Cobre
	Co	66%	chrB / Cobre
	Pb	59%	cnrA3 / Cobalto – Níquel
	Zn	45%	
	Cd	42%	
<i>Trachelophyllum sp</i>	Ni	27%	CopC / Cobre
	Cu	41%	chrB / Cobre
	Mn	33%	
	V	32%	

Fuente: Autor – **Información tomada de:** Kamika I, Momba MNB. Assessing the resistance and bioremediation ability of selected bacterial and protozoan species to heavy metals in metal-rich industrial wastewater. BMC Microbiol; 2013 (46).

8. DISCUSION

En los artículos científicos analizados, se evaluó la presencia de metales pesados de 37 plantas de tratamiento en total, en las cuales los metales pesados detectados por diferentes metodologías, superaron los valores máximos permitidos por la legislación correspondiente a cada país, a excepción de 9 PTAR, en donde se evaluó la concentración de metales pesados en lodos de alcantarillado, con la calificación más alta para optar como opción al uso agrícola; en estas 9 PTAR según la Norma GB4284-84 (Norma de Control de China para contaminantes en lodos para uso agrícola) ninguna de las determinaciones superó los valores máximos permitidos, sin embargo, el Cd, fue el metal con la mayor concentración(11).

12 de las 37 PTAR evaluadas, corresponden a la ciudad de Shanghai, donde el Cu, Ni, y Pb, fueron los metales más abundantes tanto en afluente como efluente. En otra PTAR (Atapaneo), en la ciudad de Morelia México, se detectó Mn, Zn, Fe y Cu, donde el Fe a pesar de ser considerado como el metal más abundante, fue el que obtuvo mayor eficiencia de remoción en efluentes.

En un PTAR en Egipto, los niveles críticos de Niquel, Cr y Zn, parecen estar relacionados con áreas industriales dedicadas a la fabricación de pinturas y alto voltaje, situación que también se presentó en 2 PTAR en la ciudad de Bursa en Turquía, donde el Al y Fe presentaban altas concentraciones tanto en afluentes, efluentes y lodos, concentraciones que pueden relacionarse estrechamente con la actividad metalúrgica desarrollada como base de la economía; es importante resaltar que las altas concentraciones de metales pesados en lodos de aguas residuales, muy difícilmente podrán ser reutilizados con fines agrícolas, además de esto, refleja un efluente con características fisicoquímicas que no alcanzaron un resultado eficaz en el tratamiento.

En una PTAR en Bangkok, Tailandia, el Fe, Cu y Cd, fueron los metales detectados con mayores concentraciones, un dato para resaltar es la diferencia no

significativa entre afluente y efluente para Cd, pues se presentaron las variaciones menos significativas, esto se puede explicar por las características químicas de Cd y las condiciones operativas del sistema de tratamiento. La especie química dominante de Cd en el agua es Cd^{2+} , que se considera un ácido blando con un estado de oxidación y baja electronegatividad (80). En este mismo estudio, en el que se analizaron a la par PTAR de diferentes países, entre ellos Paris, Brasil, Tailandia, Grecia, Italia, Polonia y Turquía, se llegó al consenso de que los metales Cd, Cu, y Pb, estaba presente en todas las PTAR de estos 7 países; el Fe total fue el metal con mayor concentración promedio, y finalmente las plantas de Bursa en Turquía, y la PTAR de Fusina en Venecia, Italia fueron las PTAR con mayores concentraciones de metales pesados tanto en afluentes como efluentes y lodos residuales. Estos resultados, pueden estar encaminados a la tasa poblacional de los países estudiados, y a las principales actividades industriales que se llevan a cabo para la manutención de la economía, pues cuanto mayor es la población, mayor será la demanda de aguas residuales con fines de tratamiento.

En cuanto a los métodos de detección de metales pesados en aguas residuales, la técnica (HG-AAS), mostro ser una metodología aplicable a cualquier tipo de agua, en base a su acoplamiento a la caracterización química de los elementos metálicos, resultados que son de mucho interés, cuando se busca estandarizar una técnica analítica, por tal motivo el hecho de comparar la eficiencia de la técnica en aguas de diferentes procedencias, tanto superficiales como residuales industriales, así como con muestras certificadas, internas de control rutinario y las empleadas en las pruebas de desempeño del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y MOL LABS (Laboratorio de Metrología Química), las cuales son instituciones que funcionan como entes reguladores y de referencia en Colombia, permite la aplicabilidad del método con mayor confiabilidad.

La Espectrometría de Absorción Atómica de llama (FAAS), es una técnica que permite una mayor especificidad, pues cada elemento puede ser detectado en un rango de longitud específico, al proporcionarle una energía de transmisión electrónica única a cada analito. Con respecto a FAAS, la Espectrometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (EAA-HG), puede ser mucho más eficaz al mantener una cantidad de átomos constantes en la llama, pues el cambio de la llama por el tubo de grafito como medio atomizador hace que aunque el tiempo de operación sea más corto se reduzca la transferencia de energía hacia la muestra, y de paso para la formación de átomos completos, con lo cual se logra una detección eficaz; en cuanto al rango de detección, ambas técnicas mostraron la capacidad de detectar concentraciones en orden de ppm (partes por millón).

En un estudio en el que se compararon los métodos de fluorescencia atómica (As y Hg), EEA-HG (Cd) y EAA convencional (Cu, Zn, Cr y Pb), una vez más EEA-HG, mostro una mayor exactitud, precisión y porcentaje de recuperación para Cd, seguida de EEA convencional, puesto que en este caso EEA convencional, permitió la detección de un mayor número de metales pesados simultáneamente, mientras EEA-HG, solo se probó en el detección de Cd, es una técnica que se superó en sensibilidad al lograr realizar detecciones en muestras con un mínimo volumen, incluso en muestras muy diluidas.

La fluorescencia atómica, también es una técnica muy eficaz si de porcentaje de recuperación se trata, pues al aprovechar la fluorescencia emitida por los iones metálicos, es una metodología capaz de recuperar hasta el 106.1% en la detección de metales como Cd, y del 97% para As.

La espectrometría de absorción atómica-plasma acoplado por inducción (EAA-ICP) es una técnica que mostro ser menos sensible al detectar concentraciones en el rango de $\mu\text{g/L}$, esto respecto a EAA-HG y métodos voltamperométrico que logran detectar concentraciones en el orden de ppm; en donde los métodos voltamperométrico a pesar de ser más recientes en el mercado, su principio data años atrás. La implementación de tres electrodos permite la detección de metales pesados de una manera más eficiente y

especifica al utilizar pulsos de corriente eléctrica generados por los iones metálicos presentes en la muestra.

En la actualidad, la voltamperometría parece ser el método más novedoso, y el cual cuenta con un principio básico que le permite realizar mediciones, en campo, es decir in situ. Además permite la confirmación del resultado obtenido mediante adición de estándares de concentración conocida, también logra detecciones a niveles traza en ppm. Algunos autores sugieren que el hecho de utilizar solución de mercurio (Hg) durante su ejecución, convierte este método en poco amigable con el medio ambiente, sin embargo, las cantidades de Hg implementadas son mínimas, y su agilidad y facilidad de uso hacen de esta una técnica novedosa y mucho más rentable, con una menor capacitación del personal profesional que requiera realizar la técnica.

A pesar de que cada una de las técnicas mencionadas muestra, alta eficiencia, precisión, sensibilidad y porcentaje de recuperación, en la actualidad no existe una técnica que no precise un pre tratamiento de la muestra de agua que se requiera analizar, bien sea a filtración, digestión, conservar la matriz ácida de la reacción proporcionada por ácido clorhídrico (HCl) u otra sustancia.

Una vez los metales pesados son considerados como contaminantes presentes en el agua al ser detectados por las diferentes metodologías antes descritas, las técnicas que permiten su quelación y remoción, también pueden ser diversas. Durante todo el proceso de tratamiento se conoce una serie de subprocesos que permiten obtener un efluente menos contaminado; en la fase de tratamiento primario, donde el cribado, y la sedimentación son pasos clave para el funcionamiento y eficiencia de los tratamientos que se realicen posteriormente, como es el caso de la coagulación-floculación, proceso en el cual las partículas que no lograron ser retenidas durante el cribado y la sedimentación son aglutinadas como sólidos totales disueltos y en suspensión, arrastrando contaminantes químicos y microorganismos. El poder obtener resultados óptimos de remoción en este tipo de tratamientos es muy importante, sobre todo en PTAR donde existe la posibilidad de llevar a cabo tratamientos secundarios y terciarios.

Por medio de la coagulación-floculación se logró remover hasta un 98% de, Fe, el cual fue el metal más abundante en las PTAR analizadas por los autores de estas publicaciones científicas, este precedente enmarca esta técnica como una técnica química eficaz y que además se encuentra al alcance de cualquier PTAR, al encontrarse contemplada como parte del tratamiento primario del agua residual.

Las metodologías convencionales, aunque no hacen parte del tratamiento primario, son técnicas de mayor adecuación y alcance para las PTAR. Un de estas técnicas es la precipitación química, donde un pH óptimo involucrado en cada reacción química es fundamental para que los agentes precipitantes ejerzan su función. Esta metodología, al igual que métodos biológicos de remoción, dependen absolutamente de la neutralización del pH (paso previo a la precipitación y que hace parte del tratamiento primario), especialmente en tratamientos biológicos, donde el pH es vital para la supervivencia y actividad biológica de la biomasa.

La filtración por membrana es una técnica ajustable, y puede variar dependiendo del tamaño de poro de la membrana, el cual varía en función del contaminante que se desee retener en estas membranas. En este orden de ideas, la nanofiltración, técnica en la que se emplearon membranas filtrantes NF270 (400 Da), mostraron eficiencias de remoción de hasta un 99% en la remoción de Ni y Cr resultados que cambiaron al implementar membranas ultrafiltrantes PTUF (200 Da), donde el valor promedio de remoción fue menor al 68% para los metales detectados (Al, Ni, Cr), lo que refiere que el tamaño de las partículas metálicas oscila alrededor de los 200 Da. La Filtración por membrana mostró como requerimiento una conductividad máxima de 687 Us/cm³ y un pH óptimo de 7.0 unidades; estas características físicoquímicas pueden alcanzarse cuando procesos del tratamiento primario como el cribado, sedimentación y coagulación- floculación han mostrado resultados satisfactorios. Las técnicas convencionales de filtración por membrana y precipitación química, aunque han mostrado resultados óptimos, son metodologías que generan una alta producción de lodos residuales, que si bien se pueden reutilizar con fines agrícolas por su gran contenido de materia

orgánico, muy posiblemente concentran una mayor cantidad de metales pesados como producto de desecho final.

Los métodos físicos de remoción como la absorción por partículas de carbón, no superaron el 50% como eficiencia de remoción, este resultado hace contemplar esta metodología como obsoleta, e incluso complementaria en procesos no convencionales de remoción. Otras alternativas que han resultado ser ecológicas y con un doble propósito ha sido el uso de desechos agrícolas y minerales que antes no tenían ninguna disposición final, y que ahora reemplazan materiales absorbentes como el carbono que a pesar de no ser costosos generan resultados deficientes. Una de esas alternativas es la celulosa de papel, con la cual se han obtenido eficiencias de remoción de metales pesados de hasta un 99%.

Los sistemas biológicos aerobios secundarios representan una de las primeras opciones de tratamiento secundario no convencionales; los biodiscos o RBC (Contactores Biológicos Rotativos), es una metodología en la que los microorganismos pueden ser susceptibles ante elevadas concentraciones de metales pesados, al igual que cualquier otro sistema de tratamiento cuyo principio básico sea la actividad biológica de los microorganismos; sin embargo, esta técnica muestra eficiencias de remoción mayores al 90%, lo que demuestra una alta resistencia a cargas tóxicas sin afectar su operación ni desempeño. Esta es una alternativa eficaz a la hora de remover material orgánico de aguas contaminadas, pues posee alta eficiencia en la remoción de DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno en los primeros 5 días), su operación es sencilla y económica por su bajo consumo de energía, y requerimiento de un menor espacio, además, ha demostrado eficiencia en la remoción de metales pesados de hasta un 87% de para Cd, Cu y Zn, con el uso de Biodiscos en plantas de tratamiento de aguas residuales.

A pesar de que los filtros percoladores han demostrado ser una eficiente herramienta para la depuración de aguas residuales, realmente tiene una menor

capacidad para acumular metales pesados, motivo al que puede atribuirse su resistencia a las influencias inhibitoras de tóxicos(63)

Los sistemas de tratamiento considerados como no convencionales, contemplan una alternativa novedosa. Materiales que son extraídos de manera artificial e incluso extraídos de organismos vivos como es el caso del quitosano, un polímero obtenido del exoesqueleto de crustáceos, e incluso de celulosa donde se consiguen resultados óptimos de remoción de un 100%.

La ceniza volante es otra alternativa no convencional, que a pesar de ser de bajo costo, las eficiencias de remoción obtenidas son relativamente bajas, pero que logran remover metales altamente tóxicos como el Hg^{2+} . Las cenizas volantes de carbón activado muestran un tiempo de retención hidráulica de 5 horas, mientras que las cenizas volantes de silico aluminoso y sulfo cálcico, muestran eficiencias de remoción entre 51-81% con un tiempo de retención hidráulica de 72 horas. Esta técnica es relativamente económica y rápida pero las consecuencias toxicas por desechos de combustión de carbón ponen en desventaja la metodología.

Los sistemas biológicos terciarios comprenden la biorremediación como la técnica biológica más ecológica y rentable a la hora de remover contaminantes como metales pesados de sistemas acuáticos y aguas residuales industriales. Los organismos que participan en la biorremediación, pueden ser bacterias, actinomicetos, hongos, protozoos y algas, los cuales deben soportar condiciones ambientales y fisiológicas que para su capacidad metabólica y de supervivencia pueden resultar ser fatales. Por tal motivo los EPS son sustancias que le confieren a los microorganismos bacterianos resistencia a estas tensiones ambientales y fisiológicas. Los resultados mostraron que al adicionar el EPS, el Cd fue el metal menos internalizado con respecto al Zn, con lo cual puede ser explicado por la alta toxicidad que produce el Cd, mientras el Zn es aprovechado por los microorganismos por estar implicado en actividades enzimáticas y metabólicas como la división celular. Con esto se podría concluir que los EPS permiten una mayor actividad microbiana durante la bioadsorción.

Los Actinomicetos son microorganismos que han sido aislados de ambientes naturalmente ricos en metales pesados, logrando demostrar que las poblaciones microbianas que se han adaptado a estos ambientes adquieren mayor resistencia a los efectos tóxicos de los metales pesados. Este fue el caso de *Nocardiopsis* sp (MORSY 1948) y *Nocardia* sp. (MORSY 2014), estudio en el cual, el pH, la temperatura, naturaleza y dosis de la biomasa, mostraron ser factores fundamentales para obtener eficiencias de remoción óptimas. Los mecanismos involucrados fueron tanto activos (adsorción) como pasivos (absorción), donde la biosorción es una reacción netamente endotérmica, esto se demostró con aumentos de temperatura en donde se vio reflejado un aumento de la actividad microbiana en biomasa muerta, este efecto puede verse favorecido por un aumento en el tamaño de poro en la pared celular del microorganismo lo que permite una mayor adsorción de iones metálicos; el hecho de que la biomasa muerta no requiera nutrición durante el proceso es una gran ventaja frente a sistemas con biomasa viva, así como la dosis de biosorbente utilizado, ya que a mayor biomasa, mayor era la eficiencia de remoción, muy seguramente por encontrarse disponibles un mayor número de sitios activos en la pared celular del microorganismo.

Las características genéticas, fenotípicas y genotípicas bacterianas y protozoarias, son tenidas en cuenta gracias a que revelan la presencia de genes codificantes de resistencia a metales pesados, logrando removerlos de ambientes contaminados por mecanismos biosorptivos y de bioacumulación, teniendo en cuenta que la biomasa viva involucra mecanismos de absorción, mientras la biomasa muerta emplea mecanismos de adsorción, permitiendo así una mayor recuperación de los iones metálicos; de esta manera se aclara que los mecanismos de bioadsorción involucran simultáneamente adsorción y absorción, siendo la adsorción el primer paso para poder absorber los metales pesados al interior de la célula microbiana. La bioadsorción se considera la técnica más eficiente, ya que la viabilidad de los microorganismos no es vital al implementar

microorganismos muertos, además de esto, es una reacción reversible, en la que la biomasa puede ser rescatada para iniciar un ciclo de remoción nuevamente.

9. CONCLUSIONES

Los metales pesados son contaminantes que se encuentran frecuentemente en aguas residuales principalmente industriales, lo cual está relacionado con la tasa poblacional y la actividad industrial que permite el desarrollo de cada comunidad. La importancia de tratar estas aguas residuales con altas cargas contaminantes tanto orgánicas, biológicas y químicas, radica en el reúso en el que muchas de estas aguas residuales participan, principalmente para uso agrícola, donde la concentraciones de contaminantes como metales pesados debe ser controlada, tanto en los efluentes como en los lodos generados que también pueden poseer un alto potencial de reúso con fines agrícolas. Además de reutilizar el agua residual tratada, poder controlar los efectos tóxicos y cancerígenos producidos por los metales pesados sobre cualquier forma de vida constituye un foco de investigación científica y ecológica.

Los metales pesados, de real interés de detección en PTAR son, Cd, As, Pb, Hg, Cr, Cu, Ni y Zn. Sin embargo metales como Fe y Al, son muy abundantes en aguas residuales tanto afluentes como efluentes. El Cd es uno de los metales más abundantes en aguas residuales captadas en PTAR, y que presenta mayor resistencia al tratamiento químico y biológico.

La fabricación de pinturas, industria eléctrica, metalúrgica y automotriz las principales fuente de contaminación de aguas residuales con metales pesados, donde cada una de estas actividades económicas tiene una responsabilidad ambiental al realizar descargas directas y puntuales al alcantarillado o cuerpos de agua superficiales.

Todas las técnicas de detección de metales pesados, requieren pre tratamiento de las muestras de agua que se requieran analizar, por lo tanto ninguna de estas técnicas funciona de manera independiente, por tal motivo se deben estandarizar métodos de pre-tratamiento, así como la técnica de elección para la detección de metales pesados.

Las técnicas de detección de metales pesados se ven afectadas por la sensibilidad y especificidad, debido a las mínimas concentraciones que pueden encontrarse en el agua residual. Por lo tanto técnicas voltamperométricas y EAA-HG, son las técnicas aptas para detectar concentraciones a niveles traza de ppm. La técnica FAAS, es la técnica con mayor especificidad al proporcionar una energía única de transmisión electrónica a cada analito. La voltamperometría de redisolución anódica, es la única técnica con mediciones in situ.

El tratamiento primario de aguas residuales en PTAR, es fundamental para poder ejecutar procesos de tratamientos no convencionales y biológicos.

La coagulación-floculación es el tratamiento primario con el que se obtienen mayores porcentajes de remoción de metales pesados.

La filtración por membrana y la precipitación química comprenden tratamientos convencionales eficaces, pero que producen una gran cantidad de lodos residuales, y que además dependen del pH y conductividad del medio.

La absorción por residuos agrícolas y minerales, es una alternativa novedosa, eficiente y que además logra solucionar dos problemáticas ambientales simultáneamente; la contaminación por metales pesados y un correcto uso de los residuos agrícolas y minerales reemplazando por completo el carbono como material absorbente.

Los principales efectos causados en las plantas por los metales pesados son: disminución del crecimiento, alteración de síntesis de clorofila, pérdida de fertilidad, estrés oxidativo, clorosis, afectación en la fotosíntesis y efecto genotóxico.

Los principales efectos causados en los microorganismos por los metales pesados son: inhibición de actividad enzimática, reducción en la tasa de crecimiento, aberraciones cromosómicas, resistencia, daño en ácidos nucleicos, anoxia, disminución de la biomasa y muerte.

En los tratamientos biológicos y secundarios, la estructura de la pared celular de los microorganismos, es la base fundamental de los procesos de

bioadsorción de metales pesados al encontrarse allí los sitios de unión a iones metálicos, donde el ácido teicoico es uno de los principales sitios activos.

Las bacterias son los microorganismos con mayor potencial de remoción de metales pesados seguido de los Actinomicetos y protozoos, siendo *Pseudomonas putida*, la bacteria con mayor eficiencia de remoción.

Los consorcios bacterianos, resultan ser más eficientes removiendo metales pesados de aguas residuales que cuando se opera con un sistema monomicrobiano, igualmente los sistemas de tratamiento bimetálicos y trimetálicos son más fáciles de remover que cuando se desea remover un metal en específico.

El pH, temperatura, naturaleza y dosis de biomasa son parámetros fundamentales para obtener resultados óptimos en tratamientos biológicos. La temperatura permite una mayor cantidad de iones metálicos captados por la célula bacteriana, acelera procesos pasivos de biosorción, y asegura de manera parcial la viabilidad de los microorganismos, además la biosorción es una reacción netamente endotérmica. La biomasa muerta muestra mayores ventajas con respecto a la viva, al ser de más fácil manutención, y no ser afectada por la carga contaminante. El pH ácido del medio acuoso, proporciona un mayor número de iones hidrógeno que compiten por sitios de unión cargados electronegativamente, perjudicando la actividad de los biosorbentes. A mayor dosis de biomasa, mayor eficiencia de remoción.

Los métodos de detección y remoción de metales pesados deben ser escogidos en función de la carga contaminante, estructura, normatividad vigente para cada país o región y presupuesto de cada PTAR.

10. REFERENCIAS

1. OMS. Guidelines for Drinking-water Quality. Atención Primaria [Internet]. 2006;23(Vdv):7. Available from: http://201.147.150.252:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1262/Investigao_e_evoluo.pdf?sequence=1
2. FAO. Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe: Estado, principios y necesidades. 2017. 116 p.
3. Robledo Zacarías VH, Velázquez Machuca MA, Montañez Soto JL, Pimentel Equihua JL, Vallejo Cardona AA, López Calvillo MD, et al. Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. Rev Int Contam Ambient. 2017;33(2):221–35.
4. Cuizano N a, Navarro AE. Biosorción de metales pesados por algas marinas : posible solución a la contaminación a bajas concentraciones. An Quím [Internet]. 2008;104(2):120–5. Available from: <http://analesdecp22.webjoomla.es/index.php/AnalesQuimica/article/viewFile/416/405>
5. Chávez Porras Á, Cristancho Montenegro DL, Ospina Granados ÉA. Una Alternativa Limpia para el Tratamiento de las Aguas Residuales Galvánicas: Revision Bibliografica. Rev Ing Univ Medellín. 2009;8(14):39–50.

6. Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J Environ Manage* [Internet]. 2011;92(3):407–18. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
7. Lasso J, Ramírez JL. Perspectivas generales del efecto del reúso de aguas residuales para riego en cultivos para la producción de biocombustibles en Colombia. *El hombre y la máquina*. 2011;36:95–105.
8. Mancilla-Villa ÓR, Ortega-Escobar HM, Ramírez-Ayala C, Uscanga-Mortera E, Ramos-Bello R, Reyes-Ortigoza AL. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Rev Int Contam Ambient*. 2011;28(1):39–48.
9. Londoño Franco LF, Londoño Muñoz PT, Muñoz Garcia FG. Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología en el Sect Agropecu y Agroindustrial* [Internet]. 2016;14(2):145. Available from: <http://revistabiotecnologia.unicauca.edu.co/revista/index.php/biotecnologia/article/view/1707>
10. Ates N, Uzal N. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;(Sergey 2011).
11. Duan B, Zhang W, Zheng H, Wu C, Zhang Q, Bu Y. Disposal situation

- of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14(7).
12. Macías Socha C, García Colmenares M, Chaparro S. P. Determinación Electroquímica De Plomo Y Cadmio En Aguas Superficiales. *Luna Azul* [Internet]. 2017;(44):27–38. Available from: http://200.21.104.25/lunazul/downloads/Lunazul44_3.pdf
 13. Feng J, Chen X, Jia L, Liu Q, Chen X, Han D, et al. Effluent concentration and removal efficiency of nine heavy metals in secondary treatment plants in Shanghai, China. *Environ Sci Pollut Res*. 2018;(2015):1–8.
 14. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015. 17 Marzo [Internet]. 2015;62. Available from: http://www.fenavi.org/images/stories/estadisticas/article/3167/Resolucion_0631_17_marzo_2015.pdf
 15. Gorchev HG, Ozolins G. WHO guidelines for drinking-water quality. *WHO Chron*. 2011;38(3):104–8.
 16. Morales GM. Calidad del agua residual tratada. *Sem IMTA (Instituto Mex Tecnol del Agua)* [Internet]. 2014;5,13,18. Available from: http://www.aniq.org.mx/boletines/2014/assets/img/2014/abril/secciones/20140326_aniq.pdf

17. SEMARNAT. Normas Oficiales Mexicanas Normas Oficiales Mexicanas NOM-003-SEMARNAT-1997. Conagua [Internet]. 2013;1–65. Available from:
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
18. Congreso de Colombia. Constitucion Politica de Colombia [Internet]. Congreso de Colombia 1991 p. 108. Available from:
http://www.corteconstitucional.gov.co/inicio/Constitucion_politica_de_Colombia_-_2015.pdf
19. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Decreto 3930 de 2010. D Of. 2010;2010:26.
20. RAS. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS - 2000. Titulo B. Minist Desarro Económico, Dir Agua Potable y Saneam Básico [Internet]. 2000;45. Available from:
http://cra.gov.co/apc-aa-files/37383832666265633962316339623934/7._Tratamiento_de_aguas_residuales.pdf
21. MONTOYA JPM, RAMÍREZ JCC. EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS Guadua, RESIDUALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES UTILIZANDO LA Kunth, Angustifolia [Internet]. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA; 2010.

Available from:
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1801/6283M337.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

22. del Villar A. Guía Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales urbanas. *Trat Av Aguas Residuales* [Internet]. 2010;70. Available from: http://www.consolider-tragua.com/documentos/guia_tratamientos_avanzados.pdf
23. Rincón-silva NG. Evaluacion de parametros fisico-quimicos del agua en el proceso de potabilización del río Subchoque. 2017;
24. Larriva J, González O. Cinética de la remoción de DBO 5 en humedales con flujo sub-superficial horizontal. *Ing Hidraul y Ambient*. 2017;38(1):17–30.
25. Arroba Torres CA, Ávila Malaver DA. Evaluación del desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales de un campus universitario. 2015;43. Available from: <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9408/ÁvilaDavid2015.pdf?sequence=1>
26. APHA/AWWA/WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Stand Methods. 2012;541.
27. IDEAM. Sólidos totales secados a 103° - 105°C. 2007;9. Available from: <http://www.ideam.gov.co/>

28. IDEAM. Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría. Inst Hidrol Meteorol y Estud Ambient [Internet]. 2015;2:2–9. Available from: <http://www.ideam.gov.co/>
29. Guha Mazumder D, Dasgupta UB. Chronic arsenic toxicity: Studies in West Bengal, India. Kaohsiung J Med Sci. 2011;27(9):360–70.
30. Jouanneau S, Recoules L, Durand MJ, Boukabache A, Picot V, Primault Y, et al. Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. Vol. 49, Water Research. 2014. p. 62–82.
31. Ivan M, German G, Sergio V. Remocion de Niquel y DQO presentes en las aguas residuales de la industria automotriz mediante electrocoagulacion. 2013;(19):13–21. Available from: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=90232018&lang=es&site=ehost-live>
32. Torres JP. Oxígeno disuelto, Experiemento 41. Ciencias Con Lo Mejor Vernier [Internet]. 2013;41. Available from: http://www2.vernier.com/sample_labs/CMV-41-oxigeno_disuelto.pdf
33. Orjuela LUZC, N QFU, S MED. CONDUCTIVIDAD ELECTRICA POR EL MÉTODO ELECTROMÉTRICO EN AGUAS CÓDIGO: TP0082 VERSIÓN: 02. In: AMBIENTAL SDHG-LDC, editor. Bogotá; 2008. p. 1–7.
34. Zhao M, Xu Y, Zhang C, Rong H, Zeng G. New trends in removing

- heavy metals from wastewater. *Appl Microbiol Biotechnol* [Internet]. 2016;100(15):6509–18. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>
35. Gall JE, Boyd RS, Rajakaruna N. Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. *Environ Monit Assess*. 2015;187(4).
 36. Chaffai R, Koyama H. Heavy metal tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *Adv Bot Res*. 2011;60:1–49.
 37. Rubio DIC, Calderón RAM, Gualtero AP, Acosta DR, Rojas IJS. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Rev Ing y Región*. 2015;13(1):73–90.
 38. Engels C, Kirkby E, White P. Mineral Nutrition, Yield and Source-Sink Relationships [Internet]. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition*. Elsevier Ltd; 2011. 85-94 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00005-4>
 39. Nava-Ruíz C, Méndez-Armenta M. Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurociencias*. 2011;16(3):140–7.
 40. EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Health Evaluation Manual Supplement to Part A: Community Involvement in Superfund Risk Assessments Risk Assessment Guidance for

Superfund : Evaluation. 1999;1.

41. Organización Mundial de la Salud. OMS | El mercurio y la salud [Internet]. WHO. 2017. p. Pagina Organización Mundial de la Salud. Available from: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>
42. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beeregowda KN. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol.* 2014;7(2):60–72.
43. Razmilic B. Control de Calidad de Insumos y Dietas Acuicolas [Internet]. Fao Italia. 1994. Available from: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S04.htm>
44. Cesar A, Vergara F, Acevedo R, Severiche C. Evaluación analítica para la determinación de arsénico y selenio en aguas por espectroscopía de absorción atómica. *Boliv J Chem.* 2014;31(1):10–4.
45. Morand EE, Giménez MC, Benitez ME, Garro OA. Determinación de arsénico en agua por espectrometría de absorción atómica con generación de hidruro (HG-AAS). *Fac Agroindustrias - UNNE.* 2008;4.
46. Gallegos W, Vega M, Noriega P. Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. *La Granja, Rev Ciencias la vida.* 2012;15(1):18–25.
47. Method FP, Method AS, Couple I. Anexo I Metodologías De Analisis

Parte a : Aguas Superficiales Continentales. 1998;1–7.

48. Hernández FG, Martínez, Antonio PlaJerez AH, Conde-Salazar LR, Guarnido OL. Determinación de Metales por absorción atómica - Horno de Grafito [Internet]. 2009. Available from: <http://www.ugr.es/~fgil/proyecto/grafito/fundamento3.html>
49. Sánchez-Rodas D, Corns WT, Chen B, Stockwell PB. Atomic Fluorescence Spectrometry: A suitable detection technique in speciation studies for arsenic, selenium, antimony and mercury. *J Anal At Spectrom*. 2010;25(7):933–46.
50. Barve KH, Laddha KS, Jayakumar B. Extraction of saponins from safed musli. *Pharmacogn J*. 2010;2(13):561–4.
51. Estrada J. Electrodo de Pasta de Carbón Modificados con Residuos de Café para Cuantificar Metales Pesados en Solución Acuosa. Tesis Doctoral. 2012;64.
52. Espinoza Castellón ER, Alvarado Gámez AL. Desarrollo y validación de un método voltamperométrico para determinar estaño total en agua. *Rev Int Contam Ambient*. 2011;28(1):61–72.
53. Alvis Yepes C. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales del complejo urbanístico Barcelona de Indias [tesis pre grado]. Bogota: Universidad nacional de Bogota; 2015. 2015;
54. Orjuela Gutierrez MI, Lizarazo Becerra JM. Sistemas De Plantas De

Tratamiento De Aguas Residuales En Colombia. 2013;82.

55. Económico M de D, Luz Angela Mondragon, Juan Mauel Bernal , Maria Elena Cruz AV. Documentación Técnico Normativa del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Titulo A. Reglam Técnico Del Sect Agua Potable Y Saneam Basico Ras -2000. 2000;TITULO A:114.
56. Solano OR, Vargas MF, Watson RG. Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. Tecnol en Marcha [Internet]. 2011;23(1):39. Available from: http://tecdigital.tec.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec_marcha/article/view/132
57. Lorenzo Acosta Y, Obaya Abreu MC. La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA Sobre los Deriv la Caña Azúcar. 2009;39(1):35–48.
58. Torres P. Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. Rev EIA. 2012;115–29.
59. Rodríguez-Miranda JP, Gómez E, Garavito L, López F. Estudio de comparacion del tratamiento de aguas residuales domesticas utilizando lentejas y buchon de agua en humedales artificiales. Tecnol y Ciencias del Agua. 2010;1(1):59–68.
60. Gonzales JD. Modelación integrada del sistema de drenaje – PTAR – río de la ciudad de Bogotá. escenarios de control regional. Control.

2011;192.

61. Noyola A, Morgan J, Guereca L. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales [Internet]. Vol. 1, Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015. 2013. 1-140 p. Available from: <https://www.globalmethane.org/documents/Seleccion-de-Tecnologias-para-el-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Municipales.pdf>
62. Nuevo D. Decantación primaria en EDAR | TECPA Formación de ingenieros del medio ambiente [Internet]. 2014. Available from: <http://www.tecpa.es/decantacion-primaria-en-una-edar/>
63. Moeller G, Tomasini AC. Microbiología de lodos activados. J Chem Inf Model [Internet]. 2013;148–208. Available from: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/5Microbiologiadelodosactivados.pdf>
64. Eduardo F, López D. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio Sewage treatment by activated sludge at laboratory scale. 2008;(2):21–8.
65. Vaiopoulou E, Gikas P. Effects of chromium on activated sludge and on the performance of wastewater treatment plants: A review. Water Res [Internet]. 2012;46(3):549–70. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.024>

66. Muñoz-Sánchez TJ, Reyes-Mazzoco R. Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica y nitrógeno en un filtro percolador con nuevo empaque. *Rev Mex Ing Qum.* 2013;12(3):575–83.
67. Tilley E, Lüthi C, Morel A, Zurbrügg C, Lexia T, Alianza PSL, et al. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento [Internet]. 2008. p. 164. Available from: http://www.bvsde.org.ni/Web_textos/REFERENCIA/0001/0001compendio_sp.pdf
68. Beatríz A, Alejandra Y, Alberto J. La biopelícula en los procesos RBC. 2009;(1978):1–17.
69. Jaime LIG. Lagunaje. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización Índice. *EOI.* 2016;16.
70. Fuentes R. Sistemas de Depuración Natural [Internet]. Tecnología para la depuración sostenible del agua residual. 2008. p. 1–43. Available from: <http://depuranatura.blogspot.pe/2011/05/decantacion-primaria-seccion-de-un.html>
71. Karen Rosana Mass Torres 1 y Yenifer Medrano Manga2. Artículo De Revisión: Tratamiento De Aguas Residuales a Partir De Digestión Anaerobia. *Articulo.* 2013;1–17.
72. Muñoz Lucas MI. Caracterización y acondicionamiento de cenizas volantes para la eliminación de metales pesados en aguas

contaminadas. tesis doctoral. universidad de Leon; 2012.

73. Caviedes Rubio DI, Delgado DR, Olaya Amaya A. Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Prod mas Limpia* [Internet]. 2016;11(2):126–49. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552016000200012&script=sci_abstract&tlng=es
74. Ojuederie OB, Babalola OO. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14(12).
75. Kamika I, Momba MNB. Assessing the resistance and bioremediation ability of selected bacterial and protozoan species to heavy metals in metal-rich industrial wastewater. *BMC Microbiol* [Internet]. 2013;13(1):1. Available from: BMC Microbiology
76. Tejada-Tovar C, Villabona-Ortiz Á, Garcés-Jaraba L. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*. 2015;18(34):109–23.
77. Mervat Morsy Abbas Ahmed El-Gendy AMAE-B. Evaluation and enhancement of heavy metals bioremediation in aqueous solutions by *Nocardiosis* sp. MORSY1948, and *Nocardia* sp. MORSY2014. *Brazilian J Microbiol* [Internet]. 2016;47(3):571–86. Available from:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.029>

78. Salihoglu NK. Assessment of Urban Source Metal Levels in Influent, Effluent, and Sludge of Two Municipal Biological Nutrient Removal Wastewater Treatment Plants of Bursa, an Industrial City in Turkey. *Clean - Soil, Air, Water*. 2013;41(2):153–65.
79. Chanpiwat P, Sthiannopkao S, Kim KW. Metal content variation in wastewater and biosludge from Bangkok's central wastewater treatment plants. *Microchem J* [Internet]. 2010;95(2):326–32. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2010.01.013>
80. Methods S. 3114 ARSENIC AND SELENIUM BY HYDRIDE GENERATION / ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETRY * 3114 B . Manual Hydride Generation / Atomic Absorption Spectrometric Method [Internet]. 2009. Available from: <https://www.standardmethods.org/store/ProductView.cfm?ProductID=209>
81. Azizi S, Kamika I, Tekere M. Evaluation of heavy metal removal from wastewater in a modified packed bed biofilm reactor. *PLoS One*. 2016;11(5):1–13.
82. Pérez Aristizábal JD. Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (rbc o biodiscos) a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de

la pradera [Internet]. Vol. 0, repositorio UDEM. UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN; 2010. Available from: [http://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/44/Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos %28RBC o biodiscos%29 a escala laboratorio como tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de La Pradera](http://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/44/Aplicación_y_evaluación_de_un_reactor_de_contactores_biológicos_rotativos_%28RBC_o_biodiscos%29_a_escal_a_laboratorio_como_tratamiento_de_los_lixiviados_generados_en_el_relleno_sanitario_de_La_Pradera)

83. Puyol D, Batstone DJ, Hulsen T, Astals S, Peces M, Kromer JO. Resource recovery from wastewater by biological technologies: Opportunities, challenges, and prospects. *Front Microbiol.* 2017;7(JAN):1–23.
84. Hernandez Israel , Herver Raúl , Olivos Mayky MC. Elaboración de un hidrogel a partir de quitosano para la eliminación de metales pesados (Cu) en una muestra modelo de agua. 2016;3(9):3–9.
85. Martins PSDO, De Almeida NF, Leite SGF. Application of a bacterial extracellular polymeric substance in heavy metal adsorption in a co-contaminated aqueous system. *Brazilian J Microbiol.* 2008;39(4):780–6.
86. Rakib A, Bhuiyan MAH. Full Length Research Paper Arsenic Contamination : Food Toxicity and Local Perception. *Int J Sci Res Environ Sci.* 2014;2(1):1–7.
87. Kaur T, Singh A, Goel R. Mechanisms pertaining to arsenic toxicity. *Toxicol Int [Internet].* 2011;18(2):87. Available from:

<http://www.toxicologyinternational.com/text.asp?2011/18/2/87/84258>

88. Acosta M, Montilla J. Evaluación De La Contaminación Por Cadmio Y Plomo En Agua, Suelo, Y Sedimento Y Analisis De Impactos Ambientales En La Subcuenca Del Rio Balsillas Afluente Del Rio Bogotá. universidad de la salle, facultad de ingeniería; 2011.
89. Sánchez CI, Ramírez JÉ, Cartagena É, Díaz JC. Perfil sociodemográfico y epidemiológico de la población expuesta a la contaminación por mercurio, plomo y cadmio, ubicada en la vereda Manuel Sur del municipio de Ricaurte y los barrios Brisas del Bogotá y La Victoria del municipio de Girardot. *Investig Enferm.* 2010;12(2):93–116.
90. Osorio García SD, Hernández Flores LJ, Sarmiento R, González Álvarez Y, Perez Castiblanco DM, Barbosa Devia MZ, et al. Prevalencia de mercurio y plomo en población general de Bogotá 2012/2013. *Rev Salud Pública [Internet].* 2014;16(4):621–8. Available from:
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/38675/50596>
91. Caravanos J, Dowling R, Téllez MM, Cantoral A, Kobrosly R, Estrada D, et al. Niveles de Plomo en Sangre en México y su Implicación para la Carga Pediátrica de la Enfermedad. *Ann Glob Heal [Internet].*

- 2014;80(4):e1–11. Available from:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214999614003245>
92. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Resumen de Salud Pública: Plomo (Lead) | PHS | ATSDR [Internet]. 06 de mayo de 2016. 2016. Available from:
https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs13.html
93. Zhang Y. Análisis ambiental de la producción de cobre. Vol. 1. Universidad Politécnica de Catalunya-Barcelona; 2015.
94. ATSDR A para ST y el R de E. Resumen de Salud Pública. Cobre. Dep Salud y Serv Humanos los EEUU. 2004;8.
95. Ferrer A. Intoxicación por metales. J Chem Inf Model [Internet]. 2013;26(9):141–53. Available from:
http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272003000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es%5Cnhttp://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116517%5Cnhttp://politicaspUBLICAS.uc.cl/publicacion/otras-publicaciones/diagnostico-preliminar-proyecto-c
96. Villarejo A. Ecotoxicología y Acción Toxicológica del Mercurio. Ambientalex.info [Internet]. 2014;25. Available from:
<http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/EcoacctoXmerint.pdf>
97. Ayangbenro AS, Babalola OO. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. Int J Environ Res

Public Health. 2017;14(1).

ANEXOS

Anexo 1. Comparación de la normatividad internacional, valores máximos permisibles de metales pesados (mg/L) en efluentes de aguas residuales.

País/ parámetro	Tem °C	pH	As (mg/L)	Cd (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr Total (mg/L)	Hg (mg/L)	Ni (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
México (ríos)	A:NA B:40 C:40	6-9	A:0.2 – 0.4 B:0.1 – 0.2 C:0.1 – 0.2 AY:0.2 – 0.4 (PM-PD)	A:0.2 – 0.4 B:0.1 – 0.2 C:0.1 – 0.2 AY:0.05– 0.1 (PM-PD)	A:4.0 – 6.0 B: 4.0 – 6.0 C: 4.0 – 6.0 AY:4.0 – 6.0 (PM-PD)	A:1.0- 1.5 B: 0.5-1.0 C: 0.5-1.0 AY:0.5-1.0 (PM-PD)	A:0.01-0.02 B: 0.005-0.01 C: 0.005-0.01 AY: 0.005-0.01 (PM-PD)	A:2-4 B: 2-4 C: 2-4 AY:2-4 (PM-PD)	A: 0.5-1.0 B: 0.2-0.4 C: 0.2-0.4 AY:5-10 (PM-PD)	A: 10-20 B: 10-20 C: 10-20 AY:10-20 (PM-PD)
Chile (CAF)		6-8,5	0.5	0.01	1.0	0.05 (Cr ⁶⁺)	0.001	0.2	0.2	-
Costa Rica (ALC)	<40	6-9	0.5	0.1	2.0	2.5	0.01	2.0	0.5	10.0
Costa Rica (CAF)	115- 40	5-9	0.1	0.1	0.5	1.5	0.01	1.0	0.5	5.0
Guatemala (Etapa 4)	TCR ±7	6-9	0.1	0.1	3.0	0.1(Cr ⁶⁺)	0.01	2.0	0.4	10.0
Nicaragua (ALC)	50	6-9	1.0	1.0	3.0	0.5(Cr ⁶⁺)	0.02	3.0	1.0	3.0
Nicaragua A CR <75.000 h.		6-9	–	–	–	–	–	–	–	–
Nicaragua A CR <75.000 h.		6-9	–	–	–	–	–	–	–	–
Venezuela		6-9	5.0	0.2	1.0	2.0	0.01	–	0.5	5.0
Oklahoma USA		6.5-9	–	–	–	–	–	–	–	–
EBMCD USA	150 ° F	<5.5	2.0	1.0	5.0	2.0	0.05	5.0	2.0	5.0
Taiwán GB 18918 - 2002	35	6-9	0.5	0.03	3.0	2.0	ND	1.0	1.0	5.0

Anexo 1. Continuación

Sudáfrica Witbank Mpumalanga		6-9	0.2	0.05	0.01	-	ND	0.2	0.01	0.1
Colombia		6-9	0.5	0.1	3.0	0.5	0.02	2.0	0.5	-
A, B, C: tipo de cuerpo receptor según NOM-001-SEMARNAT-1996 A: Uso en riego agrícola B: Uso público urbano C: Protección de vida acuática CAF: Cuerpos de Aguas Fluviales CR: Cuerpo Receptor ALC: Alcantarillado AY: Uso en riego agrícola/ cuerpo receptor tipo A						CAF: Cuerpos de Aguas Fluviales CR: Cuerpo Receptor EBMUD: East Bay Municipal Utility District / GB 18918 – 2002: Norma china de descarga de contaminantes municipales para uso agrícola PM: Promedio Mensual PD: Promedio Diario TCR: temperatura del cuerpo receptor en grados Celsius				

***Adaptado de:** Morales GM. Calidad del agua residual tratada. Sem IMTA (Instituto Mexicano Tecnológico del agua) 2014(16).

Anexo 2. Metales pesados, sus fuentes, vías de exposición, implicaciones clínicas y Valores Máximos Admisibles según Decreto 0631 de 2015 (Colombia)

MP	Fuentes	Vías de exposición	Implicaciones clínicas	VMA
As	Su uso se ha extendido, desde el campo metalúrgico, electrónico, industrial, ganadero, agrícola, e impensablemente, a pesar de su toxicidad, y efecto carcinógeno a bajas concentraciones, ha sido implementado en la medicina(86).	El consumo de alimentos y aguas contaminadas, así como la absorción dérmica directamente del suelo por animales, humanos e incluso ser absorbidas por plantas que posteriormente serán consumidas(86).	Arsenicosis: lesiones cutáneas, inflamación conjuntival, pies hinchados, hepatomegalia, esplenomegalia, ascitis, enfermedad de Bowen, gangrena queratosis, anemia, leucopenia y trombocitopenia y aberraciones cromosómicas en el gen genoma(87).	0 mg/dL
Cd	Galvanoplastia, galvanostegia, galvanización, producción de plástico, pigmentos para crear tintes, pinturas y cerámica de color amarillo brillante (sulfito de cadmio), naranja, rojo (selenito de cadmio) y marrón; en baterías de níquel y cadmio por su gran resistencia a la corrosión, emisiones volcánicas, quema de combustibles fósiles y de biomasa(88).	Vía inhalatoria, consumo de alimentos y aguas contaminadas, de igual manera cultivos como el de arroz principalmente que son contaminados durante el riego con aguas residuales tratadas(89). Al ser un metal bioacumulable se incrementa el de toxicidad sobre la cadena alimenticia, en donde los hábitos alimenticios son la principal fuente de intoxicación(88).	Disfunción renal tubular, proteinuria e insuficiencia renal crónica arterosclerosis aórtica y coronaria, hipercolesterolemia; alteraciones placentarias, y neurotóxicas en sistema nervioso central y periférico(39).	0,10 mg/dL

Anexo 2. Continuación

Pb	Fabricación de productos de refinería, manufactura de baterías, plásticos, pinturas, soldadura, vidrio vajillas de cristal, municiones, tuberías y joyas.(90)	Ingesta de comida, e inhalación por vía aérea. Durante procesos de fundición, reciclaje o decapado de pintura con plomo, o al utilizar gasolina con plomo)(91)	Es un metal neurotóxico, se relaciona con riesgo de hipertensión arterial y lesiones renales. durante el embarazo, aborto natural, muerte fetal, parto prematuro y bajo peso al nacer, (92)	0,50 mg/L
Cu	Este metal es un excelente conductor eléctrico (58,108 x 10 ⁶ S/m), por lo cual es utilizado en la fabricación de cableado eléctrico, engranajes, tuberías y accesorios arquitectónicos etc.(93)	El consumo de alimentos y aguas contaminadas, absorción dérmica directamente del suelo por animales, humanos e incluso por plantas que posteriormente serán consumidas(86). La combustión y fundición de este metal, puede constituir una vía de exposición aérea(39).	Irritación de las vías respiratorias náuseas, vómitos y diarrea pueden ser los síntomas principales ante un caso de intoxicación por cobre. Concentraciones sanguíneas de cobre elevadas, daño hepático y renal, e incluso la muerte(94).	1.00 mg/L
Hg	El mercurio, se encuentra presente de forma natural, elemental, inorgánica u orgánica. Emisiones de mercurio, pueden generarse a partir de la combustión de carbón en centrales eléctricas , y como producto de la incineración de residuos y de la extracción minera de mercurio, oro y otros metales”(41).	La forma contaminante para el ser humano y otras especies animales, es el Metilmercurio, que se bioacumula en la fauna acuática reconocidos como potenciales productos. Beber agua o incluso alimentos contaminados con mercurio generan una alerta inminente de intoxicación por este metal(95).	En intoxicaciones agudas por mercurio, es muy factible que se presenten síntomas clínicos como escalofríos, sabor metálico, náuseas, vómitos, diarrea, tos y opresión torácica y cianosis , produciendo shock y muerte gracias a su potencial precipitante de proteínas mucosas(96)	0.0 mg/L

Fuente: Autor

Anexo 3. Toxicidad de metales pesados a formas de vida (plantas y microorganismos)

Metales	Fuente	Efectos en las plantas	Efectos en los Microorganismos
Antimonio	Combustión de carbón, minería, fundición, erosión del suelo, erupción volcánica	Disminuye la síntesis de algunos metabolitos, inhibe el crecimiento, y la síntesis de clorofila	Inhibir las actividades enzimáticas tasa de crecimiento reducida
Arsénico	Deposición atmosférica, minería, pesticidas, roca sedimentación, fundición	Daño en la membrana celular, inhibe el crecimiento, la extensión y proliferación de las raíces, interfiere con los procesos metabólicos críticos, pérdida de fertilidad, rendimiento y la producción de frutas, estrés oxidativo.	Desactivación de enzimas
Berilio	Combustión de carbón y petróleo, polvo volcánico	Inhibe la germinación de la semilla	Aberración cromosómica, mutación
Cadmio	Fertilizantes, minería, pesticidas, plásticos, refinación, soldadura	Clorosis, disminución de nutrientes, inhibición del crecimiento, reducción en la germinación de la semilla	Daño en ácidos nucleicos, inhibe la división celular y transcripción y mineralización de carbono y nitrógeno
Cromo	Tintas, galvanoplastia, producción de pinturas, fabricación de acero, bronceado, textil	Clorosis, retraso, senescencia, marchitez, lesiones bioquímicas, reducción germinación de la biosíntesis, crecimiento atrofiado, estrés oxidativo	Elongación de la fase de retraso, inhibición del crecimiento, inhibición de la absorción de oxígeno
Cobre	Pulido de cobre, minería, pintura, galvanizado e impresión	Clorosis, estrés oxidativo, retardo en el crecimiento	Interrupción de la función celular, inhibe las actividades enzimáticas
Mercurio	Baterías, combustión de carbón, actividades geotérmicas, minería, industrias de pintura, industria papelera, erupción volcánica, desgaste de rocas	Afecta el sistema antioxidante, afecta fotosíntesis, mejorar la peroxidación lipídica, efecto genotóxico inducido, inhibir el crecimiento de la planta, el rendimiento, la absorción de nutrientes y la homeostasis, el estrés oxidativo	Disminuye el tamaño de la población, desnaturaliza proteínas, altera la membrana celular, inhibe función enzimática

Anexo 3. Continuación.

Plomo	Combustión de carbón, galvanoplastia, fabricación de pilas, minería, pintura, pigmentos	Afecta la fotosíntesis y el crecimiento, clorosis, inhibe las actividades enzimáticas y germinación de semillas, estrés oxidativo	Desnaturaliza ácidos nucleicos y proteínas, inhibe enzimas y transcripción
Níquel	Galvanoplastia, metal no ferroso, pinturas, esmaltado de porcelana	Disminuye el contenido de clorofila, inhibe actividades enzimáticas, reducción del crecimiento y absorción de nutrientes	Desorganiza la membrana celular, inhibe las actividades enzimáticas y estrés oxidativo
Selenio	Combustión de carbón, minería	Alteración de las propiedades proteicas y reducción de biomasa vegetal	Inhibe la tasa de crecimiento
Plata	Fabricación de baterías, minería, procesamiento fotográfico y fundición	Afecta la homeostasis, disminuye contenido de clorofila, inhibe el crecimiento	Lisis celular, inhibe la transducción celular y el crecimiento
Talio	Producción de cemento combustión de combustibles fósiles, fundición de metales, y refinación de petróleo	Inhibe las actividades enzimáticas, reduce el crecimiento	Daña el ADN, inhibe la actividad enzimática
Zinc	Fabricación de latón, minería, refinería de petróleo, fontanería	Afecta la fotosíntesis, inhibe la tasa de crecimiento, reduce el contenido de clorofila, tasa de germinación y biomasa de la planta	Muerte, disminución de la biomasa, inhibe el crecimiento

*Adaptado de: Ayangbenro AS, Babalola OO. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents. Int J Environ Res Public Health. 2017(97)

