



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA OCURRENCIA Y LOS MÉTODOS DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUA DE EFLUENTES INDUSTRIALES EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS.

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Químico

Autor:

Jean Pierre Rosero Arteaga

CI: 010654767-2

Correo electrónico: jpra201@gmail.com

Directora:

Ing. Verónica Patricia Pinos Vélez PhD.

CI: 010355071-1

Cuenca, Ecuador

11 de febrero de 2021



Resumen

En la presente revisión bibliográfica se revisó el análisis de los riesgos que el Cromo produce en el medio ambiente y al ser humano encontrando que el mismo en su estado de oxidación Cr (VI) es considerado un metal tóxico por sus propiedades oxidantes, penetrando de manera rápida a las células, provocando así alteraciones potencialmente cancerígenas en el ADN. En el medio ambiente causa daño en la flora, fauna y por las alteraciones producidas en distintos ecosistemas. En tanto en la parte regulatoria el Ecuador por el TULAS o TULSMAN se encuentra vinculado tanto a la EPA como la FDA por el límite máximo permitido en agua potable que es de 0,05 mg/L ajustándose a los estándares establecidos por la OMS. Consecuentemente al investigar su ocurrencia en agua superficial, potable e industrial se obtuvo una visión más amplia de cuáles son los países que presentan con mayor frecuencia contaminación por parte del Cr (VI), ubicando en primera instancia el continente con mayor y menor número de estudios, y en segunda cual es el país con mayor y menor concentración basados en la especie, ubicación y tipo de agua. Al comparar los distintos métodos de remoción de este metal en aguas industriales reales los métodos que prevalecieron fueron los no convencionales que al revisar sus ventajas y desventajas resultaron más factibles debido a que contribuyen al ahorro de energía y costos en comparación con los convencionales.

Palabras claves: Ocurrencia cromo. Cromo hexavalente. Tratamientos para remoción de cromo. Toxicidad. Enfermedades causantes.



Abstract:

In this bibliographic review, the analysis of the risks that Chromium produces in the environment and to humans was reviewed, finding that it in its oxidation state Cr (VI) is considered a toxic metal due to its oxidizing properties, penetrating in a fast to cells, thus causing potentially carcinogenic alterations in DNA. In the environment it causes damage to flora and fauna and due to the alterations produced in different ecosystems. Meanwhile, in the regulatory part, Ecuador by the TULAS or TULSMAN is linked to both the EPA and the FDA for the maximum limit allowed in drinking water, which is 0.05 mg / L, adjusting to the standards established by the OMS. Consequently, when investigating its occurrence in surface, drinking and industrial water, a broader vision was obtained of which are the countries that most frequently present contamination by Cr (VI), locating in the first instance the continent with the largest and smallest number of studies, and secondly, which is the country with the highest and lowest concentration based on the species, location and type of water. When comparing the different methods of removal of this metal in real industrial waters, the methods that prevailed were the unconventional ones, which when reviewing their advantages and disadvantages were more feasible because they contribute to energy and cost savings compared to conventional ones.

Keywords: Chromium occurrence. Hexavalent chromium. Chromium removal treatments. Toxicity. Causative diseases.



Glosario de Términos

EPA: Agencia de Protección del Ambiente

OMS: Organización Mundial de la Salud

ADN: Acido desoxirribonucleico

Genotóxico: Capacidad para causar daño al material genético por agentes, físicos químicos o biológicos.

Metal toxico: término usado para los metales que dependiendo de su concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas.

IARC: Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer

OSHA: Administración de Seguridad y Salud Ocupacional

FDA: Administración de Drogas y Alimentos

ATSDR: Agencia para Sustancias Toxicas y Registro de Enfermedades

NIOSH: Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional

NPL: Lista de Prioridades Nacionales

COOTAD: Código Orgánico de Organización Territorial Autónomo Descentralizado

PEL: Límite de Exposición Permisible

TLV: Valor Límite de Umbral

REL: Límite de Exposición Recomendado

HAPs: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

CCR: Residuos de Combustión de Carbón

Límite SEQ: Limite de Secuencia

Ceniza Volante: Residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan al concreto.

DHHS: Departamento de Salud y Servicios Humanos

HDL: Hidróxidos dobles laminares



Índice del Trabajo

Contenido

Resumen	2
Abstract:	3
Glosario de Términos	4
Índice del Trabajo	5
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	8
Agradecimiento	9
Dedicatoria.....	13
Introducción.....	14
OBJETIVOS	16
Objetivo General	16
Objetivos Específicos	16
1. Metodología	17
1.1. Bases de Datos.....	17
1.1.1. Google Académico.....	17
1.1.2. Scopus	19
1.1.3. Science Direct.....	21
1.1.4. Taylor & Francis.....	22
1.1.5. Research Gate	23
1.2. Proceso de selección de artículos científicos.....	25
1.2.1. Búsqueda.....	25
1.2.2. Palabras Claves.....	26
1.2.3. Selección de artículos.....	27
2. EFECTOS AL MEDIO AMBIENTE Y TOXICIDAD AL SER HUMANO DEL CROMO	31
2.1. Riesgos a la salud y la vida por exposición al cromo	33
2.2. Normativas vigentes para la regulación del cromo	35
2.2.1. Internacionales.....	35
2.2.2. Nacionales	37



2.3.	Regulación del Cromo.....	41
2.4.	Análisis y Síntesis de la Información	43
3.	OCURRENCIA DEL CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS SUPERFICIALES, POTABLES E INDUSTRIALES	44
3.1.	El cromo	44
3.2.	La contaminación del agua con metales.....	46
3.3.	El cromo en las Aguas Superficiales, Potables e Industriales.	48
3.3.1.	Aguas Superficiales.....	51
3.3.2.	Agua Potable	55
3.3.3.	Aguas Industriales	58
3.4.	Análisis y síntesis de la información	61
4.	REVISIÓN DE MÉTODOS PROPUESTOS PARA REMOCIÓN DEL CROMO DEL AGUA	61
4.1.	Técnicas Convencionales de tratamiento para remoción de metales tóxicos en aguas residuales.....	63
4.2.	Técnicas Convencionales	65
4.2.1.	Filtración por membrana.....	65
4.2.2.	Electrodialisis.....	65
4.2.3.	Ósmosis Inversa.....	65
4.2.4.	Nanofiltración.....	66
4.2.5.	Ultrafiltración	66
4.2.6.	Intercambio Iónico	66
4.2.7.	Adsorción (Convencional)	67
4.2.8.	Precipitación química	67
4.2.9.	Electrocoagulación	67
4.2.10.	Coagulación – Floculación	68
4.2.11.	Electro floculación.....	68
4.2.12.	Flotación.....	68
4.2.13.	Fotocatálisis en la degradación de metales pesados	68
4.3.	Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los métodos convencionales más utilizados en la eliminación de Cromo en sistemas acuosos	69
4.4.	Técnicas No Convencionales	71
4.4.1.	Bio-Absorbentes.....	71



4.4.2.	Utilización de sistemas vivos (microorganismos y plantas)	71
4.4.3.	Biopolímeros	72
4.4.4.	Hidrogeles	72
4.4.5.	Ceniza volante	72
4.5.	Análisis y Síntesis de la Información	72
5.	CONCLUSIONES	79
6.	RECOMENDACIONES	80
	Referencias Bibliográficas	81

Índice de Figuras

Figura 1.	Buscador de Google Académico.....	18
Figura 2.	Buscador de Scopus	20
Figura 3.	Buscador de ScienceDirect	22
Figura 4.	Buscador de Taylor & Francis	23
Figura 5.	Objetivos de ResearchGate	24
Figura 6.	Buscador de ResearchGate	24
Figura 7.	Proceso de selección de búsqueda bibliográfica para el Capítulo II.	28
Figura 8.	Proceso de selección de búsqueda bibliográfica para el Capítulo III.....	29
Figura 9.	Proceso de selección de búsqueda bibliográfica para el Capítulo IV.	30
Figura 10.	Ubicación de los estudios de ocurrencia de cromo en aguas superficiales en el mapamundi.	51
Figura 11.	Gráfico Pastel de la Ocurrencia de Cromo (VI) en aguas superficiales en los distintos continentes.....	54
Figura 12.	Ubicación de los estudios de ocurrencia de cromo en agua potable en el mapamundi. ..	55
Figura 13.	Gráfico Pastel de la Ocurrencia de Cromo (VI) en aguas Potables en los distintos continentes.....	57
Figura 14.	Ubicación de los estudios de ocurrencia de cromo en aguas industriales en el mapamundi.	58
Figura 15.	Gráfico Pastel de la Ocurrencia de Cromo (VI) en aguas industriales en los distintos continentes.....	60
Figura 16.	Sinopsis de las técnicas de tratamiento de remoción de metales tóxicos.....	63
Figura 17.	Porcentaje representativo de predominancia de métodos revisados.	73



Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de trabajo con operadores booleanos usados en la revisión bibliográfica	26
Tabla 2. Palabras clave utilizadas por paquete (capítulo).	27
Tabla 3. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección.	40
Tabla 4. Sinopsis comparativa sobre los rangos permisibles del cromo en Agua Potable.....	43
Tabla 5. Cuadro descriptivo de la Ocurrencia del Cromo en distintos países	49
Tabla 6. Métodos convencionales más utilizados en la eliminación de Cromo en sistemas acuosos	69
Tabla 7. Métodos de remoción del Cromo Hexavalente aplicando técnicas convencionales y no convencionales.	74



Cláusula de Propiedad Intelectual

Jean Pierre Rosero Arteaga, autor del trabajo de titulación "REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA OCURRENCIA Y LOS MÉTODOS DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUA DE EFLUENTES INDUSTRIALES EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS.", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de febrero de 2021

Jean Pierre Rosero Arteaga

C.I: 010654767-2



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jean Pierre Rosero Arteaga en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA OCURRENCIA Y LOS MÉTODOS DE REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN AGUA DE EFLUENTES INDUSTRIALES EN LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS.", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de febrero de 2021

Jean Pierre Rosero Arteaga

C.I: 010654767-2



Agradecimiento

A Dios, por darme siempre fuerza y llenarme de sabiduría, aprendiendo a sobrellevar cualquier situación que se me presentó en el transcurso de mi vida.

A mi directora de tesis, Ing. Verónica Pinos, por su continuo apoyo desde el principio, enriqueciendo mi mente con sus conocimientos y permitiéndome culminar con éxito este trabajo de titulación, que sin su supervisión y ayuda no lo hubiese terminado con la eficiencia con que la hice, proyectándome a futuros retos.

A mis queridos padres, Ligia y Juan Carlos, porque a pesar de todo la familia siempre va a ser lo primero en esta vida, y sin duda ellos han sido mi motivación, motor y ejemplo a seguir. Jamás me han juzgado, han sabido aceptarme tal cual soy y por eso se los agradezco y los amo, no sé qué haría sino los tuviera, criaron a un hombre fuerte, con determinación y por eso la vida jamás me alcanzara para agradecerles. “Siempre pesa más lo que sabes que lo que eres” - Ligia Arteaga.

A mi hermana, Karla, quien ha estado ahí para mí en las buenas, malas y peores, siempre desde su corta edad me brinda su mano para levantarme y jamás desfallecer, jamás ha dejado de creer en mí, inclusive cuando yo dejé de hacerlo.

A mi hermano, Jholaus, por demostrarme que con una mentalidad positiva y convicción todo lo que uno quiere se logran, sin dejar de lado la humildad que uno debe tener como ser humano, citando su frase de hace años, “hermano mayor es a padre menor”.

A mis amigas, Laura, Jhoselyn y Valeria, por apoyarme en uno de los momentos más difíciles de mi vida, cuando me fui de casa, y jamás me negaron una cama, un plato de comida, o tan solo escucharme y apoyarme, sé que están orgullosas de todo lo que he logrado, que digo logrado, hemos logrado. -Always? -Always.

A mis abuelos, Cristóbal y Angela, por demostrarme que el verdadero valor y amor dentro de una familia sigue ahí, a él por demostrarme lo que es ser un caballero, y a ella, porque sé que desde el cielo me ves y estas muy orgullosa de lo que tu pequeño ha logrado.



Sin duda alguna al programa Ing. Ruth Cecilia Álvarez “Ayuda a un joven a graduarse” y al grupo de profesores que forman parte del el, por haberme permitido ser parte de este programa y brindarme el apoyo necesario en su momento para lograr culminar mis estudios, invitando así al resto de profesores de la Facultad de Ciencias Químicas a que siguen apoyando a esta noble causa.

A mis profesores y profesoras, y con un cariño especial a la Ing. Andrea Iñiguez, porque en un momento crucial de mi vida cuando debí descarrilarme, supo darme apoyo sin siquiera conocerme, y saberme decir que lo iba a lograr y que le daba orgullo ver que el joven que empezó comiendo en la cafetería con Luisita hoy logra graduarse de Ingeniero. ¡¡¡¡Ingeniera, gracias...!!! sin esa ayuda tal vez no lo hubiese logrado.

A mi alma máter Universidad de Cuenca por la oportunidad de ser parte de la comunidad académica y recibir educación de calidad.



Dedicatoria

Este trabajo, se lo dedico a ese niño que jamás dejo de sonreír a pesar de todo lo que le paso, que fue padre para sus hermanos y siempre los cuidó.

A ese joven, que jamás acepto un no por respuesta, y siempre fue fiel a lo que era y a lo que creía, jamás dejó sus sueños de lado, y vivirá toda la vida pudiendo decir que el sí vivió un sueño que siempre quiso.

Y a ese adulto, en el que se convirtió, con carácter y fuerza de convicción, emprendedor y decidido, con amor propio y confianza en sí mismo.

Así es, este trabajo te lo dedico a ti, que solo tú sabes cuánto te costó conseguir todo lo que has conseguido, que jamás dejaste de creer en ti mismo, y aprendiste a valorarte como ser humano.

Todo lo que hiciste valió la pena, jamás pierdas quién eres, estoy orgulloso del ser humano en el que te has convertido, recuerda, te mereces todo lo que sueñas. “Te he visto volver a empezar, y lo has hecho como nadie”.

De: Mi

Para: Mi



Introducción

El cromo fue descubierto en 1778 por Nicolas Louis Vauquelin, es un metal color gris-acero, brillante, duro y quebradizo del grupo VI-B de la serie de los metales de transición que tiene un número atómico de 24 y una masa atómica de 51,996 uma. Ocurre en la naturaleza en formas ligadas que constituyen entre el 0,1 – 0,3 mg.kg⁻¹ de la corteza terrestre, este se halla en rocas, suelos, el polvo volcánico, y en la flora y fauna. Presenta algunos estados de oxidación, de hecho, se han encontrado compuestos de Cr con las valencias (I), (II), (IV) y (V) (Singh, 2005).

En el medio ambiente se manifiesta principalmente en forma trivalente Cr (III), hexavalente (VI) y en la forma metálica Cr (0) elemental. El cromo hexavalente se encuentra como iones cromato (Cr₂O₄⁻²) o dicromato (Cr₂O₇⁻²), los cuales rompen diferentes barreras biológicas, por lo cual toman una acción carcinogénica dentro del organismo (Kan et al., 2017; Mullick et al., 2018).

El cromo aparece en el agua, únicamente en dos estados de oxidación: Cr (III) y Cr(VI) (Kan et al., 2017; Mullick et al., 2018). El Cr (VI) ha sido identificado como tóxico, causando varios tipos de cáncer y daños al Acido Desoxirribonucleico (ADN). Por el contrario, Cr (III) se considera un elemento esencial para humanos y nutrición animal. Estudios relevantes indican que la exposición a Cr (VI) puede provocar asma y daños en el epitelio nasal y la piel (Kaprra et al., 2015). El efecto de Cr (VI) en el sistema de tiorredoxina es probablemente el que ocasione implicaciones generalizadas para la supervivencia celular y varios aspectos de señalización redox (Myers, 2012). Por ello, la Agencia de Protección del Ambiente (EPA) de los EE. UU cataloga al cromo como uno de los 17 agentes químicos más dañinos para el ser humano (Albis et al., 2015); y, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Unión Europea han establecido como nivel máximo de contaminante (MCL) 50 µg/L en agua potable dirigida a la concentración de Cr total (Zhitkovich, 2011).

El principio de la remediación convencional, es la reducción de Cr (VI) a Cr (III); donde este último precipita como hidróxido de cromo a un pH alto, seguido de esta eliminación da como resultado lodo deshidratado (Shi et al., 2011). Los tratamientos fisicoquímicos más utilizados



para su remoción son: electrocoagulación, electrodiálisis, electrodesionización, reducción electroquímica, adsorción, tratamientos biológicos, membranas y fotocatalisis.

Sin duda la presencia del cromo en el agua resulta alarmante por el uso que se le da en la industria, siendo liberado al ambiente como desecho de un gran número de operaciones como son: metalizado, galvanoplastías, procesamiento de textiles, refinado del petróleo, preparación de maderas, entre otras (Ezaka & Anyanwu, 2011). En estudios revisados en este trabajo se corrobora la presencia que tiene este metal en distintos tipos de agua como la superficial, potable e industrial en distintos partes del mundo, en algunos casos excediendo el rango máximo permitido en gran cantidad y en otros estando por debajo. Recordando que su presencia no solo afecta al medio ambiente sino también al ser humano por su concentración, solubilidad y carácter oxidante.

Por lo mencionado anteriormente este trabajo se centra en realizar un estudio de la frecuencia que tiene el cromo en agua y las técnicas de eliminación de cromo hexavalente de efluentes industriales desde el 2015 hasta la actualidad.

En el capítulo I, se revisa la metodología utilizada para la obtención, elección, revisión y síntesis de los artículos encontrados en cada sección.

El capítulo II, abarca los riesgos que produce el Cromo al medio ambiente y al ser humano. De tal manera que se conocerán las distintas afecciones que produce este metal pesado al organismo del ser humano, por otro lado, se discute el cumplimiento de los límites permitidos de cromo en aguas potables y otros de acuerdo con organismos nacionales e internacionales.

En el capítulo III, se habla acerca de la ocurrencia de cromo en distintas aguas como son: las superficiales, potables e industriales. Los criterios de clasificación utilizados para el desarrollo de este capítulo fueron en primera instancia el continente de localización, la concentración de cromo y su especie, por tipo de agua.

El capítulo IV, se enfoca en el análisis de las distintas propuestas de tratamiento de agua para la remoción de cromo hexavalente en aguas industriales. Se discutirán las ventajas y desventajas de los distintos métodos de remoción de cromo hexavalente propuestos en los últimos 5 años.

En el capítulo V, se establece las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación, dejando carta abierta para continuar con futuras investigaciones acerca del mismo tema.



OBJETIVOS

Objetivo General

- Realizar una revisión Bibliográfica de la ocurrencia del cromo en agua y los métodos de remoción de cromo hexavalente en aguas de efluentes industriales de los últimos 5 años.

Objetivos Específicos

- Conocer los efectos al medio ambiente y la toxicidad en el ser humano del cromo.
- Conocer la ocurrencia del cromo en aguas superficiales, potables y residuales.
- Comparar las propuestas de remoción del cromo hexavalente en agua de efluentes industriales.



CAPITULO I

Metodología

1. Metodología

1.1. Bases de Datos

1.1.1. Google Académico

Google Académico (Google Scholar) es un buscador que permite ubicar documentos de carácter académico como artículos, tesis, libros, patentes, documentos relativos a congresos y resúmenes. Se nutre de información que viene de diversas fuentes: editoriales universitarias, asociaciones profesionales, repositorios de preprints, universidades y otras organizaciones académicas. Además, habla de la diferencia principal con el buscador genérico de Google, es que aquí se ordenan los resultados por relevancia y se utiliza una herramienta especial para el ranking que toma en consideración el texto completo de cada uno de los artículos (*Biblioteca de la Universidad de Cantabria, 2014*).

Varios de los contenidos son dados por los propios creadores. Editores de todo el mundo indexan sus obras en las distintas disciplinas para ponerlas a disposición de los usuarios y Google anima a ser parte de este proyecto ayudando a ampliar los catálogos. Por el momento constituye la mejor herramienta gratuita para localizar información académica. Recolecta gran cantidad de información y una tipología de documentos y contenidos sumamente variada (*Biblioteca de la Universidad de Cantabria, 2014*).

Según (Gil, 2015) normalmente el rastreador de Google Académico selecciona sus registros de sitios donde la información se encuentra en acceso abierto o de bases de datos comerciales con los que con anterioridad se ha llegado a algún acuerdo. Entre los que encontramos:

- Webs académicas de universidades y centros de investigación.
- Repositorios (arXiv.org, SSRN).
- Portales de revistas (IngentaConnect, ACM Digital Library).
- Bases de datos (PubMed).
- Editoriales comerciales (Elsevier, SAGE, Cambridge University Press).



- Catálogos en línea de bibliotecas (Worldcat, Dialnet).
- Sociedades científicas (America Physical Society, American Chemical Society, Royal Society of Chemistry).
- Productos propios de Google Patents y Google Books Library Project.

Tipología de documentos:

- Artículos de revistas científicas y libros.
- Comunicaciones y ponencias a congresos.
- Informes científico-técnicos
- Tesis, tesinas o memorias de grado.
- Trabajos depositados en repositorios.
- Cualquier publicación con resumen.
- Patentes, referencias o citas.

Google Académico no indexa documentos no científicos, como reseñas de libros y editoriales, libros de texto, periódicos o revistas comerciales.



Google Académico

Cualquier idioma Buscar sólo páginas en español

Artículos sobre COVID-19

CDC NEJM JAMA Lancet Cell BMJ
Nature Science Elsevier Oxford Wiley medRxiv

A hombros de gigantes

Figura 1. Buscador de Google Académico

Fuente: Rosero (2020)



1.1.2. Scopus

Scopus es una base de datos bibliográfica iniciada en 2004, de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas. Contiene, los resúmenes y citas de artículos de revistas indexadas, más de 3 700 revistas indexadas de Gold Open Access, más de 210 000 libros y más de 8 millones de actas de congresos, más de 8 millones de documentos en open Access, también incluye “Articles in Press” de más de 5 500 títulos, y cubre 40 idiomas (Llurba, 2018).

Son áreas de: ciencia, tecnología, medicina y ciencias sociales (incluyendo artes y humanidades). Contiene más de 35.000 títulos de todas las áreas. A parte de revistas, tiene series monográficas, actas de congresos, libros (a nivel de libro y capítulo) o patentes (más de 39 millones, procedente de cinco oficinas oficiales: WIPO, EPO, Estados Unidos, Japón y Reino Unido). Su cobertura temporal es desde 1996, aunque a veces llegue hasta 1970. Se actualiza diariamente (Llurba, 2018).

En algunos casos da acceso al texto completo de los documentos que incluye. También brinda herramientas bibliométricas para evaluar el desempeño de publicaciones y autores, según las citas recibidas por cada artículo. Estas herramientas se basan en las métricas desarrolladas por distintos expertos, como el grupo de investigación español Scimago, Centre for Science and Technology Studies (CWTS) de la Universidad de Leiden (Países Bajos).

(Llurba, 2018), menciona que Scopus permite:

- Buscar documentos y llegar al texto completo en caso de que la Biblioteca tenga suscripción.
- Unas de las opciones de búsqueda disponible en Scopus es por agencia de financiación. También deja limitar los resultados de una búsqueda a que muestre patentes.
- Valorar el rendimiento de la investigación por los índices de impacto Scientific Journal Ranking (SJR), CiteScore y Source Normalized Impact per Paper (SNIP) o las altimétricas ofrecidas por PlumX (siguiendo el link PlumX se recupera el listado



de documentos que citan el artículo en cuestión). A parte de las métricas básicas de un autor y sus publicaciones, Scopus Preview nos da métricas de un artículo definido.

- Ver qué autores publican más en una institución.
- Buscar citas y visualizar el índice h, el cual indica la medición de la calidad profesional de científicos, en función de la cantidad de citas que han recibido sus artículos científicos. Para saber qué está de actualidad en un área de investigación, proporcionando los artículos y autores más citados
- Identificar autores y encontrar información relacionada con el autor (como: citas, un resumen de sus principales métricas, sus trabajos publicados, lista de documentos que citan trabajos del autor, lista de coautores con el número de trabajos que han hecho en colaboración, etc.)
- Mantenerse actualizado en un ámbito de investigación, de una institución, o de la producción de un investigador y saber quién le cita, creando alertas de búsqueda que nos lleguen al correo electrónico.
- Generar listas de un autor de un grupo de autores y exportar registros que nos interesen.
- Exportar los datos a gestores bibliográficos como RefWorks, Mendeley o EndNote.
- Tener un perfil de autor de manera automática, con posibilidad de edición, incluyendo datos bibliométricos como el índice h.

Figura 2. Buscador de Scopus

Fuente: Rosero (2020)



1.1.3. Science Direct

Science Direct es la plataforma digital y base de datos que posibilita consultar las publicaciones de Elsevier. A diferencia de otros productos de la misma empresa (como Scopus), Science Direct no necesita suscripción previa para su utilización (Codina, 2018).

Ahora bien, que una base de datos funcione en modo abierto no significa que el acceso al documento final quede garantizado.

Por ello (Codina, 2018), explica las dos posibilidades:

- Se puede tener el acceso a metadatos y también a documentos completos (artículos de revistas académicas) por ser una publicación de tipo open access o bien porque se tiene una suscripción activa (siempre que el acceso sea desde un campus universitario).
- Se puede tener acceso únicamente a los metadatos, pero no al documento completo si se trata de una publicación que requiere suscripción y no se dispone de la misma.

Así (Codina, 2018) señala que Science Direct proporciona acceso a las siguientes colecciones:

- Artículos de revistas.
- Monografías.



The screenshot shows the ScienceDirect search interface. At the top, there is a search bar with the text "Find articles with these terms" and "chromium wastewater" entered. Below the search bar, there is a "Advanced search" link. The search results section shows "19,510 results" and a "Set search alert" button. On the left, there is a "Refine by:" section with a "Years" filter set to "2021 (421)". On the right, there are options to "Download selected articles" and "Export", and the results are "sorted by relevance | date". A single result is visible, titled "Recovery of chromium(VI) in wastewater using solvent extraction with amide", from the journal "Hydrometallurgy", dated 31 July 2020, by authors Ziwen Ying, Xiulian Ren, and Qifeng Wei. There are also "Abstract" and "Export" options for this result.

Figura 3. Buscador de ScienceDirect

Fuente: Rosero (2020)

1.1.4. Taylor & Francis

“Taylor & Francis Group es una editorial británica de presencia internacional que publica libros para el ámbito académico. La compañía fue fundada en 1852 al asociarse en Inglaterra William Francis y Richard Taylor en el negocio editorial. Desde entonces, Taylor & Francis es punto de referencia para la comunidad científica internacional y sinónimo de calidad dentro del mercado editorial”(CEDIA, 2020).

Su recopilación de publicaciones de acceso en línea presenta revistas de alto impacto y visibilidad, con enfoque a la investigación científica y cobertura desde 1997. Sus temáticas engloban todas las áreas del conocimiento: ciencia, tecnología, humanidades y ciencias sociales. Los artículos son sometidos a un riguroso proceso de arbitraje (CEDIA, 2020).

(CEDIA, 2020) habla acerca de las colecciones con las que se maneja Taylor & Francis, como son:

- Colecciones ciencias sociales y humanistas
- Colección ciencia y tecnología



The screenshot shows the Taylor & Francis Online search interface. At the top, the user is logged in as 'Hi jean pierre rosero arteaga' with a 'Your account' link and a 'Cart' icon. The search bar contains the query 'Occurrence AND chromium hexavalent'. Below the search bar, the results are displayed as 'Your search for [All: occurrence] AND [All: chromium] AND [All: hexavalent]' with '1-10 of 1,910 results'. On the left, there are 'Filters' and 'Access Type' options, including checkboxes for 'Only show content I have full access to' and 'Only show Open Access'. On the right, there are buttons for 'Articles (1910)', 'Save this search', and 'Export search results'. Below these are options for 'Download citations', 'Download PDFs', 'Order by Relevance', and '10 per page'.

Figura 4. Buscador de Taylor & Francis

Fuente: Rosero (2020)

1.1.5. Research Gate

ResearchGate es la mayor red social para científicos e investigadores. Fue creada en 2008 con el objetivo de fabricar un espacio cuyos miembros pudieran encontrar a otros investigadores de su mismo campo o afines a sus ideas, y lograr incentivar la comunicación, el intercambio y la colaboración científica entre ellos. En 2013 contaba con unos tres millones de usuarios, cifra la cual quedó atrás tras los últimos balances de 2017 en los que contaba con más de 13 millones de usuarios. En 2018 contaba con más de 70 millones de documentos en líneas siendo un gran repositorio web de documentación de calidad, a nivel mundial (Gómez, 2018).

Los objetivos de Research Gate se presentan en el siguiente organigrama:

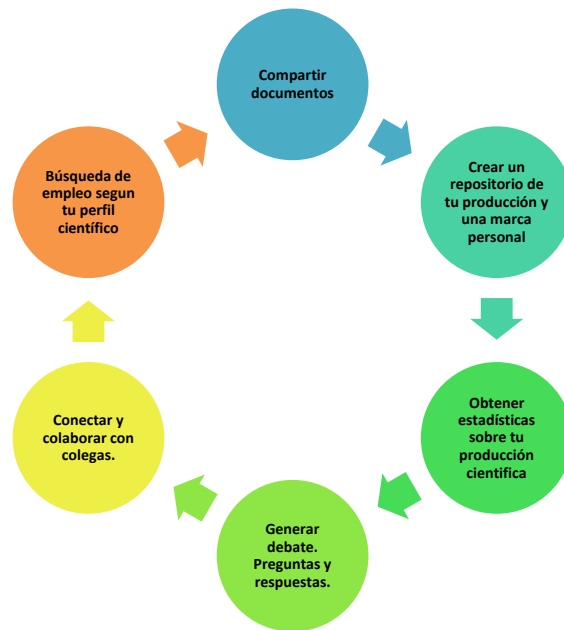


Figura 5. Objetivos de ResearchGate

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

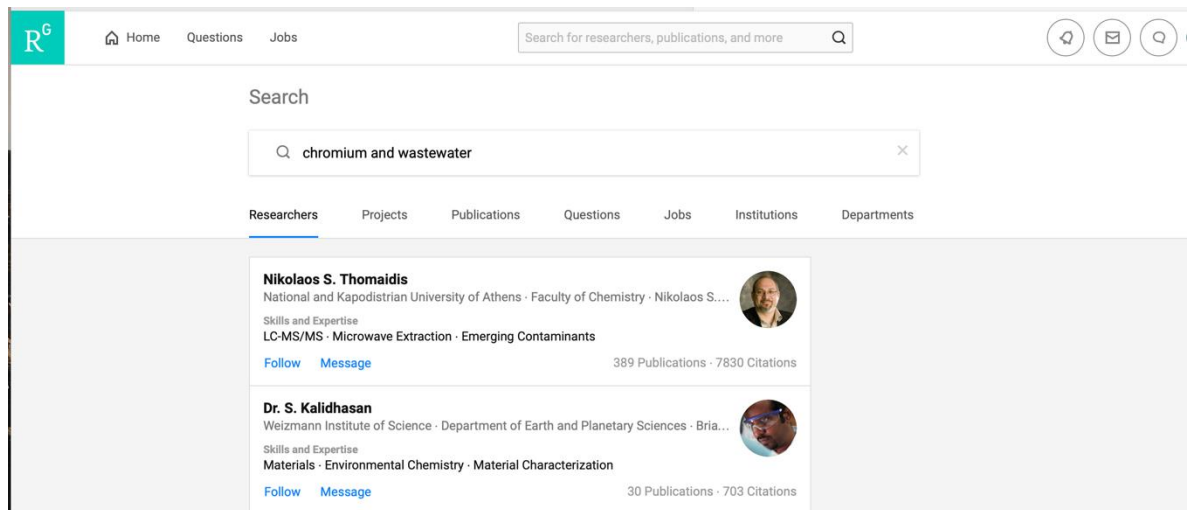


Figura 6. Buscador de ResearchGate

Fuente: Rosero (2020)



1.2. Proceso de selección de artículos científicos

Se trabajó mediante la técnica de exclusión, debido a que el presente trabajo de investigación requiere que los artículos recopilados estén entre los últimos 5 años.

Por tal razón la fecha de publicación de los artículos será en primera instancia un parámetro de clasificación notorio. Se trabajó con bases de datos confiables como: Google Académico, Scopus, ScienceDirect, Taylor & Francis y ResearchGate.

Así también se utilizaron palabras claves y filtros como: idioma, búsqueda avanzada y operadores booleanos.

1.2.1. Búsqueda

Se realizó una búsqueda exhaustiva mediante el uso de palabras claves y operadores booleanos como AND, OR y NOT, que permiten de alguna manera facilitar la búsqueda dentro de bases de datos aclarando que no existe distinción entre mayúsculas y minúsculas al utilizarlos. Conjunto con el uso de la búsqueda avanzada se llegó a filtrar la mayor cantidad de artículos, quedando así, los artículos con la temática buscada.

Los operadores booleanos antes mencionados permitieron afinar los resultados en la búsqueda dentro de las distintas bases de datos, seleccionando así los artículos científicos con las características que se necesitaban.

El uso de AND es para buscar registros que tienen todos los términos separados por el operador, OR para buscar registros que tienen cualquiera de los términos separados por el operador y NOT para excluir registros que tengan ciertas palabras de su búsqueda (Clarivate, 2020).

*Tabla 1. Ejemplo de trabajo con operadores booleanos usados en la revisión bibliográfica*

Los operadores booleanos		
AND	OR	NOT
Ocurrencia y Cromo hexavalente	Tratamientos convencionales o no convencionales	Ocurrencia más no frecuencia
Recolecta documentos que contengan ambos términos.	Recolecta documentos que contengan uno de los dos términos o ambos. Búsqueda más extensa.	Recolecta todos los documentos que contengan el primer término más no el segundo. Búsqueda limitada.

Fuente: Rosero (2020)

1.2.2. Palabras Claves

Las palabras claves utilizadas fueron seleccionadas en base a una búsqueda leve con respecto a la cantidad de estudios existentes en los últimos 5 años y a los objetivos planteados en el presente trabajo. Por tal razón, se trabajó, en paquetes con respecto a cada capítulo pudiendo facilitar la búsqueda por sección y la selección de palabras clave. En la Tabla 2, se presentan las palabras clave seleccionadas en cada paquete.



Tabla 2. Palabras clave utilizadas por paquete (capítulo).

Paquete 1	Paquete 2	Paquete 3
Riesgos al ambiente y al ser humano del cromo	Ocurrencia en aguas superficiales, potables e industriales	Propuestas de remoción del cromo en el agua
<ul style="list-style-type: none"> • Cromo • Cr (VI) • toxicidad • afección a la salud • enfermedades causantes • normativas vigentes • rangos permisibles 	<ul style="list-style-type: none"> • cromo hexavalente • ocurrencia • aguas superficiales • aguas potables • aguas industriales • concentración • especies 	<ul style="list-style-type: none"> • remoción cromo • Cr (VI) • tratamientos para la reducción de cromo • tecnologías de remoción

Fuente: Rosero (2020)

La selección de palabras clave resultó de gran ayuda para lograr delimitar los artículos que se seleccionaron al realizar la revisión bibliográfica. Se realizó en bases de datos y buscadores confiables como ya se ha mencionado. Al aplicar palabras clave, operadores booleanos y búsqueda avanzada se descartaron artículos que no tenían ninguna similitud con la temática que se necesitaba, además, se descartaron los documentos que no estaban en inglés o español, y los que no cumplían con el rango establecido de publicación (2015 en adelante).

1.2.3. Selección de artículos

Al aplicar un correcto proceso de selección como se mencionó en los literales anteriores, a continuación, se presenta la cantidad de artículos encontrados en cada una de las bases de datos antes y después de la aplicación de filtros, especificando así de que capítulo y que base de datos se trata.

En el paquete 1, las palabras claves utilizadas fueron: cromo, Cr (VI), toxicidad, afección a la salud, enfermedades causantes, normativas vigentes, rangos permisibles. En su mayoría los artículos hallados fueron en inglés. En los buscadores Science Direct, Research Gate,

Taylor & Francis, Scielo y Google Académico se encontraron : 250, 210, 60, 19 y 8 480 artículos respectivamente. En este último no solo existían artículos científicos sino también libros, capítulos de libros, revistas. Después del escrutinio final se obtuvieron 25 artículos, con los cuales se logro satisfactoriamente la elaboración del capítulo de Riesgos al ambiente y al ser humano del cromo.

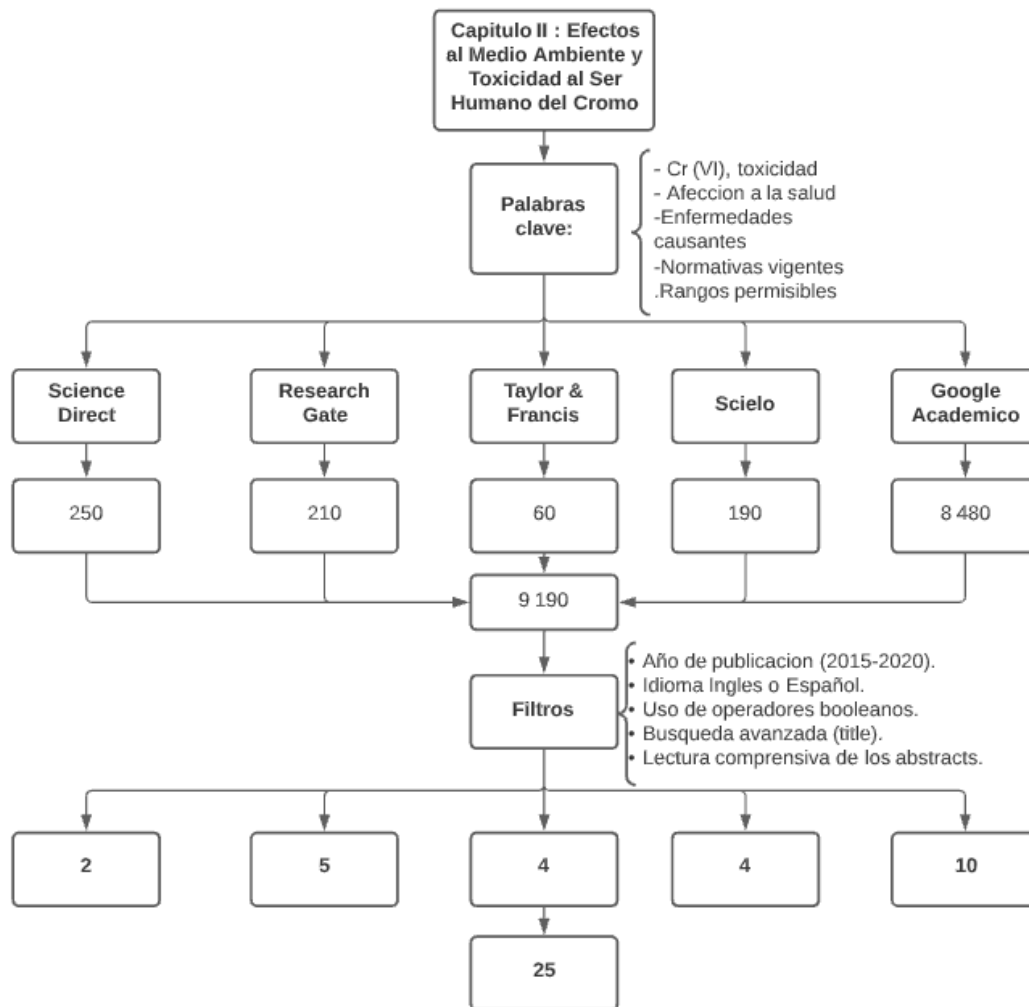


Figura 7. Proceso de selección de búsqueda bibliográfica para el Capítulo II.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

En el paquete 2, las palabras claves utilizadas fueron: cromo hexavalente, ocurrencia, aguas superficiales, agua potable, aguas industriales, concentración, especies. En su mayoría los artículos hallados fueron en inglés. En los buscadores Science Direct, Research Gate, Taylor

& Francis, Scielo y Google Académico se encontraron : 247, 10, 85, 265 y 240 000 artículos respectivamente. En este último no solo existían artículos científicos sino también libros, capítulos de libros, revistas. Después del escrutinio final se obtuvieron 42 artículos, con los cuales se logró satisfactoriamente la elaboración del capítulo de Ocurrencia en aguas superficiales, potables e industriales.

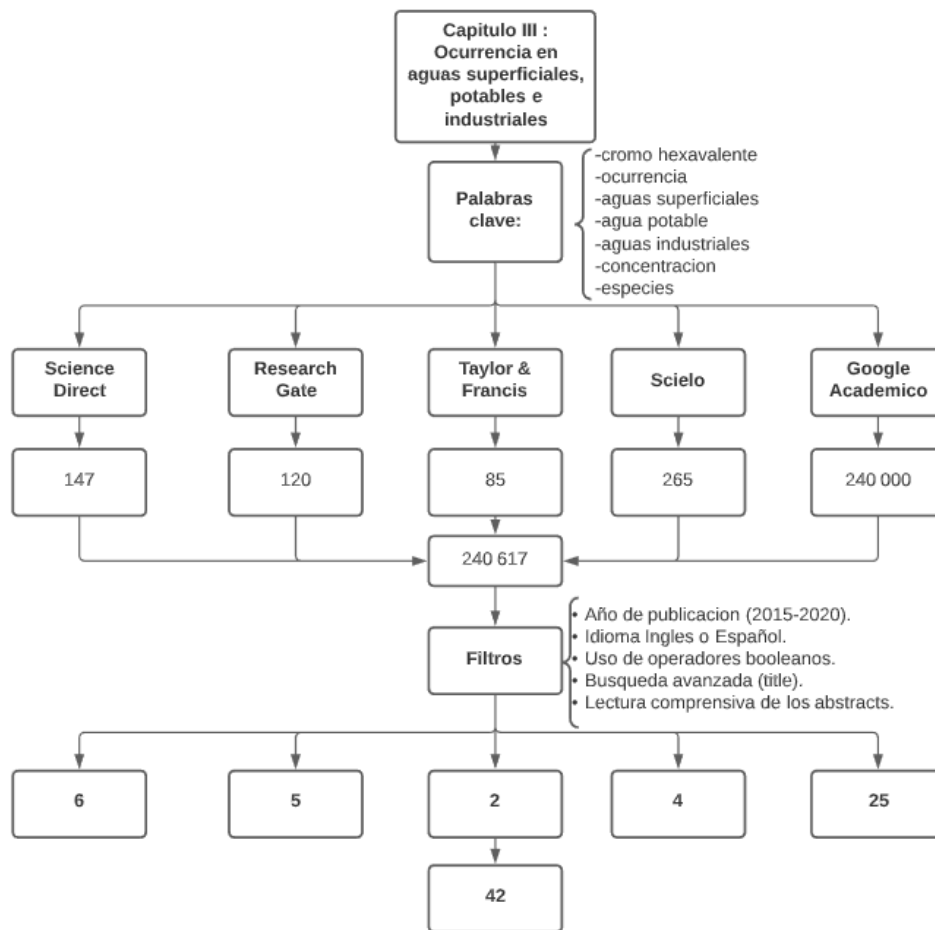


Figura 8. Proceso de selección de búsqueda bibliográfica para el Capítulo III.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

En el paquete 3, las palabras claves utilizadas fueron: Remoción de cromo, Cr (VI), tratamientos para la reducción de cromo, tecnologías de remoción. En su mayoría los artículos hallados fueron en inglés debido a que la mayoría de publicaciones científicas se dan en ese idioma. En los buscadores Science Direct, Research Gate, Taylor & Francis,

Scielo y Google Académico se encontraron : 241, 150, 129, 44 y 5 570 artículos respectivamente. En este último no solo existían artículos científicos sino también libros, capítulos de libros, revistas. Después del escrutinio final se obtuvieron 25 artículos, con los cuales se logró satisfactoriamente la elaboración del capítulo de Propuestas de remoción de cromo en el agua.

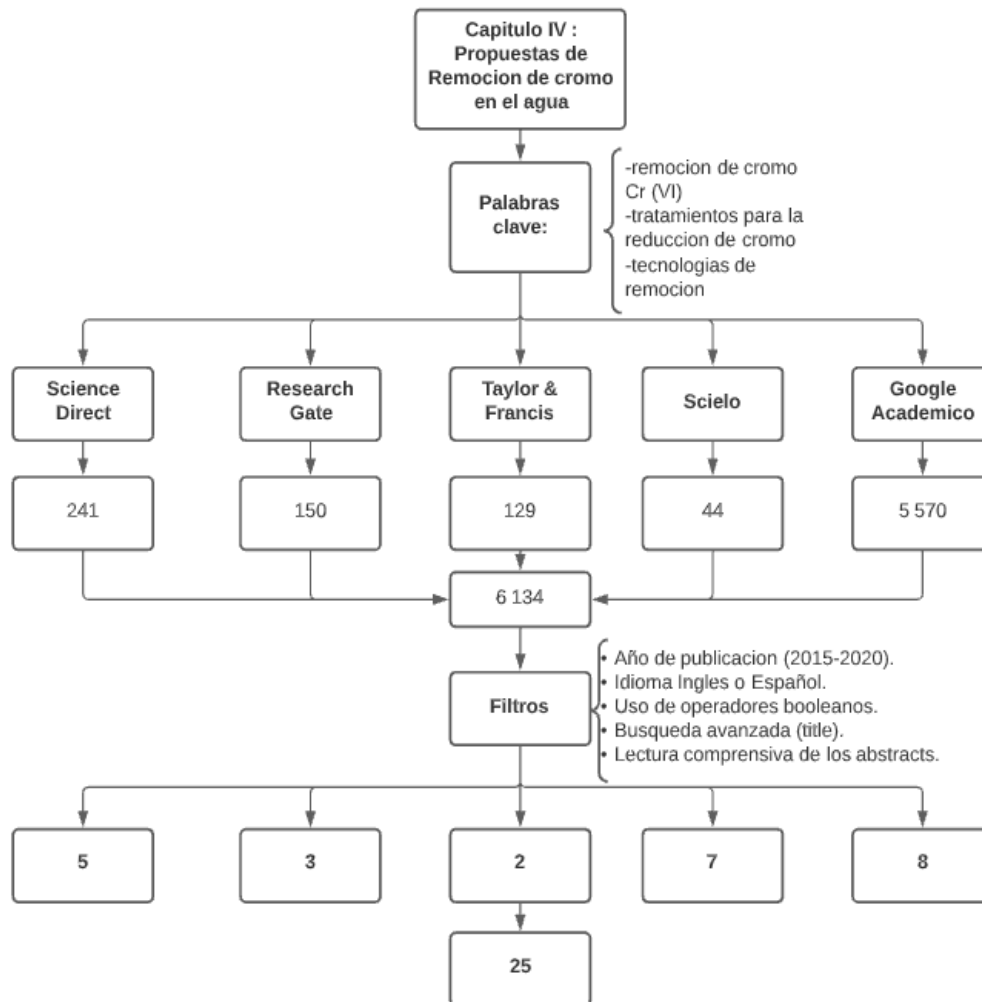


Figura 9. Proceso de selección de búsqueda bibliográfica para el Capítulo IV.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)



Al terminar la revisión de cada uno de los artículos para los distintos paquetes o capítulos, se logró determinar que en la base de datos en la que se encontró mayor cantidad de información fue en Google Académico, razón muy lógica, debido a que es un gran repositorio de no solo artículos científicos, sino también, de revistas, libros y capítulos de libros. Por otra parte, en Taylor & Francis, se encontró menor cantidad de información. Corroborando que casi todos los artículos e investigaciones están en inglés y que existen excelentes bases de datos y revistas, pero requieren suscripción de pago.

Además, el uso de la función búsqueda avanzada en bases de datos científicas resultó indispensable, porque en conjunto con los operadores booleanos, la lectura comprensiva, y el uso de otros filtros como title, direccionó de una manera correcta esta investigación bibliográfica, obteniendo calidad, fiabilidad y veracidad en la información recopilada.

CAPITULO II

Efectos al medio ambiente y toxicidad al ser humano del cromo

2. EFECTOS AL MEDIO AMBIENTE Y TOXICIDAD AL SER HUMANO DEL CROMO

En la actualidad, el planeta se encuentra afrontando una serie de problemas ecológicos muchos de ellos, debidos a la contaminación ambiental (Alahabadi & Malvandi, 2018). Es decir, la alteración de los ecosistemas y sus elementos, suelo, recursos hídricos y aire por metales tóxicos y metaloides, pueden causar una severa problemática que compromete la seguridad alimentaria y la salud pública a nivel local y mundial (Jiang, 2018). Los metales como el Cromo (Cr), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), entre otros, permanecen y se acumulan en el ambiente y en los distintos organismos vivos, provocando toxicidad, bioacumulación, alteraciones bioquímicas o mutagénesis en plantas y animales, bien sea como iones o bajo la forma de compuestos órgano metálico, por largos períodos de tiempo (Quispe et al., 2019).

Si bien el cromo, se encuentra presente en la naturaleza en concentraciones muy bajas y es requerido por el organismo y por los seres humanos, en cantidades muy pequeñas, el cromo



de origen antropogénico desbalancea este equilibrio generando un peligro para el ambiente y para la salud humana, lo que suele ocasionar serias complicaciones a los seres vivos (Anastopoulos & Kyzas, 2015). De hecho, después del plomo, el cromo es el segundo metal con mayor presencia en los cuerpos de agua contaminados. El incremento de las actividades mineras e industriales propicia la contaminación del ambiente con cromo. Por ejemplo, el cromo es utilizado en el revestimiento de metales (cromados), bien sea para fines estéticos, decoración, y una gran variedad de procesos industriales, entre otros, el agua usada en esta actividad resulta contaminada de cromo (Reyes et al., 2016). La toxicidad del cromo depende del estado de oxidación y concentración en que se halla, siendo de especial importancia la eliminación de cromo hexavalente presente en los sistemas acuosos (Revelo et al., 2015).

Todo lo hasta ahora expuesto, conlleva a pensar que la contaminación del ambiente se considera como uno de los más importantes problemas que afectan a la sociedad del siglo XXI debido al daño ocasionado a la flora, fauna y las alteraciones producidas en distintos ecosistemas por la presencia de este metal. La pérdida de calidad del aire, del recurso hídrico y de suelos disponibles para actividades agrícolas se ha incrementado exponencialmente. La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios. Se hace evidente una crisis de este recurso para los próximos años, lo que podría complicar el cumplimiento de uno de los objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de Naciones Unidas (Reyes et al., 2016).

Con base en esto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y algunas autoridades ambientales, han establecido niveles de riesgo en función de la concentración de metales en aguas de consumo humano y alimentos. Los mapas de algunas regiones del mundo muestran un importante crecimiento en la concentración por encima de los límites establecidos, que las clasifica como de alto riesgo (Arnous & Hassan, 2015), lo que lleva a considerar la gran relevancia que tiene conocer las especies químicas de los elementos para comprender las reacciones químicas y bioquímicas en las que intervienen, y por tanto, obtener información relativa al carácter esencial y tóxico de los elementos químicos.

En este capítulo, se van a explicar los distintos riesgos que las especies de cromo causan en el ambiente y en el organismo humano, con base en los datos obtenidos de la revisión de un conjunto de artículos científicos inherentes al tema, como se presenta a continuación.



2.1. Riesgos a la salud y la vida por exposición al cromo

Según lo expone, (Arias, 2019), las personas pueden estar expuestas al cromo ya sea al comerlo, beberlo, respirarlo inclusive a través del contacto con la piel directamente con el cromo o con compuestos que lo contengan. Por otra parte, la exposición al Cr (VI) es usual en los ambientes de trabajo en los que se usa este compuesto. Al entrar en el organismo, el cromo es repartido a la médula ósea y al resto de los órganos del cuerpo. El compuesto que más fácilmente se absorbe es el Cr (VI), ya que es tomado por los eritrocitos e integrado a otras células por el sistema transportador de sulfatos (Loja & Ocaña, 2016). Es decir, el Cr (VI) se reduce en Cr (III) intracelularmente en las mitocondrias y el núcleo, reductores intracelulares que lo degradan en el citoplasma. Esta reducción produce intermediarios reactivos como Cr (V), Cr (IV) y Cr (III), así como radicales libres hidroxilo y oxígeno; estas formas reactivas del cromo son capaz de alterar el ADN. El cromo se elimina por vía renal en un 60 % y en menor grado por las heces (vía biliar), cabello, uñas, leche y sudor. En la orina lo encontramos como Cr (III) formando un complejo con el glutatión, pues el Cr (VI) es reducido en gran parte a Cr (III) (Rodríguez, 2017).

El Cr (III) es poco soluble en el agua y poco tóxico. La falta de Cr (III) en los humanos, puede causar problemas cardíacos, trastornos metabólicos y diabetes; sin embargo, el Cr (III) a concentraciones altas puede causar efectos sobre la salud como erupciones cutáneas y representan un gran riesgo para la salud de animales y humanos, además, es probable que produzca efectos genotóxicos en el ADN en el núcleo celular (Alarcón et al., 2014; Arias, 2019; Islam et al., 2016; Londoño et al., 2016; Rivera et al., 2015; Tirado, 2015).

Si bien se debe tener en cuenta al Cr (III) y sus riesgos, sin duda el Cr (VI) simboliza un mayor riesgo pues es 100 veces más tóxico y 1000 veces más mutagénico que la forma trivalente (Reyes et al., 2016).

El Cr (VI) resulta bastante soluble en el agua y tóxico debido principalmente a sus propiedades oxidantes; penetra rápidamente a las células provocando alteraciones potencialmente cancerígenas en el ADN. El cromo hexavalente Cr (VI), puede ocasionar en los seres humanos efectos adversos, que pueden presentarse a corto o a largo plazo, siendo



el tracto respiratorio el órgano principalmente afectado luego de la exposición al mismo. El Cr (VI), puede ocasionar cáncer en el pulmón, irritación o daños en la piel, ojos, nariz y garganta. En la actualidad, el Cr (VI) es considerado un contaminante importante en distintos países de todo el mundo (Millan, 2018; Tejada et al., 2017).

La Agencia de Sustancias Tóxicas y de registro de enfermedades de EE.UU. relaciona las siguientes enfermedades con la exposición de Cr (VI) (ATSDR, 2019):

- La respiración de niveles altos de Cr (VI) puede causar irritación del revestimiento del interior de la nariz, secreción nasal, y problemas para respirar (asma, tos, falta de aliento, respiración jadeante).
- La ingestión puede producir malestar estomacal, úlceras, convulsiones, daño del hígado, riñón, y puede aún causar la muerte.
- El contacto con la piel de ciertos compuestos de Cr (VI) puede causar ulceración de la piel.
- En animales de laboratorio expuestos al Cr (VI) también se ha observado daño en los espermatozoides y del sistema reproductivo del macho.

Además, se ha hallado que el Cr (VI) presenta una gran mutagenidad en ensayos in-vitro empleando bacterias, levaduras y células humanas (Barrera, 2014). La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC por sus siglas en inglés) ha determinado que los compuestos de Cr (VI) son carcinogénicos en seres humanos. En trabajadores, la inhalación de Cr (VI) ha causado cáncer del pulmón. En seres humanos expuestos al Cr (VI) en el agua potable se ha observado un aumento de tumores del estómago (Murgueitio et al., 2015).

Por estas razones está clasificado como carcinógeno por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (USEPA) y la Agencia Internacional para la Investigación de Cáncer (Caviedes et al., 2015; Islam et al., 2016).

Sintetizando lo hasta ahora expuesto, el cromo dependiendo de su nivel de oxidación pueden ser beneficiosos o altamente perjudiciales para el organismo humano, por lo que los ambientes de trabajo deben buscar la forma de evitar la exposición de los trabajadores al cromo, ya que los daños que el mismo ocasiona pueden alterar el funcionamiento de diversos órganos, generando daños que en muchos casos pueden llegar a ser inalterable e incluso



ocasionar la muerte. Esto considerando como lo exponen algunos autores que en el caso del Cr (VI), entre el 1 al 3 % de la población general presenta alergia al mismo (Tejada et al., 2017). Esto debido a que este tipo de cromo tiene dos características que explican el grado de toxicidad. La primera de ellas, las membranas celulares son permeables al Cr (VI), pero no al Cr (III) y en la segunda característica el Cr (VI) se reduce a Cr (III) en el interior de las células, tanto de las mitocondrias como en el núcleo (Tirado, 2015).

Debido a los daños a la salud en específico que causa el Cr (VI), la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés), la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés), la Administración de Drogas y Alimentos (FDA, por sus siglas en inglés), la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH, por sus siglas en inglés) han desarrollado reglamentos para su regulación (Glorias & Barrera, 2014). Según la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) (Loja & Ocaña, 2016), el valor límite de exposición permisible de cromo hexavalente por día debe ser $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Hernández & Lacayo, 2020).

2.2. Normativas vigentes para la regulación del cromo

Preservar la salud de los trabajadores es una tarea indispensable de cualquier empresa, pues los efectos nocivos que la exposición a ciertas sustancias pueda ocasionar a la salud es un riesgo que debe evitarse a toda costa. En este sentido, existen diferentes organismos tanto a nivel internacional como nacional que se han dedicado a la elaboración de regulaciones que se deben considerar antes de exponer la salud a riesgos derivados de ciertos elementos y de actividades laborales particulares. Con respecto a esto, es importante destacar que los efectos a la salud por la exposición a cualquier sustancia peligrosa van a depender de la dosis, la duración, la manera de exposición, las características y hábitos personales, y si están presentes otras sustancias químicas. Seguidamente se mencionan algunos organismos internacionales y nacionales dedicados a la preservación de la salud pública y de los trabajadores.

2.2.1. Internacionales



Existen un grupo de instituciones que se dedican a promover el cumplimiento de normativas para preservar la salud, dentro de ellas mencionaremos las siguientes:

- ***La Agencia de Protección Ambiental (EPA)***: “es una agencia del gobierno federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente: aire, agua y suelo. Esta agencia identifica los sitios de desechos peligrosos más serios. La EPA luego coloca estos sitios en la Lista de Prioridades Nacionales (NPL) y los designa para limpieza a largo plazo por parte del gobierno federal” (ATSDR, 2019).
- ***La Administración de Drogas y Alimentos (FDA)***: “Se encarga de proteger la salud pública mediante la regulación de los medicamentos de uso humano y veterinario, vacunas y otros productos biológicos, dispositivos médicos, el abastecimiento de alimentos en nuestro país, los cosméticos, los suplementos dietéticos y los productos que emiten radiaciones”(FDA, 2018).
- ***La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR)***: con sede en Atlanta, Georgia, es una agencia de salud pública federal que forma parte del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE. UU. La ATSDR protege a las comunidades de los efectos dañinos para la salud relacionados con la exposición a sustancias peligrosas naturales o elaboradas por el hombre (ATSDR, 2019).
- ***La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA)***: es un organismo nacional de salud pública dedicado a velar la proposición básica de que ningún trabajador debe tener que escoger entre la vida y el empleo. La creación de OSHA, representó un momento histórico de reforma nacional cooperativa. El marco jurídico de OSHA deja en claro que el derecho a un lugar de trabajo seguro es un derecho humano básico. De cara al futuro, OSHA se ha comprometido a proteger a los trabajadores contra las sustancias químicas tóxicas y los peligros mortales para la seguridad en el trabajo, asegurando que los trabajadores vulnerables en empleos de alto riesgo tengan el ingreso a información crítica y a educación sobre peligros laborales y brindando a los empleadores sólida asistencia en materia de cumplimiento con el fin de promover prácticas óptimas que pueden salvar vidas (OSHA, 2020).



2.2.2. Nacionales

En el ámbito nacional, existen en el Ecuador una serie de regulaciones que contemplan la protección a la salud de los trabajadores, como son:

La Constitución de la República del Ecuador 2008, la cual declara en el Art. 22 – 27 *“El derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza”*. De igual forma en el Art 276 – 4, establece que *“recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural”*. El Art. 397, *“establece que en caso de daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Además de la sanción correspondiente, el Estado repetirá contra el operador de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral, en las condiciones y con los procedimientos que la ley establezca. La responsabilidad también recaerá sobre las servidoras o servidores responsables de realizar el control ambiental”*. Para garantizar el derecho individual y colectivo a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, el Estado se compromete a: literal 2 *“Establecer mecanismos efectivos de prevención y control de la contaminación ambiental, de recuperación de espacios naturales degradados y de manejo sustentable de los recursos naturales”*. El Art 411 por su parte *“establece que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua”*(Constitucion de la Republica del Ecuador, 2008).

En tal sentido, el Código Orgánico de Organización Territorial Autónomo Descentralizado (COOTAD), reseña en el Artículo 136 que *“los gobiernos autónomos descentralizados municipales establecerán, en forma progresiva, sistemas de gestión integral de desechos, a fin de eliminar los vertidos contaminantes en ríos, lagos, lagunas, quebradas, esteros o mar, aguas residuales provenientes de redes de alcantarillado, público o privado, así como*



eliminar el vertido en redes de alcantarillado”(Constitución de la Republica del Ecuador, 2008).

La Ley Orgánica de Salud, contempla por su parte en el Art. 3 que *“la salud es el completo estado de bienestar físico, mental y social y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades. Es un derecho humano inalienable, indivisible, irrenunciable e intransigible, cuya protección y garantía es responsabilidad primordial del Estado; y, el resultado de un proceso colectivo de interacción donde Estado, sociedad, familia e individuos convergen para la construcción de ambientes, entornos y estilos de vida saludables”*(Constitución de la Republica del Ecuador, 2008).

Dentro de las responsabilidades del Ministerio de Salud Pública, la mencionada ley refiere en el Art. 6, inciso 13 *“Regular, vigilar y tomar las medidas destinadas a proteger la salud humana ante los riesgos y daños que pueden provocar las condiciones del ambiente, y en el inciso 14 Regular, vigilar y controlar la aplicación de las normas de bioseguridad, en coordinación con otros organismos competentes, todo esto con la intención de regular y vigilar las acciones destinadas a eliminar y controlar la proliferación de fauna nociva para la salud humana”*(Constitución de la Republica del Ecuador, 2008).

La Ley de Gestión Ambiental establece en su Artículo 40 que *“toda persona natural o jurídica que, en el curso de sus actividades empresariales o industriales estableciere que las mismas pueden producir o están produciendo daños ambientales a los ecosistemas, está obligada a informar sobre ello al Ministerio del ramo o a las instituciones del régimen seccional autónomo”*. La información se presentará a la brevedad posible y las autoridades competentes deberán adoptar las medidas necesarias para solucionar los problemas detectados. En caso de incumplimiento de la presente disposición, el infractor será sancionado con una multa de veinte a doscientos salarios mínimos vitales generales. Igualmente establece esta Ley en su Art. 41 norma que, *“con el fin de proteger los derechos ambientales individuales o colectivos, concédase acción pública a las personas naturales, jurídicas o grupo humano para denunciar la violación de las normas de medio ambiente, sin perjuicio de la acción de amparo constitucional previsto en la Constitución Política de la República”*(Constitución de la Republica del Ecuador, 2008).



La Norma de Calidad Ambiental y de descarga de Efluentes de fecha 04-nov-2015, en el Art. 1, del Objeto de la misma, plantea que *“el objetivo principal de la presente norma es proteger la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar los usos asignados, la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general, por lo tanto, las acciones tendientes a preservar, conservar o recuperar la calidad del recurso agua deberán realizarse en los términos de la presente Norma”*. Asimismo, en el Art. 2, denominado Definiciones, el numeral 2.47 define Materiales Pesados, *“como los elementos con densidad relativa mayor de 4 o 5, localizados en la tabla periódica con número atómico 22 a 34 y 40 a 52, así como los de la serie de los lantánidos y los actínidos”*. De igual forma, esta Norma plantea en el Art. 4 referido al Desarrollo, *“las normas generales de criterios de calidad para los usos de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas y de estuarios”*. En esta norma se presentan los límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico, que únicamente requieren desinfección (Constitución de la Republica del Ecuador, 2008). Los mismos se presentan en una Tabla como la siguiente:



Tabla 3. Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección.

Parámetros	Expresado Como	Unidad	Límite Máximo Permissible
Aceites y Grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0.3
Aluminio total	Al	mg/l	0,1
Amoniaco	N-amoniacal	mg/l	1,0
Arsénico (total)	As	mg/l	0,05
Bario	Ba	mg/l	1,0
Boro (total)	B	mg/l	0,75
Cadmio	Cd	mg/l	0,001
Cianuro (total)	CN*	mg/l	0,01
Cobalto	Co	mg/l	0,2
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Color	color real	Unidades de color	20
Coliformes Totales	nmp/100 mi		50*
Cloruros	Cl*	mg/l	250
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,002
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	2
Dureza	CaCO ₃	mg/l	500
Estaño	Sn	mg/l	2,0
Fluoruros	F	mg/l	Menor a 1,4
Hierro (total)	Fe	mg/l	0,3
Litio	Li	mg/l	2,5
Manganeso (total)	Mn	mg/l	0,1
Materia Flotante			Ausencia
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,001
Níquel	Ni	mg/l	0,025
Nitrato	N-Nitrato	mg/l	10,0
Nitrito	N-Nitrito	mg/l	1,0
Olor y sabor			Ausencia
Oxígeno disuelto	O.D	mg/l	No menor del 80% del oxígeno de saturación y no menor a 6 mg/l

Fuente: Tomado del TULAS o TULSMA. Libro VI. Anexo 1

El reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y mejoramiento del Medio Ambiente del Trabajo presenta en su Ámbito de Aplicación lo siguiente: Art. 1. Las disposiciones del presente Reglamento se aplicarán a toda actividad laboral y en todo centro de trabajo, teniendo como objetivo la prevención, disminución o eliminación de los riesgos del trabajo



y el mejoramiento del medio ambiente de trabajo (Constitución de la Republica del Ecuador, 2008).

De igual forma destaca este reglamento, la obligatoriedad que tiene el empleador de (a) Suministrar a sus trabajadores los medios de uso obligatorios para protegerles de los riesgos profesionales inherentes al trabajo que desempeñan; (b) Proporcionar a sus trabajadores los accesorios necesarios para la correcta conservación de los medios de protección personal, o disponer de un servicio encargado de la mencionada conservación y (c) Renovar oportunamente los medios de protección personal, o sus componentes, de acuerdo con sus respectivas características y necesidades (Constitución de la Republica del Ecuador, 2008).

Todo lo hasta ahora expuesto constituye un marco legal general en donde se precisa la importancia de la salud para los trabajadores y de la preservación de la misma por parte de los agentes contratantes.

2.3. Regulación del Cromo

Con respecto a los niveles de afectación que el cromo en sus distintas especies presenta para el ambiente y los seres humanos, se procedió a hacer un análisis de las distintas normativas previamente descritas, luego de lo cual se sintetizó la misma en la Tabla 2, que resume y permite compararlas.

Sin embargo, antes de entrar en materia de descripción sobre el elemento cromo, es importante conocer algunos términos que son inherentes al tema abordado y que es necesario identificar bien antes de proceder a presentar la información sobre la cual se discutirá. Así tenemos lo siguiente:

El límite de exposición permisible (PEL): es un límite legal en los Estados Unidos para la exposición de un empleado a una sustancia química o agente físico. Los PEL son establecidos por la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA). En las regulaciones de OSHA, los PEL son límites de exposición a sustancias peligrosas a las que se hace referencia en CFR 29 1910.1000 TABLA Z-1; Z-2 y Z-3 (Sustancias tóxicas y peligrosas) (NIOSH, 2019).



El *valor límite de umbral (TLV)*: es un término reservado de la Conferencia Estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales. A menos que un movimiento estatal o federal adopte un TLV químico peligroso, no es un requisito reglamentario sino una pauta recomendada. El TLV se basa en el consenso del grupo que resulta en una recomendación de cuáles deberían ser los límites superiores de exposición para una sustancia peligrosa (NIOSH, 2019).

El *límite de exposición recomendado (REL)*: es un término reservado del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH). REL no es un requisito reglamentario, sino una pauta recomendada para los límites superiores de exposición a sustancias peligrosas. NIOSH recomienda a OSHA que adopte en la regulación el REL recomendado como el "nuevo" límite de exposición permisible que restará, agregará o actualizará un PEL existente. NIOSH se rige por el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades, mientras que OSHA es una oficina dentro del Departamento de Trabajo (NIOSH, 2019).

La EPA, ha establecido un nivel de contaminación máximo de 0,1 mg/L para la cantidad total de cromo en el agua potable. Actualmente la EPA solicita monitoreo voluntario para cromo hexavalente por parte de las municipalidades. Sin embargo, se está revisando los efectos sobre la salud del cromo hexavalente y puede que establezca niveles límites en el futuro (ATSDR, 2019).

Por su parte, la *Administración de Drogas y Alimentos (FDA)*, ha determinado que los niveles de cromo en el agua en botella no deben exceder 0,1 mg/L (FDA, 2018), tal como se observa en la Tabla 2 que sigue a continuación.



Tabla 4. Sinopsis comparativa sobre los rangos permisibles del cromo en Agua Potable.

Norma revisada	Concentración máxima Cr Total, mg/L	Concentración máxima Cr (VI), mg/L	Fuente
US EPA (United States Environmental Protection Agency)	0,1	No regulado	(US EPA, 2015)
FDA	0,1	0,05	(ATSDR, 2019)
Resolución 2115 “Calidad de Agua Potable para consumo humano” Colombia	0,05	0,01	Resolución Conjunta 2115 de 2007 Ministerio de Salud y Protección Social
Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria de Medio Ambiente Libro VI, Anexo 1 (TULAS o TULSMA) (Ecuador)	0,1	0,05	(Constitución de la Republica del Ecuador, 2008)

Fuente: Elaborado por Rosero (2020).

2.4. Análisis y Síntesis de la Información

Las distintas agencias hasta ahora revisadas cuyas recomendaciones buscan proteger la salud pública, las mismas no pueden imponerse por ley, sin embargo, tienen mucha receptividad en la salud de algunos países del mundo. En el caso de la investigación que se ha realizado, se ha observado que el cromo es un metal altamente contaminante, puede ocasionar daños severos, de allí que existan regulaciones que tipifican la concentración o el límite máximo permisible en recursos como el agua de consumo humano, como se observa en la Tabla 4. En la misma se aprecia que tanto la US EPA como la FDA, se encuentran concatenadas con el TULSMA que es la normativa ecuatoriana en la cual la concentración límite permitida del Cr (VI) en el agua potable la cual es de 0,05 mg/L, lo que indica que la normativa en el país, se encuentra ajustada a los estándares establecidos tanto por la OMS quien establece el mismo valor, el cual que ha sido prácticamente adoptado por todos los países (89.47 %) a excepción de Estados Unidos quien sólo regula el cromo total hasta 0,1 mg/l posibilitando



que esta concentración se refiera solo a Cr (VI). Añadiendo que en la normativa ecuatoriana el 0,05 de Cr (VI) se usa también para ambientes naturales, y se permiten descargas bien al alcantarillado o al medio ambiente directamente de 0,5 mg/L (Constitución de la Republica del Ecuador, 2008). Sin embargo, la ley de Agua Potable Segura (SDWA) de 1966 requiere que la EPA cada cinco años emita una lista de no más de 30 contaminantes no regulados para ser monitoreados por sistemas públicos de agua (PWS). En la EPA 218.7 recomiendan regular el Cr (VI) en un rango de 0,03 $\mu\text{g/L}$ (US EPA, 2015). Por su parte, Colombia se encuentra por debajo del valor recomendado al permitir un nivel máximo de Cr (VI) de 0,01 mg/l (Trueque, 2015).

CAPITULO III

Ocurrencia del cromo hexavalente en aguas superficiales, potables e industriales.

3. OCURRENCIA DEL CROMO HEXAVALENTE EN AGUAS SUPERFICIALES, POTABLES E INDUSTRIALES

3.1. El cromo

El cromo (Cr) con numero atómico 24, peso molecular 51,1 y su densidad de 7.19 g/cm^3 es un metal duro de color plateado. Es el 7^{mo} elemento más abundante, y el 21^{vo} metal más abundante de la corteza terrestre. El cromo tiene una compleja distribución electrónica y de valencia, debido a su alto potencial para cambiar de estado de oxidación fácilmente (Prado et al., 2016). El cromo tiene varios estados de oxidación (-2 a +6), pero el cromo hexavalente Cr (VI) y el cromo trivalente Cr (III) son los más comunes y estables en el entorno natural (Ashraf et al., 2017).

El cromo es un elemento que, dependiendo de su forma química, puede ser un micronutriente esencial, o puede ser un agente carcinógeno (Murgueitio et al., 2015; Revelo et al., 2015). De hecho el cromo es considerado uno de los 18 contaminantes más peligrosos del aire, 33^{vo} en tóxicos de aire urbano, 188^{vo} en los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs),



y ha sido clasificado en séptimo lugar entre las 20 sustancias más peligrosas por la Agencia de Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (Shahid et al., 2017).

Naturalmente, el Cr se encuentra en todo tipo de componentes ambientales, incluyendo aire, agua y suelo, pero en cantidades mínimas. De hecho, en situaciones en las que apenas existe contaminación, la concentración de Cr (VI) es muy pequeña, producto del proceso de oxidación del Cr (III) (Salazar et al., 2017). En los ecosistemas acuáticos, la presencia de los elementos metálicos se encuentra en muy bajas proporciones, comúnmente se les denomina elementos traza, por la baja concentración en que aparecen (Caviedes et al., 2015). Las especies de Cr (III) pueden ser oxidadas a Cr (VI) por compuestos oxidantes que existen en la tierra, como por ejemplo el dióxido de manganeso; de la misma manera, las especies de Cr (VI) pueden ser reducidas también a Cr (III), esta reducción sólo se producirá en presencia de materia orgánica, hierro soluble Fe (II) o compuestos de sulfuro reducidos; la humedad de la tierra y de los sedimentos en equilibrio con el oxígeno atmosférico proporcionan las condiciones necesarias para que la reducción y la oxidación del cromo ocurran (Hernández & Lacayo, 2020). Como producto mineral primario el Cr (VI) es explotado en forma de cromita (FeCr_2O_4), el cual es el mineral más abundante (Barrera, 2014) que se encuentra principalmente en el sur de África (con el 96 % de las reservas mundiales), Rusia y Filipinas. Fuentes menos comunes incluyen crocoíta (PbCrO_4). La esmeralda y rubí, piedras preciosas, deben su color a las trazas de Cr (VI) (Mohan & Pittman, 2006).

Las características fisicoquímicas del Cr (III) y Cr (VI) son relativamente opuestas, siendo el primero menos móvil, bastante estable y casi no tóxico, mientras que el último es móvil, reactivo y tóxico. La concentración de Cr (VI) en el ambiente puede aumentar al ser liberado por varios efluentes industriales, absorbiéndose en la biosfera y produciendo toxicidad. Por ejemplo, el cromo puede entrar a la atmósfera como resultado de la quema de combustibles fósiles, la producción de acero, la soldadura de acero inoxidable y la fabricación de cromo (Alemu & Gabbiye, 2017; Jobby et al., 2018).

La movilidad del Cr (VI) en el suelo va a depender del pH de éste, ya que en suelo ácido se disuelve y se vuelve disponible, provocando su migración a cuerpos de agua subterránea. Esta movilidad en el suelo va a depender de la capacidad de adsorción y reducción de éste, así como de la composición química, de su porosidad y su uso. Por ejemplo, un suelo rico en



materia orgánica, es capaz de retener a los metales, pero en suelo donde se abusa del uso de fertilizantes a base de amonio o abonos fosfatados, ocasiona que se acidifique, incrementando el ingreso de Cr (VI) al suelo (Barrera, 2014).

El cromo se encuentra en forma de iones en el agua y es un contaminante común de aguas superficiales y subterráneas. Cr (VI) existe principalmente en agua como ácido crómico (H_2CrO_4), cromato de hidrógeno (HCrO_4), cromato (CrO_4^{-2}) y dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$) dependiendo del pH y la concentración total de cromo. La distribución de las especies de Cr (VI) en función del pH, son H_2CrO_4 por debajo de un pH de aproximadamente 1, CrO_4^{-2} por encima de un pH de aproximadamente 6, y HCrO_4 a pH entre 1 y 6, cuando las concentraciones de Cr (VI) son relativamente bajo. El ion dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$) es un dímero de HCrO_4 , que presenta prevalencia cuando la concentración de Cr (VI) supera aproximadamente 1 gr/L. Como se observa, el Cr (VI) es un oxidante extremadamente fuerte y altamente soluble dentro de un amplio rango de pH que lo hace fácilmente biodisponible (Alemu & Gabbiye, 2017).

3.2. La contaminación del agua con metales

La contaminación del agua es causada principalmente por las actividades antropogénicas, este es un fenómeno preocupante, ya que comienza a desarrollarse desde los primeros intentos de industrialización, para transformarse luego en un problema tan habitual como generalizado. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), *“el agua está contaminada cuando su composición o condición se ve alterada de modo que resulte menos apta para todas las funciones y propósitos para los que sería apropiada en su estado natural”*. Esta definición incluye alteración de sus propiedades físicas, químicas y biológicas debido a la descarga de sustancias líquidas, gaseosas o sólidas que puedan producir molestias o conviertan esta agua en un peligro para la salud o bienestar humano. También, se extiende a aquellas actividades que impidan su uso doméstico, comercial, industrial, agrícola o recreativo (Metcalf & Eddy, 1995).

Los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, y por su naturaleza química ser orgánicos o inorgánicos, además dependiendo del efluente se pueden encontrar modificaciones dependiendo del pH, presencia de materia orgánica, grasas, sólidos en



suspensión, material coloidal, trazas de metales tóxicos, contaminantes orgánicos especiales, etc. (Barrera, 2014).

Entre los diversos contaminantes, los metales tóxicos son los que mayor preocupación generan. Pues dependiendo de su concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas. Aunque los términos metal pesado y metal tóxico suelen usarse como sinónimos, la Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) recomienda el segundo dado que no todos los metales pesados son tóxicos, ni todos los otros metales lo son, por lo que resulta más conveniente utilizar el término de metal tóxico (Duffus, 2002; Harte et al., 1991; IUPAC, 2020; OSHA, 2020).

Los metales son emitidos al medio ambiente por fuentes naturales como las erupciones volcánicas y fuentes antropogénicas tales como las descargas de aguas residuales industriales y municipales. Entre los principales metales tóxicos destacan el plomo, cadmio, cromo y mercurio (Leyva et al., 2008). En lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), incluyen a los siguientes elementos: arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo (Londoño et al., 2016).

Si bien, como se mencionó anteriormente, los metales pueden provenir de fuentes naturales, la mayor preocupación es causada por los provenientes de fuentes antropogénicas debido entre otras cosas a su concentración. Se debe considerar que las diversas actividades que usan el agua, influyen en el ciclo hidrológico o modifican las características de las cuencas hidrográficas, generan alteración de la calidad del agua (Escóbar, 2002). Específicamente, la presencia de metales tóxicos en el ambiente acuático causa severos daños a su ecosistema, ocasionando que el proceso de purificación decaiga. Aunado a lo anterior las sales de estos metales tóxicos son solubles en agua y por consecuencia no pueden ser separadas por métodos ordinarios (Medina, 2008).

En diferentes partes del mundo la contaminación por metales ha causado daños inmensurables, tal es el caso de China, donde se estima que unos 600 millones de personas se encuentran en alto riesgo por exposición al agua contaminada (70 % de recurso hídrico del país), y a su vez el 20 % de las tierras cultivables se encuentran afectadas por presencia



de metales tóxicos. Por su parte, en India el uso de aguas contaminadas para irrigación es una actividad que se desarrolla con frecuencia en algunas zonas del país. En América Latina la gran mayoría de países padecen el problema de contaminación por metales tóxicos en agua, en países como México, Argentina, Chile, el Salvador, Nicaragua, Perú y Bolivia, cerca de cuatro millones de 7 personas consumen aguas contaminadas por arsénico y otros metales tóxicos (Reyes et al., 2016). En el caso de Ecuador, la contaminación se origina especialmente de la descarga de aguas residuales de la mayoría de las ciudades, actividad minera artesanal, actividades hidrocarburíferas y agricultura (Barrera, 2014).

Entre los metales tóxicos, el cromo ha ganado interés mundial como contaminante frecuente del agua, debido a su liberación generalizada en el agua por varias actividades antropogénicas, tales como minería y fundición, galvanoplastia, operación de curtido de cuero, conservación de madera, trabajos de acero y proceso de fabricación de pinturas y pigmentos (Ashraf et al., 2017). El cromo se comporta en dos formas diferentes al ponerse en contacto con el ser humano. El Cr (III) es un oligoelemento, indispensable para procesos bioquímicos y fisiológicos necesarios para la vida, específicamente tiene acciones en el metabolismo de la glucosa, el colesterol y los ácidos grasos, además de desempeñar un papel muy importante en diferentes reacciones enzimáticas. El Cr (VI) es un elemento altamente tóxico para el ser humano y está clasificado por la International Agency for Research on Cancer (IARC) en el grupo I (cancerígeno comprobado en humanos) ya que en exposición ocupacional produce cáncer en el sistema respiratorio (Barrera, 2014; Rincón & María, 2018; Soto et al., 2017).

3.3. El cromo en las Aguas Superficiales, Potables e Industriales.

El número de artículos encontrados para estructurar este capítulo fueron 34, hallados en bases de datos como: Scielo, Google Académico, Scopus, Science Direct y Taylor & Francis. De los cuales 19 hablan específicamente de la ocurrencia del cromo en aguas superficiales, potables e industriales. Por continente, se encontraron 10 estudios en Asia, 4 estudios en África, 2 en América y 3 en Europa. En la Tabla 5 se puede ver una recopilación de los resultados.

Tabla 5. Cuadro descriptivo de la Ocurrencia del Cromo en distintos países

Ubicación	Tipo de Agua	Especie	Concentración (ppm)	Fuente
Bahir Dar, Etiopia	Superficial	Cr (tot)	8,420 ± 5,409	(Alemu & Gabbiye, 2017).
Unnao, India	Superficial	Cr (VI)	2 070	(Mani Tripathi & Chaurasia, 2020).
Cyprus, Turquía	Superficial	Cr (VI)	0,026	(Zissimos et al., 2020)
Makati City, Filipinas	Superficial	Cr (VI)	5,98	(Esguerra et al., 2018)
Quingdao, China	Superficial	Cr (tot) Cr (VI)	3 220 ± 6 266 64 ± 94	(Chen et al., 2017)
Shaanxi, China	Superficial	Cr (VI)	0,251	(He & Li, 2020)
Rio Luanshitou		Cr (VI)	0,117 – 0,022	
Rio Sandao				
Rio Coata, Peru	Superficial	Cr (VI)	4,10 - 28,42	(Quispe Yana et al., 2019)
Macizo del Pollino, Italia	Superficial	Cr (tot) Cr (VI)	2,1 – 39,8 11,4 – 36,4	(Paternoster et al., 2020)
Dublín y Cork, Irlanda	Superficial	Cr (VI)	0,00245 – 0,0226	(Jones et al., 2017)
Birjand, Iran	Potable	Cr (tot)	0,0020 – 0,116	(Farokhneshat et al., 2016)



Selangor, Malasia	Potable	Cr (VI)	$1,24 \times 10^{-3}$	(Ahmed & Mokhtar, 2020)
Kuala Lumpur		Cr (VI)	$6,75 \times 10^{-3}$	
Sunway				
Rio Langat		Cr (VI)	8×10^{-3}	
Odisha, India	Potable	Cr (tot)	48,7 – 250,2	(Naz et al., 2016)
		Cr (VI)	21,4 – 115,2	
Tennessee y Carolina, EE.UU.	Potable	Cr (VI)	30	(Russman, 2017)
		Cr (VI)	180	
Grecia	Potable	Cr (VI)	0,01	
Etiopia	Industrial	Cr (VI)	1 300 – 2 500 y 2 500 – 8 000	(Minas et al., 2017).
Korangui, Pakistan	Industrial	Cr (VI)	10,26 y 13,05	(Neelam, 2018)
Sukinda, India	Industrial	Cr (tot)	123,45	(Mohapatra et al., 2020)
Chabahar Bay, Iran	Industrial	Cr (tot)	155 a 300	(Bazzazzadeh et al., 2020)
		Cr (VI)	32,6	
Faisalabad, Pakistan	Industrial	Cr (VI)	21,12	(Mehmood et al., 2019)

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

A continuación, se presenta la información recopilada de distintas fuentes usando como criterio de clasificación el continente en el que fue realizado cada estudio.

Como se observa en la Tabla 5, Asia presenta la mayor cantidad de contaminación dentro de todos los estudios.

Los valores máximos de Cr (VI) en aguas superficiales, potables e industriales fueron de 2 070 (India), 180 (EE.UU.), y 2 500 a 8 000 (Etiopía) y los valores mínimos fueron de 0,00245 (Irlanda), $1,24 \times 10^{-3}$ (Malasia) y 10,26 (Pakistan) ppm.

3.3.1. Aguas Superficiales

Para aguas superficiales, se encontraron 9 estudios distribuidos en los siguientes países: Etiopía, India, Turquía, Filipinas, Perú, Italia, Irlanda y dos en China. La Figura 7 presenta un mapamundi en el cual se señala la ubicación de cada uno de los países donde se realizaron estudios de ocurrencia de cromo en aguas superficiales.

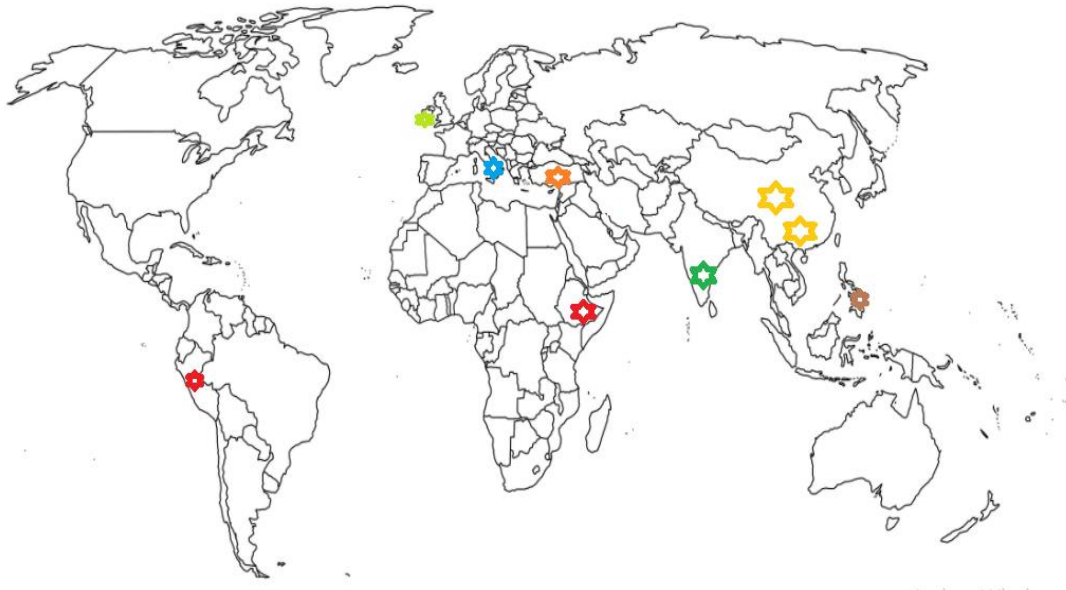


Figura 10. Ubicación de los estudios de ocurrencia de cromo en aguas superficiales en el mapamundi.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

África

Para el continente africano se encontraron dos estudios. El primero tuvo como objetivo determinar la concentración de cromo proveniente de los efluentes de tres plantas de procesos de fabricación de cuero y textiles en la ciudad de Bahir en Etiopía, donde solo una de ellas trata sus aguas residuales. Las muestras fueron tomadas en el agua y orillas del río Abbay en



Etiopía donde se liberan los efluentes. La máxima concentración de cromo total fue encontrada en un punto de descarga de una planta que no trata previamente sus aguas residuales y fue de $8,420 \pm 5,409$ mg/L y $232,465 \pm 219$ mg/kg en agua y sedimento respectivamente (Alemu & Gabbiye, 2017). El segundo estudio determinó el origen y la distribución del cromo hexavalente, Cr (VI) durante cuatro ciclos estacionales. Se investigó mediante un modelo conceptual que incluyó tres sistemas acuíferos en la Isla de Cyprus, la cual está situada en el mar Mediterráneo. Se determinó que, la contaminación con cromo se presenta por la disolución de cromita mineral debido al rodamiento, el valor más alto de Cr (VI) fue de 26 µg/L (Zissimos et al., 2020).

Asia

En el continente asiático se encontraron cuatro estudios. El primero se desarrolló en la zona más profunda del río Pasig ubicado en Guadalupe, Makati City, Filipinas, dónde se encontró descargas provenientes de industria de pintura y curtidos de metales pesados con alta solubilidad como cromo y plomo. La concentración de Cr (VI) fue de $5,9873$ mg/L excediendo el límite permisible por la USEPA de vertido en agua que es de $0,05$ mg/L (Esguerra et al., 2018). El segundo estudio se realizó en uno de los gigantes de la industria a nivel mundial, China. Conocida por ser uno de los principales productores de cromatos. Se estima que tiene una cantidad de escoria de cromo, acumulada durante un lapso de 30 años provenientes de las descargas de las industrias metalúrgicas y químicas de más de 6 millones de toneladas; se calcula que la generación de escorias con cromo anual esta entre 200 000 y 300 000 toneladas. En la investigación, se estudió, la presencia y distribución de cromo a lo largo del río Loushan en sitios adyacentes a la escoria antes mencionada. De acuerdo con los resultados, la superficie del suelo experimentó una severa contaminación por cromo con valores de Cr (tot) y Cr (VI) de $3\,220 \pm 6\,266$ y 64 ± 94 mg/kg, respectivamente. La variedad de distribución espacial del cromo implica que su transporte al agua podría deberse a fugas desde el suelo, la atmosfera e incluso vía hidráulica fluvial (Chen et al., 2017). En el tercer estudio se investigó aguas superficiales, las cuales se vieron afectadas por la descarga de aguas industriales vertidas. El área de estudio fue ubicada en el noroeste de la provincia de Shaanxi, que incluye principalmente los condados de Wuqi, Zhidan, Dingbian y Jingbia. Se investigó en la cuenca del río Luo que incluye a los ríos Luanshitou, Ningsai, Toudao, Erdao,



Sandao y Zhou. La máxima concentración encontrada fue de 0,251 mg/L de Cr (VI) que se detectó en el río Luanshitou; en el río Sandao se encontraron concentraciones de Cr (VI) en un rango que va desde 0,022 hasta 0,117 mg/L (He & Li, 2020). El cuarto estudio determinó que en Unnao distrito de Uttar Pradesh, India existe un alto número de curtidorías las cuales generan una gran cantidad de aguas residuales y sus efluentes contiene gran cantidad de cromo, el cual se infiltra por debajo del suelo y contamina las aguas, creando así la posibilidad de convertirse en un potente carcinógeno. La concentración de Cr (VI) para uno de los sitios (Dharamkata) resultó ser de 2 070 mg/L, el cual tiene una alta eficiencia para contaminar los canales sin revestimiento, lo que provoca la contaminación en aguas superficiales y subterráneas (Mani & Chaurasia, 2020).

América

En caso del continente americano se encontró un estudio que se basó en evaluar el grado de contaminación producido por proyectos mineros en Perú en la cuenca baja del río Coata, la cual es considerada como la arteria fluvial afluente más importante del lago Titicaca. La contaminación fue evaluada en cuerpos de agua, sedimentos y otros componentes de la diversidad biológica. El rango de concentraciones mínimo y máximo hallado fue de 4,10 mg/kg y 28,42 mg/kg de Cr (VI) respectivamente (Quispe et al., 2019).

Europa

Para el continente europeo se encontraron dos estudios, en el primero se determinó la concentración de cromo en el sector norte de Macizo del Pollino (Sur de Italia). Dicha área se caracteriza por la presencia de rocas ofiolíticas formadas por metabasitas, lutitas, calcsuistas y serpentinitas fracturadas. Se hallaron concentraciones elevadas de Cr (VI), superiores a las concentraciones máximas admisibles por la normativa italiana, debido a la liberación de Cr (III) de rocas ofiolíticas al agua y su oxidación al estado hexavalente. El rango fue de 2,1 – 39,8 mg/L de Cr (tot) y 11,4 – 36,4 de Cr (VI) en las muestras tomadas (Paternoster et al., 2020). En el segundo estudio, se investigó que la descarga de aguas residuales como posible fuente puntual de contaminación de las aguas superficiales. La devolución al medio ambiente de aguas residuales tratadas de forma inadecuada es el principal problema de muchos países, incluida Irlanda. Se examinaron las concentraciones

de metales que se encuentran en las plantas de tratamiento de aguas residuales y los efectos del tipo de tratamiento en las concentraciones de metales disueltos en aguas superficiales, motivo por el cual se recolectaron muestras de efluentes de la salida de nueve plantas de tratamiento de aguas residuales en Dublín y Cork, Irlanda; en las cuales mediante pruebas fisicoquímicas se encontró Cr (VI) en un rango de concentración entre 2,45 – 22,60 $\mu\text{g/L}$ (Jones et al., 2017).

Observaciones generales

En el caso de aguas superficiales como se ve en la tabla 5, la región con mayor ocurrencia de cromo fue Asia según los artículos revisados. El 30 % de los artículos se realizaron en Asia y el menor en Europa y América con el 15 %, como vemos en la Figura 11, el mayor grado de contaminación encontrado en las aguas superficiales de Asia, puede deberse a la gran industria que posee y que libera sus aguas residuales en los ríos; estos reflejan concentraciones de 2 070 mg/L de Cr (VI) en Unnao, India como valor máximo. El valor mínimo dentro de los estudios revisados fue de 0,00245 mg/L de Cr (VI) encontrada en Dublín y Cork, Irlanda.

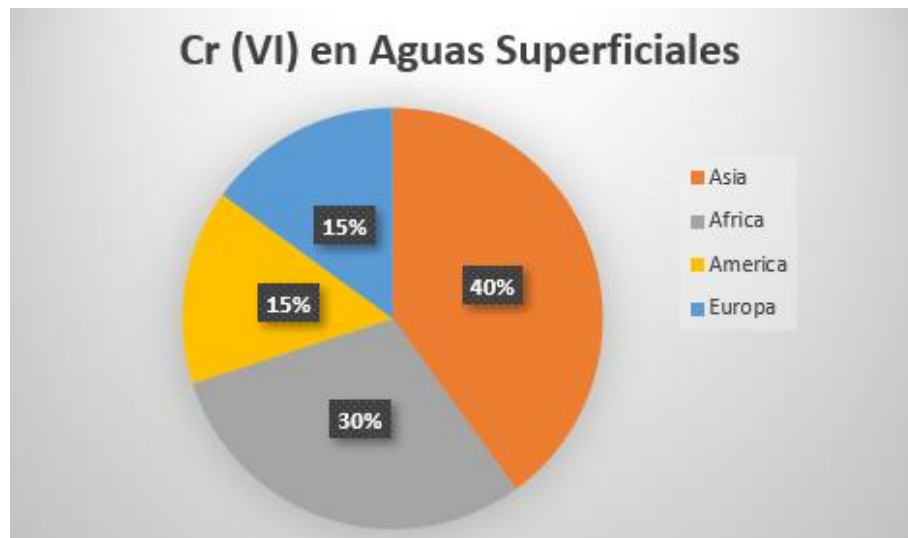


Figura 11. Gráfico Pastel de la Ocurrencia de Cromo (VI) en aguas superficiales en los distintos continentes.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

3.3.2. Agua Potable

Para agua potable se encontraron 5 estudios distribuidos en los siguientes países: Irán, Malasia, India, EE.UU. y Grecia, como se observa en la Figura 12.



Figura 12. Ubicación de los estudios de ocurrencia de cromo en agua potable en el mapamundi.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

África

En el continente africano se encontró un estudio, en el cual se determinó la presencia de cromo en sistemas de distribución de agua potable en la ciudad de Birjand la cual es la capital de la provincia iraní de Khorasan del Sur. La concentración de cromo medida por la Compañía de Agua y Alcantarillado de la provincia de Khorasan Sur medida en pozos, tanques de distribución, red de distribución y en el agua de los embalses, dieron una concentración de cromo total Cr (tot) que osciló entre 2,01 y 116 $\mu\text{g/L}$ con una media de 45 $\mu\text{g/L}$, debiéndose en su mayoría a actividades de la industria como: fugas de aguas residuales industriales, almacenamiento y eliminación inadecuados de desechos industriales. (Farokhnesht et al., 2016).



Asia

En el continente asiático se encontraron dos estudios. El primero tuvo como objetivo determinar el nivel de contaminación que tiene Malasia en las cuatro etapas de la cadena de suministro de agua potable en la cuenca del río Langat, Malasia. El nivel de Cr (VI) en el agua del grifo fue de $1,24 \times 10^{-3}$ mg/L en Kuala Lumpur. De manera similar, se hallaron concentraciones de Cr (VI) de $6,75 \times 10^{-3}$ mg/L en el agua del grifo en Sunway Kuala Lumpur. También se han informado niveles bajos de Cr (VI) ($8 \times 10^{-3} \pm 4 \times 10^{-4}$ mg/L en la cuenca del río Langat. Se han encontrado altas concentraciones de estos metales en el agua del grifo de los hogares, especialmente debido a la contaminación en la tubería de distribución. La alta concentración de cromo se debe a la corrosión en las tuberías de acero (aleación de acero y cromo) del sistema de distribución de agua potable. Además, el período de agua estancada en el sistema de distribución de agua también fue un factor importante para aumentar la concentración de Cr (VI) en el agua de suministro (Ahmed & Mokhtar, 2020). El segundo estudio tuvo como objetivo evaluar la salud humana y riesgo de Cr (VI) y Cr (III) a través de la exposición oral y dérmica de beber agua en muestras de agua subterránea de la cercana Sukinda (mina de cromita) en Odisha, India. Las concentraciones de Cr (tot) y Cr (VI) se encuentran en el rango de 48,7 a 250,2 y 21,4 a 115,2 mg/L respectivamente (Naz et al., 2016).

América

Para el continente americano se encontró un estudio. (Russman, 2017) mencionó que cada año en los EE.UU., las centrales eléctricas de carbón generan más de 100 millones de toneladas de residuos de combustión de carbón (CCR). Derrames notables de CCR en Tennessee y Carolina del Norte llamaron la atención sobre los peligros potenciales del almacenamiento de CCR en embalses superficiales los cuales contribuyen a la contaminación de aguas subterráneas y superficiales vecinas de los ríos: Apalaches, Illinois y Power River. La presencia de Cr (VI) en pozos de agua potable generalmente se atribuye a fuentes antropogénicas, por lo cual surge la inferencia de que los CCR en el embalse tienen fugas y causan la contaminación. Encontrando concentraciones de agua potable superiores a 30 000 ppb y de 180 000 ppb de Cr (VI).

Europa

Para el continente europeo, se encontró un estudio que tuvo como objetivo conocer la exposición al Cr (VI) desde el agua potable en Grecia, enfocándose en áreas en las que predomina el sustrato geológico de minerales ultramáficos. Los resultados indicaron que, aunque las violaciones del límite de regulación actual del cromo en el agua del grifo no son muy comunes, hubieron concentraciones de Cr (VI) superiores a 10 $\mu\text{g/L}$ (Kaprara et al., 2015).

Observaciones generales

En el caso de aguas potables como se ve en la Tabla 5, la región con mayor ocurrencia de cromo fue Asia de acuerdo a los artículos, estudios revisados y así también tuvo el mayor porcentaje de artículos revisados que fue del 33 %, y con el menor número en América y Europa con el 21 %, como vemos en la Figura 13. El mayor grado de contaminación encontrado en las aguas potables se halló en EE.UU. específicamente en Tennessee y Carolina del Norte debido a la presencia de CCR en embalses superficiales con 180 000 ppb de Cr (VI) lo cual equivale a 180 mg/L; la concentración más baja se encontró en Kuala Lumpur, Malasia y fue de $1,24 \times 10^{-3}$ mg/L de Cr (VI).

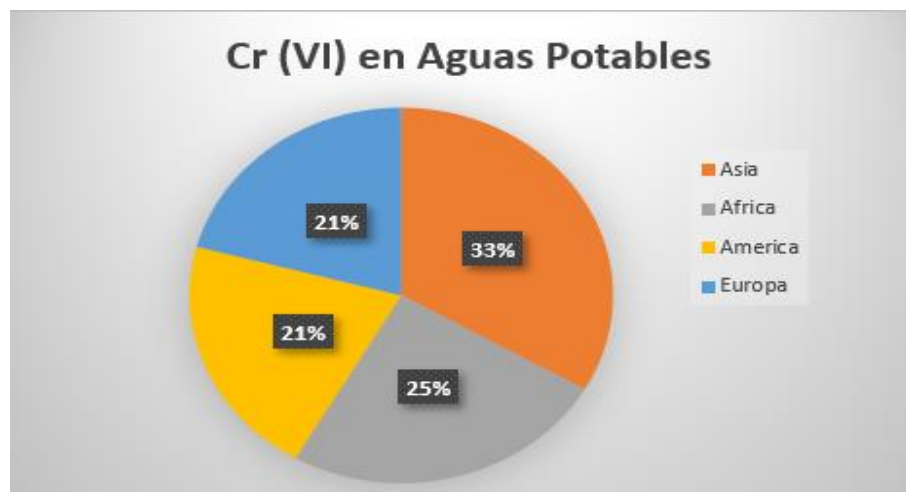


Figura 13. Gráfico Pastel de la Ocurrencia de Cromo (VI) en aguas Potables en los distintos continentes.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

3.3.3. Aguas Industriales

Para aguas industriales se encontraron cinco artículos distribuidos en los siguientes países: Etiopía, India, Irán y dos en Pakistán. La Figura 14 presente un mapamundi en el cual se señala la ubicación de cada uno de los países donde se realizaron estudios de ocurrencia en aguas industriales.

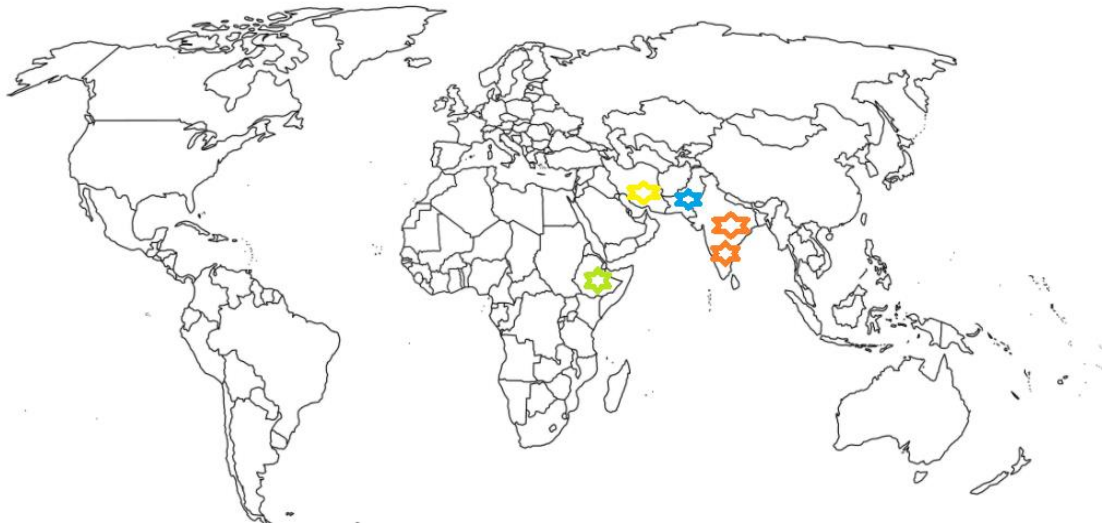


Figura 14. Ubicación de los estudios de ocurrencia de cromo en aguas industriales en el mapamundi.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

África

Para el continente africano se encontró un estudio. Se basó en la presencia de las aguas residuales industriales en Etiopía, las cuales se han convertido en los problemas más vitales debido a la alta tasa de crecimiento y enorme vertido de estas al medio ambiente. Estas industrias al encontrarse en una etapa inicial no pueden permitirse enormes inversiones en equipos de descontaminación, ya que su margen de beneficio es muy pequeño. Por tanto, las aguas residuales del proceso de curtido son una fuente importante en la adición de contaminantes de cromo al ambiente. La concentración de Cr (VI) en las aguas residuales de



curtido varía en Etiopía según estudios de 1 300 a 2 500 y de 2 500 a 8 000 mg/L (Minas et al., 2017).

Asia

En el continente asiático se encontraron cuatro estudios. En el primero (Neelam, 2018) tuvo como objetivo el determinar la calidad de las aguas residuales de Korangi Nala y evaluar la concentración de cromo en el efluente industrial de las curtidorías. Por lo general, las sales de sulfato de cromo (III) se aplican como agente curtiente, casi el 90 % de la industria del curtido utiliza sulfato de cromo básico. Del Cr (tot) aplicado en el proceso de curtido, el 60-70 % se consume realmente, mientras se descarga con el efluente industrial. La concentración de cromo en el agua muestra valores excedidos de 10,26 y 13,05 ppm de Cr (VI), es decir por encima del límite SEQ de 1 mg/L de descarga al alcantarillado en Pakistan. Esto se explica ya que el Cr (III) del curtiente, se transforma en Cr (VI) por oxidación completa, convirtiéndose en la fuente principal de contaminación. El segundo estudio mediante el trabajo de (Mohapatra et al., 2020) permite conocer la descarga estimada de Cr (tot) a escala global, es decir, 30; 896 y 142 toneladas métricas/año en el aire, el suelo y el agua respectivamente. Esto se explica por la alta actividad minera del país, de hecho, en 2007, la India figuraba entre los países más contaminados por Cr en el mundo. India es el país con el cinturón de cromita más grande del mundo el cual está ubicado en Sukinda en el distrito de Jajpur de Odisha. El tercer estudio investigó a las industrias de curtido de cuero, las cuales utilizan sales de cromo. El interés en este estudio reside en que las descargas de agua residual producidas son grandes y tienen una cantidad considerable de materiales nocivos en el medio ambiente. Por ejemplo, el efluente de la curtidoría sin tratar contiene entre 155 y 300 mg/L de cromo total Cr(tot), lo que significa que el cuero absorbe entre el 60 y el 70 % de cromo utilizado en el proceso de curtido. La ciudad de Chabahar Bay, Irán, contiene muchas fábricas de bronceado, que están muy cerca de la ciudad, y de zonas rurales y agrícolas que descargan colectivamente una cantidad considerable de aguas residuales, contaminadas por cromo, en el medio ambiente. El estudio encontró, concentración de 32,6 mg/L de Cr (VI) (Bazzazzadeh et al., 2020). En el cuarto estudio, se determinó que el uso excesivo de cromo en el curtido de cuero, metalurgia, galvanoplastia y otras industrias ha aumentado la concentración de cromo en los recursos hídricos. En Faisalabad centro industrial de Pakistán se halló una

concentración media de Cr (VI) que ha alcanzado un valor de 21,12 mg/L (Mehmood et al., 2019).

Observaciones generales

En el caso de aguas industriales como se ve en la Tabla 5, la región con mayor ocurrencia de cromo fue Asia de acuerdo a los artículos, estudios revisados y así también tuvo el mayor número de artículos encontrados con un 80 % y el menor número de artículos se encontró en África con un 20 %, como se observa en la Figura 15. Al existir un menor control e incorrecto crecimiento al hablar del aspecto económico las mayores concentraciones de cromo son halladas en África específicamente en Etiopía con un rango que va desde 2 500 a 8 000 mg/L de Cr (VI). En Korangui, Pakistan la concentración de Cr (VI) fue de 10,26 y 13,05 mg/L siendo así la mínima concentración en la revisión de los estudios revisados.

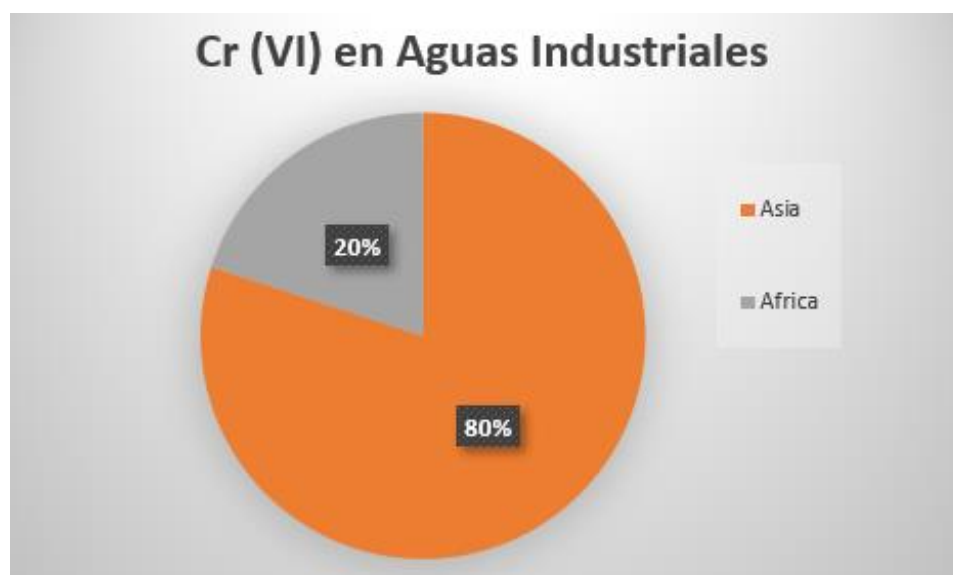


Figura 15. Gráfico Pastel de la Ocurrencia de Cromo (VI) en aguas industriales en los distintos continentes.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)



3.4. Análisis y síntesis de la información

Al realizar la búsqueda respectiva acerca de la ocurrencia del cromo dentro de los tipos de aguas antes mencionados, se observa claramente que la concentración del mismo dependerá de que tan grande sea la industria que este país o región maneje. En algunos casos la concentración de Cr (VI) sobrepasa en gran cantidad los rangos permisibles.

En aguas superficiales, la mayor concentración de Cr (VI), se encontró al sur del continente asiático exactamente en Dharamkata distrito Pradesh, India con 2 070 mg/L; la menor concentración de Cr (VI) se encontró también en el continente europeo, en la Dublin y Cork, Irlanda con 0,00245 mg/L.

En las aguas potables, la mayor concentración de Cr (VI) se encontraron en Odisha, India con 115,2 mg/L siendo 11,5 veces más alto que el límite permitido según los organismos legales estándar; la menor concentración de Cr (VI) se encontró en los suministros de agua potable en la cuenca del río Langat, Malasia en Kuala Lumpur con $1,24 \times 10^{-3}$ mg/L.

Así en aguas industriales, la mayor concentración de Cr (VI) se encontró en el continente Africano exactamente en Etiopía con un rango entre 2 500 a 8 000 mg/L volviéndose uno de los problemas más vitales debido a la alta tasa de crecimiento y enorme vertido de efluentes al medio ambiente, en cambio la menor concentración de Cr (VI) se encontró en uno de los ciudades de Pakistan llamada Korangui Nala con 10,26 mg/L, en la cual el total de exportaciones de cuero de este país lo cubre en un tercio la ciudad antes mencionada.

CAPITULO IV

Propuestas de Remoción del Cromo del Agua

4. REVISIÓN DE MÉTODOS PROPUESTOS PARA REMOCIÓN DEL CROMO DEL AGUA

A lo largo del tiempo, los seres humanos y las actividades que realizan han logrado alterar de forma acelerada el entorno natural, afectando de manera significativa la calidad de las



fuentes hídricas, no solo mediante el vertimiento doméstico, sino por los diferentes procesos industriales que suelen realizar para obtener una mejor economía, lo que lleva en muchos casos a que vierten sus residuos líquidos de manera directa a los cuerpos de agua sin los tratamientos adecuados, generando en la mayoría de los casos elevados niveles de contaminación en los afluentes pues, en estos procesos, se encuentran presentes residuos de materiales pesados como el cromo, el cual es peligroso para la naturaleza y para la salud humana, dónde tiende a generar complicaciones en muchos casos tan graves que pueden ocasionar la muerte.

Esto ha llevado a la ejecución de investigaciones, buscando alternativas adecuadas para la depuración de las aguas residuales industriales que contaminan los cuerpos de agua y que afectan el normal desarrollo del ambiente natural. Para esto, se aplican métodos y técnicas para lograr llevar el agua contaminada a parámetros admisibles, ajustados a las normativas ambientales del país. Sin embargo, obtener la eliminación de los metales del agua es una tarea compleja y dispendiosa, que en la mayoría de los casos suelen generar otros residuos derivados del proceso que se utilice (López et al., 2017).

Con respecto a esto, se puede decir que existen métodos tanto convencionales como no convencionales, utilizados en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Cr (VI). Esto, considerando los niveles de importancia que se ha dado a la remoción de los compuestos tóxicos para el ambiente y la salud; por lo que se han implementado tratamientos eficientes y menos costosos que proporcionan la eliminación de contaminantes inorgánicos de forma más fácil y eficiente (Cuellar, 2015), los cuales se presentan a continuación en la Figura 16, donde se sintetizan las técnicas tanto convencionales como no convencionales que pueden ser utilizadas para la remoción de metales en aguas residuales.

4.1. Técnicas Convencionales de tratamiento para remoción de metales tóxicos en aguas residuales

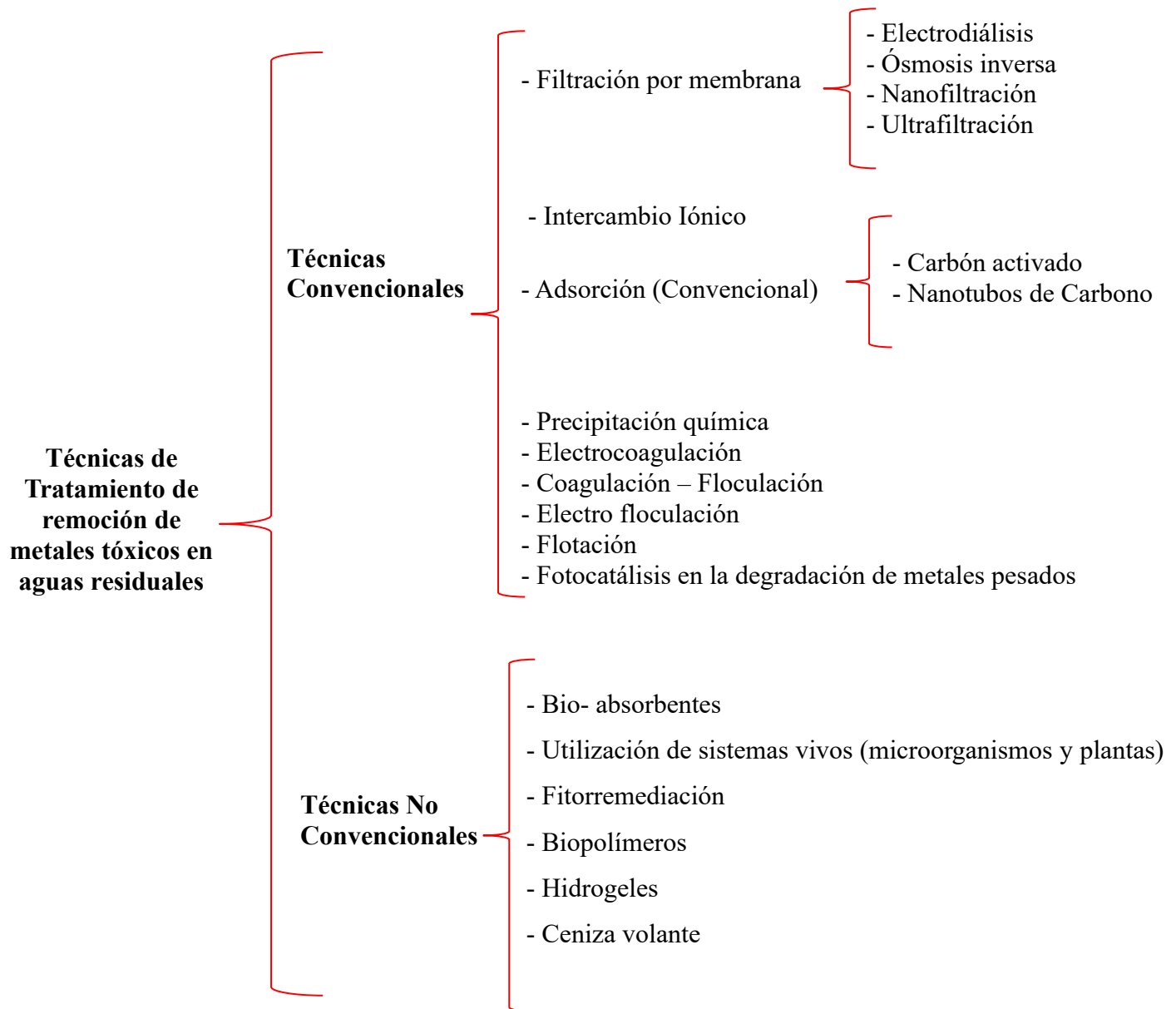


Figura 16. Sinopsis de las técnicas de tratamiento de remoción de metales tóxicos.

Autor: Elaborado por Rosero (2020) con datos de (Caviedes et al., 2015).



La remoción de metales tóxicos de aguas residuales, es un problema al cual ha sido muy difícil encontrarle solución hasta la actualidad, debido a que este tipo de metales no son biodegradables y en la mayoría de los casos, presentan una alta toxicidad para los organismos acuáticos que están en los cuerpos de agua receptores de los mismos (Villanueva, 2017).

Entre los metales que mayor riesgo presenta está el cromo. Esto lleva a considerar la importancia que tiene la remoción del cromo principalmente el hexavalente del medio ambiente, pues es altamente tóxico. Dada la elevada peligrosidad que presenta el cromo hexavalente, el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS), la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) y la EPA han definido que los compuestos de Cr (VI) son carcinogénicos en seres humanos (Guerrero et al., 2017). Por lo mencionado, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y otros organismos internacionales y nacionales ha establecido un nivel de contaminación máximo de cromo en el agua potable de 0,1 mg/L. Por lo establecido antes, es muy importante buscar alternativas para la remoción de las especies de cromo en procura de mantener la calidad del agua.

En este sentido, existen diferentes métodos y técnicas llevadas a cabo para recuperar o remover Cr (VI) de aguas, algunas de ellas son costosas (Pinos et al., 2016). Actualmente, el proceso más empleado es la reducción de Cr (VI) a Cr (III) por la adición de un agente reductor, seguido por su precipitación como Cr (OH)₃ con una solución básica, habitualmente con cal en un medio básico. Sin embargo, esos métodos tienen ciertas desventajas, como su alto costo, baja eficiencia, generación de residuos tóxicos u otros que necesitan disposición y que implican complejidad operacional (Rivera et al., 2015).

La capacidad de algunos organismos para interactuar con varias formas de cromo, los hace muy atractivos en el contexto de la biotecnología ambiental. En este sentido, actualmente hay gran cantidad de reportes del uso de biomasa microbianas para la remoción de Cr (VI) de aguas residuales industriales y/o contaminadas (Ahemad, 2014). Las propiedades de algunos microorganismos para soportar y reducir Cr (VI) hacen posible su aplicación en procesos biotecnológicos destinados a la destoxificación del mismo (Rivera et al., 2015).



Dentro de las técnicas convencionales, se describen a continuación, algunas de estas, con base en los estudios realizados.

4.2. Técnicas Convencionales

4.2.1. Filtración por membrana

Es una técnica que tiene alta eficiencia, además de que requiere reducido espacio, es de fácil aplicación y la selectividad de separación depende particularmente del proceso de membrana utilizado y del tipo de membrana (Millan, 2018). Tiene el inconveniente de que produce una alta cantidad de lodo que tienen metales. Se emplea en procesos para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y en menor medida aguas residuales domésticas. Las membranas pueden clasificarse de acuerdo a diferentes características como su peso molecular de corte, material de la membrana (sintéticos o polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados), permeabilidad y solubilidad del soluto y el solvente en la película, superficie y espesor activo de la película, así como la carga de su superficie (Ji, 2015).

4.2.2. Electrodiálisis

“Es una técnica de descontaminación que puede remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante. Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta $0,0001 \mu\text{m}$, mediante hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua” (Mayta & Mayta, 2017).

4.2.3. Ósmosis Inversa

Es un proceso de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene la capacidad de escoger elementos de tan solo $0,0001 \text{ mm}$, lo que le da un extenso abanico de capacidades de tratamiento (Caviedes et al., 2015).



4.2.4. Nanofiltración

Es una técnica de tratamiento de agua relativamente nueva que utiliza membranas con poros muy pequeños (< 1 nm) y requiere presiones de funcionamiento en el rango de 10 - 50 bar. Por lo tanto, las membranas empleadas para la nanofiltración son capaces de retener especies neutras con peso molecular $< 200 - 300$ g/mol, y también para rechazar iones inorgánicos por un mecanismo de exclusión por tamaño en combinación con las interacciones electrostáticas entre los iones y la membrana cargada, presenta mayor rechazo de iones divalentes y menor rechazo de iones monovalentes, la presión de funcionamiento más baja, mayor flujo y menor consumo de energía en comparación con la osmosis inversa (Gautman & Chattopadhyaya, 2016).

4.2.5. Ultrafiltración

“Es un proceso de fraccionamiento selectivo utilizando presiones de hasta 145 psi (10 bares). La ultrafiltración se utiliza ampliamente en el fraccionamiento de leche y suero, y en fraccionamiento proteico. Concentra sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1 000 umas. El permeado contiene solutos orgánicos de bajo peso molecular y sales” (Caviedes et al., 2015).

4.2.6. Intercambio Iónico

Proceso en el cual los iones en solución se trasladan a una matriz sólida que, a su vez liberan iones de un tipo distinto, pero de la misma carga. El intercambio iónico es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifiquen químicamente. Las principales ventajas de intercambio iónico son la recuperación del valor del metal, la selectividad, menos volumen de lodos producidos y la reunión de las especificaciones de descarga estrictas (Zewail & Yousef, 2015).



4.2.7. Adsorción (Convencional)

Esta técnica se caracteriza por presentar remoción de una gran variedad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva dependiendo de adsorbente de lo cual también depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo. Los carbones activados, arcillas, biopolímeros, zeolitas, perlas de sílice y plantas o desechos lignocelulósicos, nanotubos de carbono son varios de los adsorbentes, generalmente con procesos diversos de modificación química (Zewail & Yousef, 2015).

4.2.8. Precipitación química

Es la técnica más utilizada en los procesos industriales ya que es relativamente fácil de operar, económica y selectiva, aunque su cuidado resulta costoso debido a la alta generación de lodos. Se emplea en su mayoría en la precipitación por sulfuros, aunque con solubilidades bajas y precipitados no anfóteros, por lo que puede lograr obtener altos rendimientos; también se han empleado sustancias quelantes, aunque presentan desventajas considerables como la carencia de uniones necesarias y demasiados riesgos ambientales (Romero, Sánchez & Benavente, 2018).

4.2.9. Electrocoagulación

Es un proceso que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente proporcionado de una fuente de corriente y varios electrodos delegados de dar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional, induciendo la corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de hierro o aluminio (GilPavas et al., 2017).



4.2.10. Coagulación – Flocculación

Es el método mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y apilar posteriormente. Los factores más significativos que se deben tener en cuenta para esta técnica son la dosis química apropiada, el efecto energético de la mezcla y el tiempo de la mezcla; los coagulantes químicos que se utilizan habitualmente en el tratamiento de aguas residuales incluyen alumbre ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), cloruro férrico ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Ji, 2015).

4.2.11. Electro flocculación

Proceso químico con adición electrolítica de iones metálicos. Su eficiencia en la remoción de los contaminantes se da porque son trasladados por las burbujas de gas (H_2 y O_2) que se producen en el sistema por lo que salen a flote en la superficie (GilPavas et al., 2017).

4.2.12. Flotación

Se basa en distribuir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas por medio del uso de agentes activos de superficie (tensoactivos) y la posterior eliminación de estas especies hidrófobas por burbujas de aire (Fernández et al., 2018).

4.2.13. Fotocatálisis en la degradación de metales pesados

Se basa en la transferencia de carga a través de la interfaz entre el semiconductor y la solución acuosa contaminada. Donde la conductividad incrementa con la temperatura, y se produce un par de electrón-hueco, dando lugar a la adsorción de los fotones y la distribución de diferentes estados electrónicos en la superficie, degradando moléculas orgánicas colorantes y metales pesados (Zewail & Yousef, 2015).



4.3. Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los métodos convencionales más utilizados en la eliminación de Cromo en sistemas acuosos

Tabla 6. Métodos convencionales más utilizados en la eliminación de Cromo en sistemas acuosos

N°	Nombre del Método	Ventajas	Desventajas
1	Adsorción	Adsorbentes convencionales (Por ejemplo, arcilla, arena y tierra que contienen óxidos de hierro y manganeso)	<ul style="list-style-type: none"> - Efectivo para cromo hexavalente pero no para el trivalente. - El pH de la solución afecta el método. - Afectado por la naturaleza química del adsorbente.
2	Ósmosis inversa	El reciclaje del efluente es posible después del tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere altas presiones. - Alta probabilidad de daño a las membranas. - Altos costos.
3	Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> - Eficaz. - Posibilidad de recuperación de cromo. 	<ul style="list-style-type: none"> - La presencia de materiales en forma de partículas interfiere con el proceso. - Resinas con alto costo.
4	Electroquímico (Óxido-reducción)	La conversión del cromo hexavalente al trivalente es un proceso sencillo en la presencia de donantes de electrones comunes como Fe^{2+} , Mn^{+2} , CH_4 , S^{-2} .	La probabilidad de una reacción inversa, es decir, la conversión del cromo trivalente a hexavalente es muy alta en condiciones desfavorables.
5	Precipitación química	<ul style="list-style-type: none"> - Procedimientos simples. - Bajos costos operacionales en la mayoría de los casos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se dificulta la separación de sales por ser solución acuosa. - La precipitación del cromo hexavalente debido su solubilidad es difícil en presencia de compuestos orgánicos. - Comúnmente ineficiente en baja concentración de cromo.
6	Quelación	<ul style="list-style-type: none"> - Las resinas PS-DVB modificadas poseen una alta capacidad de retención de iones metálicos. - Las resinas macro porosas tienen una buena estabilidad en medio ácido/alcalino y manejan gran volumen de efluentes. 	<ul style="list-style-type: none"> - El injerto de ligandos sobre el soporte polimérico consume tiempo y esto a su vez da como resultado una cinética de intercambio lenta y una capacidad de sorción moderada para los iones metálicos. - Alto costo de las resinas.
7	Separación por membrana	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia. - Alta selectividad 	Daños en las membranas.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020) con base en (Singh et al., 2016).



La revisión acerca de las ventajas y desventajas de los métodos convencionales que se vienen empleando para la eliminación del cromo en sistemas acuosos, permite apreciar que en estos procedimientos convencionales existe diversidad tanto en el aspecto operacional de los mismos, pues son en su mayoría simples y rápidos, lo que ayuda en la recuperación del cromo. No se puede hacer a un lado que también presentan desventajas que impiden en muchos casos su selección como alternativas ideales para la remoción de este metal (Millan, 2018). Dentro de estas desventajas se encuentran los altos costos operacionales que suelen acarrear, así como el elevado consumo de energía y particularmente la producción por derivación de contaminantes secundarios, los cuales también incrementan la contaminación del medio ambiente.

Por otra parte, algunos autores consideran que estos métodos funcionan en su mayoría de manera óptima, pero solo bajo elevadas concentraciones de cromo, lo que implica que su eficacia podría verse afectada por la presencia de agentes interferentes (Millan, 2018). Esto lleva a autores como (Singh et al., 2016), a considerar que todas las ventajas que ofrecen dichos métodos, deben ser muy bien analizadas para proponer el desarrollo de un proceso sostenible y económico para la remoción del cromo.

Con respecto a esto, debe destacarse que, en los últimos años, avances en investigaciones realizadas llevan a considerar las técnicas no convencionales para la remoción del cromo en sistemas acuosos, como alternativas ideales por presentarse como opciones más amigables con el medio ambiente y con muy bajos costos. Dentro de estas, el uso de bio-absorbentes ha comenzado a ganar terreno, mediante la biorremediación, la cual se refiere al uso productivo de sistemas vivos para eliminar o desintoxicar contaminantes. El uso de sistemas microbianos para la biorremediación de metales tiene un gran potencial debido a su bajo costo y a sus técnicas de generación de desechos, por lo tanto, está prevista como una tecnología prometedora para la eliminación del cromo tanto en su forma trivalente como en su forma hexavalente del medio ambiente contaminado de una manera efectiva, económica y ecológica (Millan, 2018).



4.4. Técnicas No Convencionales

Son alternativas tecnológicas, las cuales, además de aprovechar y aplicar los procesos naturales que suceden en un ecosistema para eliminar un residuo contaminante, ofrecen la posibilidad de recobrar los recursos presentes en el mismo para su posterior uso, generándose, además, un valor económico que contribuye a la sostenibilidad del sistema (Cuellar, 2015). Dentro de las técnicas no convencionales más aplicadas se encuentran:

4.4.1. Bio-Absorbentes

Es un proceso que se basa en la captación de varias especies químicas por una biomasa, a través de mecanismos físico-químicos como la adsorción o el intercambio iónico (Cuellar, 2015). Este proceso, una fase sólida -biomasa- (sorbente o adsorbente) y una fase líquida (solvente) que contiene las especies disueltas (adsorbatos) que van a ser retenidas por el sólido. Para que este proceso se dé debe existir afinidad del adsorbente por los adsorbatos, para que estos últimos sean transferidos hacia el sólido donde van a ser retenidos por distintos mecanismos. Esta operación continúa hasta que se establece un equilibrio entre el adsorbato disuelto y el adsorbato enlazado al sólido (Tabatabaee et al., 2016).

4.4.2. Utilización de sistemas vivos (microorganismos y plantas)

En la actualidad se están utilizando diferentes sistemas biológicos para contribuir en la remoción del Cr (VI) en aguas residuales industriales contaminadas con este metal pesado; algunos de los estudios que más se resaltan en esta área son el uso del hongo *Paecilomyces* sp y evaluaron la capacidad del mismo para remover Cr (VI) en agua residual sintética; determinando remociones de 100 mg Cr/100ml. El uso del alga-bacteria *Bostrychia calliptera* (Rhodomelaceae), obteniendo porcentajes de remoción cercanos al 63% de Cromo (Díaz & Granada, 2018).

Hoy en día, la tendencia es a experimentar con el uso de distintos compuestos para evaluar la remoción de los metales pesados utilizando distintas técnicas de bio-remediación como lo son: Fito-remediación (cuando se utilizan plantas para permitir a la eliminación de compuestos inorgánicos), Mico-remediación (utilización de hongos) y otras técnicas que



implementan los sistemas biológicos para tratar los recursos naturales contaminados con metales pesados (Díaz & Granada, 2018).

4.4.3. Biopolímeros

Son compuestos industrialmente atractivos porque tienen la capacidad de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros (Ji, 2015). Poseen un número extenso de distintos grupos funcionales, tales como hidroxilos y aminos, que incrementan la eficiencia de la absorción de iones metálicos (Caviedes et al., 2015).

4.4.4. Hidrogeles

Son polímeros hidrófilos reticulados con la capacidad de ampliar sus volúmenes por su alta expansión en el agua. Por consiguiente, ellos son ampliamente utilizados en la purificación de las aguas residuales (Caviedes et al., 2015).

4.4.5. Ceniza volante

Las cenizas volantes, producidas durante la combustión de carbón para la producción de energía, es un subproducto industrial que es reconocido como un contaminante ambiental, debido a su enriquecimiento en elementos traza potencialmente tóxica que se condensan del gas de combustión. Este material se ha reutilizado como un adsorbente de bajo costo para la supresión de compuestos orgánicos, gases de combustión y los metales pesados; luego de incrementar su capacidad de adsorción mediante de la activación química y física (Caviedes et al., 2015).

4.5. Análisis y Síntesis de la Información

Durante este estudio se realizó una revisión bibliográfica acerca de la ocurrencia y los métodos de remoción de cromo hexavalente en agua de efluentes industriales reales en los últimos 5 años, con el fin de conocer la ocurrencia del cromo en aguas superficiales, potables y residuales, así como los riesgos al ambiente y al ser humano que ocasiona el cromo, para

luego poder comparar las propuestas de remoción del cromo hexavalente en agua de efluentes industriales revisados en el estudio.

El estudio arrojó en la revisión bibliográfica, la existencia de 6 artículos que presentaron características para su incorporación en la revisión realizada, según los criterios predefinidos. Como se observa en la Figura 17 solo el 70 %, es decir, 4 estudios fueron realizados aplicando diferentes sistemas y métodos no convencionales para la remoción del cromo de las aguas residuales industriales contaminadas usando como mecanismo de remoción el uso de bio-adsorbentes, el cual resulta económicamente factible. El 30 %, es decir los 2 artículos restantes se ajustaron a técnicas convencionales los cuales fueron descartados debido a que no eran económicamente factibles porque los mecanismos de remoción utilizados fueron la adsorción y la electrocoagulación, métodos que resultan en el aspecto técnico más costosos. Vale indicar que el reducido número de artículos se debe a que se estableció el estudio de aguas reales, y la mayoría de artículos tuvo que ser descartado por tratarse de aguas contaminadas con cromo preparadas en laboratorio.

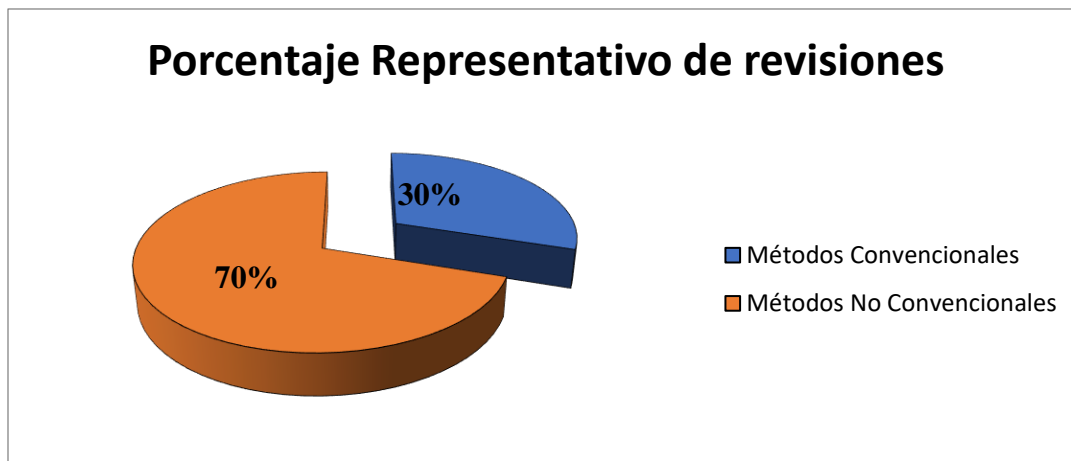


Figura 17. Porcentaje representativo de predominancia de métodos revisados.

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

A continuación, se presentan las investigaciones revisadas que tuvieron predominancia en la remoción del Cr (VI) empleando estas técnicas.



Tabla 7. Métodos de remoción del Cromo Hexavalente aplicando técnicas convencionales y no convencionales.

Acumulador de Cr	Mecanismo de remoción	%Máximo de remoción	Tiempo de exposición al tratamiento	Método	Conclusión	Referencia
TÉCNICAS CONVENCIONALES						
HDL Al(Mg)	Adsorción	70 %	120 minutos	Se sintetizó cuatro tipos de hidróxidos dobles laminares (HDL) con Al/Mg relación molar 4:1, empleando químicos grado analítico y técnico	Los HDL disminuyen significativamente Cr (VI) del efluente de una industria de cromado de grifería, en una columna de lecho fijo a un pH de 2,8. Se recomienda el uso de HDL para tratar efluentes altamente contaminados y poder transferirlos a una matriz sólida, de fácil manejo para gestores ambientales	(Murgueitio et al., 2015)
Electrodos Hierro/Aluminio	Electrocoagulación	99 %	40 minutos	Se utilizó un reactor discontinuo con capacidad máxima de 1 936 mililitros; el diseño experimental consistió en realizar diferentes ensayos variando el material de los electrodos	El tratamiento de aguas contaminadas con Cr (VI) mediante electrocoagulación permite el cumplimiento de la norma ambiental vigente, lo que hace menos dispendioso el proceso de remoción de Cr (VI) de un efluente industrial y permite ser un	(Arboleda Camacho et al., 2015)



				(hierro y/o aluminio), las distancias entre electrodos de 5 mm, 10 mm, 15 mm y la variación de pH inicial (4, 6 y 8)	tratamiento efectivo y económico dependiendo del volumen a tratar.	
TÉCNICAS NO CONVENCIONALES						
<i>Musa paradisiaca</i> (Cáscara de plátano)	Bio- adsorbentes	92 %	15 minutos	Primera etapa: 1 g de la biomasa por 20 mg/L de Cr (VI). Segunda Etapa: 1 g biomasa por 20 a 40 y 80 mg/L de Cr (VI).	Al aumentar el pH disminuye el % de remoción y la capacidad de adsorción. Al aumentar la concentración aumenta la capacidad de adsorción de la cáscara de plátano	(López Hernández & Lacayo Romero, 2019)
<i>Spirulina sp</i> (Arthrospira sp.)	Biosorción	96,5 %	24 horas	Se añadió cepa de <i>Spirulina sp</i> a una concentración de $1.55 \cdot 10^5$ células/ml correspondiente a 20 g/L.	Con el uso de biomasa se alcanzaron remociones de hasta el 96,5 % en las primeras 24 horas y un valor final de cromo de 1,02 mg/l, presentando la ventaja que este método genera menos del 10 % de lodos y permite recuperar el cromo para su posterior uso	(Meneses Barroso et al., 2019)
Quitosano Modificado	Bio-adsorbentes	98 %	2 horas	Capacidad de adsorción de Cr (VI) en quitosano	La capacidad máxima de adsorción fue alcanzada en el adsorbente Quitosano-Cu. El adsorbente	(Romero-Sevilla, Sánchez-



				modificado con cobre (Quitosano–Cu) y en quitosano modificado con cinc (Quitosano–Zn), y su aplicación en aguas residuales de tenería.	Quitosano–Cu fue más efectivo en la remoción de Cr (VI) de las aguas residuales de tenería con un 98 %.	Cuadra, & Silva, 2018)
Partículas de Bambú	Bio-adsorbentes	59 % hasta 85 %	1, 15, 30,45 y 60 min	Capacidad de adsorción que presentan las partículas de bambú frente al Cr (VI).	Los porcentajes más altos corresponden al tratamiento que presenta una concentración de 25 ppm, un tamaño de partícula 0,595 mm, agregando 25 mg de masa del adsorbente, teniendo una desviación estándar de 3,72. Tratamiento es eficaz	(Martínez Jiménez et al., 2018)

Fuente: Elaborado por Rosero (2020)

La presencia de un amplio grupo de investigaciones que abordan diversos tratamientos no convencionales con componentes variados y con modificaciones sobre aplicaciones previas, denota la preocupación que existe por alcanzar la eficiencia en la remoción de los metales tóxicos, lo que indica que autoridades y científicos se unen en la búsqueda de soluciones que solventen esta problemática.

Se evidencia en las investigaciones revisadas la obtención de nuevos materiales prometedores en eficiencia en lo que respecta a procesos de absorción y adsorción, todas con el claro objetivo de reducir costos energéticos y operacionales, que posibiliten su implementación y sostenibilidad (Arias, 2019).

En los estudios revisados, se han implementado diferentes bioabsorbentes con la finalidad de evaluar las posibilidades de remoción del Cr (VI) en aguas industriales reales, sin embargo, todos los tratamientos se han probado a nivel de laboratorio, obteniendo resultados muy significativos y prometedores con respecto a la remoción del Cr (VI), en la mayoría de las investigaciones (López & Lacayo, 2019; Martínez et al., 2018; Meneses et al., 2019; Romero, Sánchez & Silva, 2018). No se encontró evidencia de que estos sistemas alternativos, se hayan implementado a escala real, lo que lleva a concretar que los resultados no son del todo concluyentes ni definitivos, hasta tanto no se consiga la comprobación efectiva a escala real de dichos tratamientos. Podemos corroborar que en algunos procesos el pH es un factor determinante para la remoción, por ejemplo, al aumentar el pH disminuye el % de remoción y la capacidad de adsorción de los bioabsorbentes; otra de las variables que influyen en los resultados es la concentración de cromo, pues al aumentar la concentración aumenta la capacidad de adsorción de los mismos (López & Lacayo, 2019).

Se ha podido observar en los estudios revisados y enlistados en la Tabla 7, que uno de los métodos para la extracción de metales como el cromo en los sistemas acuíferos estudiado, es la utilización de sistemas biológicos, debido a que los mismos representan alternativas viables, eficaces y altamente económicas comparadas con los sistemas convencionales, lo que permite la posibilidad de operación y actuación en las empresas que no cuentan con los recursos necesarios para cumplir con esta normativa ambiental implementando tecnologías más avanzadas (López & Lacayo, 2019; Martínez et al., 2018; Meneses et al., 2019; Romero, Sánchez & Silva, 2018).



En los estudios analizados, el mecanismo de remoción con Bio-adsorbentes que obtuvo el mayor porcentaje de remoción de cromo hexavalente fue el quitosano modificado, alcanzando un 98 % con el menor tiempo de exposición al tratamiento (2 horas), lo que indica que, de los estudios analizados, es el tratamiento más efectivo en la remoción de Cr (VI). En este estudio pudo evidenciarse que la estimación del pH para la mayor adsorción de los iones metálicos en el quitosano es importante, ya que el pH afecta la carga superficial del adsorbente, el grado de ionización y la especiación del metal en la solución. Así también, es un factor que determina la fijación de los iones metálicos en el adsorbente. Otro aspecto importante en este estudio, es la presencia de la cantidad de biomasa utilizada, pues al aumentar la misma también se incrementa la remoción del cromo, debido a que hay más sitios activos del adsorbente disponibles para la absorción del anión (Romero, Sánchez & Silva, 2018). En el caso de las partículas de Bambú, se observa que fue el sistema que menor porcentaje de remoción obtuvo (entre 59 % hasta 85 %), aplicando en los ensayos realizados el menor tiempo de exposición de entre 1 minuto a un máximo de 60 minutos. Aunado a esto, se observa que las investigaciones que han usado este tipo de material son hasta ahora muy reducidas, lo que abre una oportunidad de experimentación, pues se observa que la capacidad de adsorción de metales tóxicos como el Cr (VI) utilizando este mecanismo es eficaz con lo que se abre una oportunidad para seguir estudiando dicho comportamiento (Martínez et al., 2018).

Lo antes expuesto, permite apreciar que actualmente los métodos de remoción de Cr (VI) se están realizando mediante la implementación de materia orgánica considerada como un desecho orgánico, esta tecnología es de bajo costo y fácil accesibilidad, el principal objetivo es disminuir el impacto en el ambiente causado por el Cr (VI), de acuerdo a la revisión de la literatura se encuentran el uso de la cáscara de plátano (López & Lacayo, 2019); la *Sirulina* sp (Meneses et al., 2019); el quitosano modificado (Romero, Sánchez, & Silva, 2018) y las partículas de Bambú (Martínez et al., 2018). Es por esto que el autor considera importante que se realice más investigaciones que permitan desarrollar e implementar tecnologías no convencionales que sean adecuadas para cada zona en particular y que se adapten a las necesidades que cada cual presenta, considerando el tipo de industria que exista y las características específicas del rango de contaminantes que se encuentren presentes, así como la mejor manera de abordarlos.



CAPITULO V

Conclusiones y Recomendaciones

5. CONCLUSIONES

Los efectos que ocasiona el cromo al medio ambiente y la toxicidad a los seres humanos son alarmantes, en las personas el Cr (VI) provoca alteraciones potencialmente cancerígenas debido a sus propiedades altamente oxidantes, provocando cáncer de pulmón, daños al hígado, úlceras en la piel, convulsiones, malestar estomacal, etc. En el medio ambiente causa daño a la flora, fauna y genera alteraciones en distintos ecosistemas por la presencia de este metal. Tanto la EPA como la FDA, se encuentran vinculadas con el TULAS o TULSMAN en el cual la concentración límite permitida para Cr (VI) en el agua potable es de 0,05 mg/L, viendo así que la normativa ecuatoriana se encuentra ajustada a los estándares establecidos por la OMS adoptado por varios países con excepción de Estados Unidos quien permite 0,1 mg/L y Colombia por debajo del valor recomendado con un nivel máximo de 0,01 mg/L.

La ocurrencia de cromo en agua superficial, potable e industrial en los estudios de los últimos 5 años fue comprobable mediante la revisión de distintos artículos científicos en los cuales no solo se hablaba de la contaminación que genera el cromo en el medio ambiente, sino también del tipo de especie, concentración y su ubicación; parámetros que permitieron realizar una correcta clasificación. Mediante la síntesis de información con cada tipo de agua, se estableció cual era el continente con el mayor y menor porcentaje de estudios, y también el país con la mayor y menor concentración de Cr (VI), teniendo una idea más clara de donde existe con mayor frecuencia contaminación por este metal toxico en cada región del mundo.

Al comparar los métodos revisados para la remoción de Cr (VI) en aguas industriales reales los que tuvieron mayor prevalencia fueron los no convencionales, debido a que resultan más amigables con el medio ambiente por el uso de materia orgánica, fácil accesibilidad y permiten reducir costos en la parte energética y operacional lo cual técnicamente es factible para la industria. Sin embargo, el corto tiempo de vida de estos absorbentes y la recuperación del cromo en los mismos podría ser algunas de sus desventajas. Por su parte los convencionales fueron descartados debido a que no resultaban económicamente factibles por el elevado consumo de energía y la producción por derivación de contaminantes secundarios.



6. RECOMENDACIONES

El hecho de que nuestro país se encuentre en continuo crecimiento en el área investigativa y tecnológica resulta bastante alentador para jóvenes investigadores que se encuentran interesados en seguir desarrollando nuevas tecnologías para el bien común. Se recomienda que se realicen trabajos sobre propuestas de remoción del cromo en aguas industriales pensando en la posibilidad de implementarlo a escala real.

Al haber pocos estudios a pesar de lo que se esperaría por el hecho de que el cromo es un metal tóxico importante, no da como hecho de que no exista contaminación, simplemente es la falta de cultura investigativa. Por lo que se debería fomentar más investigaciones acerca de distintos contaminantes para tener una visión más amplia acerca de los riesgos a los que está expuesta la población.



Referencias Bibliográficas

- Ahemad, M. (2014). Bacterial mechanisms for Cr(VI) resistance and reduction: An overview and recent advances. *Folia Microbiologica*, 59(4), 321-332. <https://doi.org/10.1007/s12223-014-0304-8>
- Ahmed, M. F., & Mokhtar, M. B. (2020). Assessing Cadmium and Chromium Concentrations in Drinking Water to Predict Health Risk in Malaysia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2966. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082966>
- Alahabadi, A., & Malvandi, H. (2018). Contamination and ecological risk assessment of heavy metals and metalloids in surface sediments of the Tajan River, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 741-749. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.030>
- Alarcón, L. M., Mendiola, J., & Cantero, A. M. T. (2014). Calidad seminal y toxicidad de metales pesados y plaguicidas. *Revista de Salud Ambiental*, 14(1), 8-19.
- Albis, A. R., R, L. V. C., & Domínguez, M. I. (2015). Análisis cinético de la adsorción de Cr (VI) en soluciones acuosas a concentraciones de 10-20 mg/L con el uso de cáscara de yuca amarga (Manihot esculenta). *Prospectiva*, 13(2), 64-71. <https://doi.org/10.15665/rp.v13i2.488>
- Alemu, A., & Gabbiye, N. (2017). Assessment of chromium contamination in the surface water and soil at the riparian of Abbay River caused by the nearby industries in Bahir Dar city, Ethiopia. *Water Practice and Technology*, 12(1), 72-79. <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.012>



- Anastopoulos, I., & Kyzas, G. Z. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular Liquids*, 209, 77-86.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.05.023>
- Arboleda Camacho, J. M., Herrera López, P. J., & Peña Guzmán, C. A. (2015). Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr⁶⁺) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio. *reponame:Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/613>
- Arias Patiño, L. (2019). Evaluación de la capacidad de remoción de CR (VI) en solución con una mezcla de cáscara de naranja y cáscara de banano como bioadsorbente. *Ingeniería Ambiental y Sanitaria*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1112
- Arnous, M. O., & Hassan, M. A. A. (2015). Heavy metals risk assessment in water and bottom sediments of the eastern part of Lake Manzala, Egypt, based on remote sensing and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), 7899-7918.
<https://doi.org/10.1007/s12517-014-1763-6>
- Ashraf, A., Bibi, I., Niazi, N. K., Ok, Y. S., Murtaza, G., Shahid, M., Kunhikrishnan, A., Li, D., & Mahmood, T. (2017). Chromium(VI) sorption efficiency of acid-activated banana peel over organo-montmorillonite in aqueous solutions. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 605-613.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1256372>
- ATSDR. (2019). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades | ATSDR*.
<https://www.atsdr.cdc.gov/es/index.html>



Barrera Dia, C. E. (2014). “*REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON α -ALÚMINA*”.

<https://core.ac.uk/reader/55520112>

Bazzazzadeh, R., Soudi, M. R., Valinassab, T., & Moradlou, O. (2020). Kinetics and equilibrium studies on biosorption of hexavalent chromium from leather tanning wastewater by *Sargassum tenerrimum* from Chabahar-Bay Iran. *Algal Research*, 48, 101896. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101896>

Biblioteca de la Universidad de Cantabria. (2014).

<https://web.unican.es:443/buc/recursos/bases-de-datos/informacion-base-datos?b=88>

Caviedes Rubio, D. I. C., Muñoz Calderón, R. A. M., Perdomo Gualtero, A. P., Rodríguez Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13, 73-90.

CEDIA. (2020). *TAYLOR & FRANCIS*. <https://www.cedia.edu.ec/es/servicios/bases-de-datos/taylor-francis>

Chen, Y., Dong, B., & Xin, J. (2017). Occurrence and fractionation of Cr along the Loushan River affected by a chromium slag heap in East China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(18), 15655-15666. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9200-5>

Clarivate. (2020). *SciELO Ayuda*.

https://images.webofknowledge.com/WOKRS514B4/help/es_LA/SCIELO/hs_search_operators.html#dsy861-TRS_booleans



- Codina, L. (2018). Science Direct: Base de datos y plataforma digital de Elsevier. *Lluís Codina*. <https://www.lluiscodina.com/science-direct-elsevier/>
- Constitucion de la Republica del Ecuador. (2008). *CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008 | Ecuador—Guía Oficial de Trámites y Servicios*. <https://www.gob.ec/regulaciones/constitucion-republica-ecuador-2008>
- Cuellar, O. F. A. (2015). Tratamientos para la remoción de Cromo (VI) presente en aguas residuales. *Revista Nova*, 1(1), 66-73. <https://doi.org/10.23850/25004476.187>
- Díaz-Martínez, J. A., & Granada-Torres, C. A. (2018). Effect of anthropic activities on the physicochemical and microbiological characteristics of the Bogotá River along the municipality of Villapinzón-Cundinamarca. *Revista de la Facultad de Medicina*, 66(1), 45-52. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v66n1.59728>
- Duffus, J. H. (2002). «Heavy metals» a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793-807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Escóbar Llanos, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.
- Esguerra, M. J. S., Manguiam, V. L. R., Cabanban, S. K. V., Gala, M. J. A. L., Limos, M. J. N. A., Tella-in, J. M. J., & Adornado, A. P. (2018). Biosorption of lead and chromium in surface water using Philippine mud crab (*Scylla serrata*) and tahong (*Perna viridis*) shells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 191, 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/191/1/012104>
- Ezaka, E., & Anyanwu, C. (2011). Chromium (VI) tolerance of bacterial strains isolated from sewage oxidation ditch. *Int. J. Environ. Sci.*, 1, 1725-1734.



- Farokhneshat, F., Mahvi, A. H., & Jamali, Y. (2016). Carcinogenic and non-carcinogenic risk assessment of chromium in drinking water sources: Birjand, Iran. *Research Journal of Environmental Toxicology*, *10*(3), 166-171.
- FDA. (2018). ¿Qué hace la FDA? *FDA*. <https://www.fda.gov/about-fda/fda-basics/que-hace-la-fda>
- Fernández, P. M., Viñarta, S. C., Bernal, A. R., Cruz, E. L., & Figueroa, L. I. C. (2018). Bioremediation strategies for chromium removal: Current research, scale-up approach and future perspectives. *Chemosphere*, *208*, 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.166>
- Gautman, R., & Chattopadhyaya, M. (2016). *Nanomaterials for Wastewater Remediation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01159-8>
- Gil, L. (2015, abril 13). Google Scholar: El buscador académico con mayor impacto. *Social Media en Investigación - Un proyecto de Lydia Gil*. <https://socialmediaeninvestigacion.com/google-scholar-buscador-academico/>
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, *191*, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>
- Glorias Garcia, F., & Barrera Dia, C. E. (2014). “*REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE UTILIZANDO UN SISTEMA DE FILTRACIÓN CON α -ALÚMINA*”. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/14995>
- Gómez-García, F. J. (2018). *Guía de uso ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33773.90086>



- Guerrero Ceballos, D. L., Pinta-Melo, J., Fernández-Izquierdo, P., Ibargüen-Mondragón, E., Hidalgo-Bonilla, S. P., & Burbano-Rosero, E. M. (2017). Eficiencia en la reducción de Cromo por una bacteria silvestre en un tratamiento tipo Batch utilizando como sustrato agua residual del municipio de Pasto, Colombia. *Universidad y Salud*, 19(1), 102-115. <https://doi.org/10.22267/rus.171901.74>
- Harte, J., Holdren, C., Schneider, R., & Shirley, C. (1991). *Toxics A to Z: A Guide to Everyday Pollution Hazards*. University of California Press.
- He, X., & Li, P. (2020). Surface Water Pollution in the Middle Chinese Loess Plateau with Special Focus on Hexavalent Chromium (Cr⁶⁺): Occurrence, Sources and Health Risks. *Exposure and Health*, 12(3), 385-401. <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00344-x>
- Hernández, M., & Lacayo, M. (2020). Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como adsorbente. *Revista Torreón Universitario*, 8, 73-83. <https://doi.org/10.5377/torreon.v8i23.9534>
- Islam, A., Ahmad, H., Zaidi, N., & Kumar, S. (2016). A graphene oxide decorated with triethylenetetramine-modified magnetite for separation of chromium species prior to their sequential speciation and determination via FAAS. *Microchimica Acta*, 183(1), 289-296. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1641-2>
- IUPAC. (2020). *International Union of Pure and Applied Chemistry*. <https://iupac.org/>
- Ji, Y. (2015). 16—Membrane technologies for water treatment and reuse in the gas and petrochemical industries. En A. Basile, A. Cassano, & N. K. Rastogi (Eds.), *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment* (pp. 519-536). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00016-2>



- Jiang, Y. (2018). *Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments in Science of the Total Environment*.
- Jobby, R., Jha, P., Yadav, A. K., & Desai, N. (2018). Biosorption and biotransformation of hexavalent chromium [Cr(VI)]: A comprehensive review. *Chemosphere*, 207, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.050>
- Jones, L., Sullivan, T., Kinsella, B., Furey, A., & Regan, F. (2017). Occurrence of Selected Metals in Wastewater Effluent and Surface Water in Ireland. *Analytical Letters*, 50(4), 724-737. <https://doi.org/10.1080/00032719.2016.1194854>
- Kan, C.-C., Ibe, A. H., Rivera, K. K. P., Arazo, R. O., & de Luna, M. D. G. (2017). Hexavalent chromium removal from aqueous solution by adsorbents synthesized from groundwater treatment residuals. *Sustainable Environment Research*, 27(4), 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.04.001>
- Kaprara, E., Kazakis, N., Simeonidis, K., Coles, S., Zouboulis, A. I., Samaras, P., & Mitrakas, M. (2015). Occurrence of Cr(VI) in drinking water of Greece and relation to the geological background. *Journal of Hazardous Materials*, 281, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.084>
- Leyva, R., Flores, J. V., Díaz, P. E., & Berber, M. S. (2008). Adsorción de Cromo (VI) en Solución Acuosa sobre Fibra de Carbón Activado. *Información Tecnológica*, 19(5). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000500005>
- Llurba, S. S. (2018, enero 24). *¿Qué es Scopus? ¿Y para qué sirve?* Biblioteca San Juan de Dios. <https://bibliosjd.org/2018/01/24/scopus-que-es-para-que-sirve/>
- Loja Encalada, E. A., & Ocaña Buestán, M. del R. (2016). *Evaluación de la eficacia de los filtros de los procesos de filtración lenta y filtración rápida en la potabilización de*



agua de la junta regional de Bayas.

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26016>

Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL.

Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14(2), 145.

[https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)

López, F., González, A., & Guzmán, J. (2017). Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia.

Revista de Investigación Agraria y Ambiental, 8, 227-237.

<https://doi.org/10.22490/21456453.1852>

López Hernández, M., & Lacayo Romero, M. (2019). Remoción de cromo hexavalente en aguas contaminadas utilizando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*) como adsorbente. *Revista Torreón Universitario*, 8(23), 73-83.

<https://doi.org/10.5377/torreon.v8i23.9534>

Mani Tripathi, S., & Chaurasia, S. (2020). Detection of Chromium in surface and groundwater and its bio-absorption using bio-wastes and vermiculite. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, S2215098619321524.

<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.12.002>

Martínez Jiménez, D. Y., Rico Barragán, A. A., Salazar Hernández, E., Soto Zavalet, N. L., & Heyer Rodríguez, L. (2018). Remoción de Cr +6 usando partículas a base de hoja de bambú. *Removal of Cr +6 using particles based on bamboo leaf*. 13.

Remoción de Cr +6 usando partículas a base de hoja de bambú. Removal of Cr +6 using particles based on bamboo leaf. 13.

Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(3), 331-340.

Perú, 83(3), 331-340.



- Medina, E. C. (2008). Estudio De La Adsorción De Cromo Hexavalente Como Biomaterial La Ectodermis De Opuntia. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 10(1), 16-31.
- Mehmood, K., Ahmad, H. R., & Saifullah. (2019). Quantitative assessment of human health risk posed with chromium in waste, ground, and surface water in an industrial hub of Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(9), 283. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4470-5>
- Meneses Barroso, Y. M. M., Patiño Mantilla, P. A. P., & Betancur Perez, J. F. B. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de *Spirulina* sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10(1), 141-152. <https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
- Metcalf & Eddy. (s. f.). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*.
- Millan Rincon, A. M. (2018). *Comparación y análisis de métodos de biorremediación en aguas residuales industriales para la extracción del cromo hexavalente*. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/20939>
- Minas, F., Chandravanshi, B., & Leta, S. (2017). Chemical precipitation method for chromium removal and its recovery from tannery wastewater in Ethiopia. *Chemistry International*, 3, 291-305.
- Mohan, D., & Pittman Jr., C. U. (2006). Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 762-811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.060>
- Mohapatra, S., Kumar, M., Karim, A. A., & Dhal, N. K. (2020). Biochars evaluation for chromium pollution abatement in chromite mine wastewater and overburden of



- Sukinda, Odisha, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(13), 586.
<https://doi.org/10.1007/s12517-020-05532-2>
- Mullick, A., Moulik, S., & Bhattacharjee, S. (2018). Removal of Hexavalent Chromium from Aqueous Solutions by Low-Cost Rice Husk-Based Activated Carbon: Kinetic and Thermodynamic Studies. *Indian Chemical Engineer*, 60(1), 58-71.
<https://doi.org/10.1080/00194506.2017.1288173>
- Murgueitio, E., Pinto, W., & Landivar, J. (2015). Remoción de cromo (VI) a partir de agua sintética a nivel de laboratorio, mediante el uso de hidróxidos dobles laminares (HDL). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 81(2), 160-170.
- Myers, C. R. (2012). The effects of chromium(VI) on the thioredoxin system: Implications for redox regulation. *Free Radical Biology and Medicine*, 52(10), 2091-2107.
<https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2012.03.013>
- Naz, A., Mishra, B. K., & Gupta, S. K. (2016). Human Health Risk Assessment of Chromium in Drinking Water: A Case Study of Sukinda Chromite Mine, Odisha, India. *Exposure and Health*, 8(2), 253-264. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0199-5>
- Neelam, A. (2018). Determination of Chromium in the Tannery wastewater, Korangi, Karachi. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 15(4). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.15.555920>
- NIOSH. (2019). *CDC - Guía de bolsillo de NIOSH sobre riesgos químicos, Introducción*.
<https://www.cdc.gov/spanish/niosh/npg-sp/pgintrod-sp.html>
- OSHA. (2020). *Toxic Metals—Overview / Occupational Safety and Health Administration*.
<https://www.osha.gov/toxic-metals>
- Paternoster, M., Rizzo, G., Sinisi, R., Vilardi, G., Di Palma, L., & Mongelli, G. (2020). Natural Hexavalent Chromium in the Pollino Massif Groundwater (Southern



- Apennines, Italy): Occurrence, Geochemistry and Preliminary Remediation Tests by Means of Innovative Adsorbent Nanomaterials. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02898-7>
- Pinos, V., Dafinov, A., Medina, F., & Sueiras, J. (2016). Chromium(VI) reduction in aqueous medium by means of catalytic membrane reactors. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 1880-1889. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.03.008>
- Prado, C., Chocobar Ponce, S., Pagano, E., Prado, F. E., & Rosa, M. (2016). Differential physiological responses of two *Salvinia* species to hexavalent chromium at a glance. *Aquatic Toxicology*, 175, 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.03.027>
- Quispe Yana, R. F., Belizario Quispe, G., Chui Betancur, H. N., Huaquisto Cáceres, S., Calatayud Mendoza, A. P., & Yábar Miranda, P. S. (2019). CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS: CROMO, CADMIO Y PLOMO EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES EN EL RÍO COATA, PERÚ. *Revista Boliviana de Química*, 2(36.2). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.2.3>
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., Ruiz, J. O., & López, S. (2015). Uso de Microorganismos Nativos en la Remoción Simultánea de Materia Orgánica y Cr(VI) en una Celda de Combustible Microbiana de Biocátodo (CCM). *Información tecnológica*, 26(6), 77-88. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600010>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, 16(2), 66-77.
- Rincón, M., & María, A. (2018). *Comparación y análisis de métodos de biorremediación en aguas residuales industriales para la extracción del cromo hexavalente*. <http://repository.unad.edu.co/handle/10596/20939>



- Rivera-Martínez, E., Cárdenas-González, J. F., Martínez-Juárez, V. M., & Acosta-Rodríguez, I. (2015). Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de *Aspergillus niger* Resistente a Cromato. *Información tecnológica*, 26(4), 13-20. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000400003>
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12), 3372-3385.
- Romero-Sevilla, M. L., Sánchez-Cuadra, S. M., & Benavente Silva, M. (2018). Aplicación de quitosano modificado en el tratamiento de aguas residuales de tenerías. *Nexo Revista Científica*, 31, 104. <https://doi.org/10.5377/nexo.v31i2.6834>
- Romero-Sevilla, M. L., Sánchez-Cuadra, S. M., & Silva, M. B. (2018). Aplicación de quitosano modificado en el tratamiento de aguas residuales de tenerías. *Nexo Revista Científica*, 31(2), 104-119. <https://doi.org/10.5377/nexo.v31i2.6834>
- Russman, E. A. (s. f.). *Coal Combustion Residuals (CCRs) and the Occurrence of Hexavalent Chromium (Cr VI)*. 32.
- Salazar, B., Luque, J. C., Valverde, G. R., Salazar, R. J., Fuentes, J. P., & Salas, J. V. (2017). Estudio de la contaminación por cromo (Cr) en el río chili y parque industrial de río seco (PIRS), Arequipa – Perú 2015 -2016. *Veritas*, 16(1), 43-46.
- Shahid, M., Shamshad, S., Rafiq, M., Khalid, S., Bibi, I., Niazi, N. K., Dumat, C., & Rashid, M. I. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*, 178, 513-533. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.074>
- Shi, L., Zhang, X., & Chen, Z. (2011). Removal of Chromium (VI) from wastewater using bentonite-supported nanoscale zero-valent iron. *Water Research*, 45(2), 886-892. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.025>



- Singh. (2005). *Toxic Metals and Environmental Issues*. Sarup & Sons.
- Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., & Gupta, R. (2016). Heavy metals and living systems: An overview. *Indian Journal of Pharmacology*, 43(3), 246-253.
<https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505>
- Soto Rueda, E. M., Landazuri, P., & Loango, N. (2017). *Remoción de cromo hexavalente de aguas residuales con microorganismos adaptados a medios ricos en cromo*.
<http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/94110>
- Tabatabaee, A., Dastgoshadeh, F., & Tabatabaee, A. (2016). *Biosorption of Heavy Metals by Low Cost Adsorbents* / Zenodo. <https://zenodo.org/record/1112157#.X9HCadhKjIU>
- Tejada Tovar, C., Villabona Ortiz, Á., & Jiménez Villadiego, M. (2017). REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE SOBRE RESIDUOS DE CACAO PRETRATADOS QUÍMICAMENTE. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1), 139-147.
- Tirado Amador, L. (2015). Niveles de metales pesados en muestras biológicas y su importancia en salud- revisión de literatura. *Rev Nac Odontol*, 11, 83-99.
- Trueque, P. A. (2015). (PDF) *ARMONIZACION DE LOS ESTANDARES DE AGUA POTABLE EN LAS AMERICAS* | Carlos DeLeón—Academia.edu.
https://www.academia.edu/33056128/ARMONIZACION_DE_LOS_ESTANDARES_DE_AGUA_POTABLE_EN_LAS_AMERICAS
- US EPA, O. (2015, septiembre 22). *Chromium in Drinking Water* [Overviews and Factsheets]. US EPA. <https://www.epa.gov/sdwa/chromium-drinking-water>
- Villanueva Carrillo, A. (2017). «*Estudio de la Remoción de Cromo Hexavalente Presente en Solución Acuosa Empleando la Biomasa de la Musa Paradisiaca como Biosorbente*».
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/67625>



Zewail, T., & Yousef, N. (2015). Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. *Alexandria Engineering Journal*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.11.008>

Zhitkovich, A. (2011). Chromium in Drinking Water: Sources, Metabolism, and Cancer Risks. *Chemical Research in Toxicology*, 24(10), 1617-1629. <https://doi.org/10.1021/tx200251t>

Zissimos, A. M., Christoforou, I. C., Christofi, C., Rigas, M., Georgiadou, E. C., & Christou, A. (2020). Occurrence and Distribution of Hexavalent Chromium in Ground and Surface Waters in Cyprus. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02867-0>