

**Evaluación de la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños al Río
Cauca por medio de un proceso químico y biológico.**

Alexandra Hincapié Guerra
Natalia Puerto González

Código del proyecto:
1901-037

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, octubre de 2019

**Evaluación de la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños al Río
Cauca por medio de un proceso químico y biológico.**

Alexandra Hincapié Guerra
Natalia Puerto González

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Ambiental

Director: Liliana Figueroa Del Castillo
Codirector: José Francisco Ibla Gordillo

Línea de Investigación:
Medio Ambiente y salud.

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

Acta de sustentación

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Agradecimientos

Le agradecemos primeramente a nuestros directores Liliana Figueroa y José Francisco Ibla, por guiarnos, aportarnos su conocimiento y dedicarnos su tiempo; agradecemos a nuestras familias por darnos apoyo tanto económico como emocional, además de brindarnos su tiempo y espacio para colaborar tanto en la toma de muestras como en el montaje de las técnicas; también agradecemos a la Universidad El Bosque por brindarnos los espacios de los semilleros en donde nació nuestro gusto por investigar; así mismo le agradecemos al semillero ARPEMS y al semillero Geosuelos por brindarnos su apoyo, tiempo y aportes para mejorar en diferentes aspectos; agradecemos a la Ingeniera Laura Cabezas por brindarnos sus conocimientos y apoyo con la aplicación Survey 123; y por último agradecemos a la Policía Nacional y a la comunidad de Floralia por brindarnos su acompañamiento en la toma de muestras.

1. Tabla de contenido

6. Introducción	1
7. Planteamiento del problema:	1
Pregunta de investigación	3
8. Justificación.....	4
9. Objetivos:	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos:	7
10. Marco de referencia:.....	8
10.1. Marco geográfico:.....	8
10.2. Marco conceptual:.....	12
10.3. Estado del arte:.....	14
10.4. Marco teórico:	20
10.5. Marco normativo:.....	24
10.6. Marco institucional:	25
11. Metodología	26
Fase I.....	28
Fase II.....	29
Fase III	30
12. Resultados, análisis y discusión:	32
Objetivo 1:.....	32
Objetivo 2:.....	46
Objetivo 3:.....	53
13. Conclusiones.....	69
14. Recomendaciones:	¡Error! Marcador no definido.
15. Referencias Bibliográficas	69
16. Anexos:	80

2. Listado de Tablas

Tabla 1. Relación entre las necesidades por satisfacer, con el problema y las oportunidades encontradas en cada una.	5
Tabla 2. Características de la unidad cartográfica de la zona de estudio	11
Tabla 3. Normas técnicas.	24
Tabla 4. Normas legales.	25
Tabla 5. Matriz de los objetivos específicos del proyecto.....	26
Tabla 6. Matriz de información de metodologías utilizadas para la reducción, acumulación o eliminación del cromo en suelos, basadas en procesos biológicos.	33
Tabla 7. Matriz de información de metodologías utilizadas para la reducción, acumulación o eliminación del cromo en suelos, basadas en procesos químicos.....	37
Tabla 8. Requerimientos en un proceso químico y biológico para reducir cromo total.	42
Tabla 9. Resultados fisicoquímicos de las muestras.	47
Tabla 10. Cantidad de cromo según la normatividad.....	47
Tabla 11. Rangos de porcentaje de humedad establecidos en el libro del IGAC (2016).....	49
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas de los suelos.	50
Tabla 13. Convenciones de los ensayos realizados.....	53
Tabla 14. Diseño experimental proceso biológico.....	53
Tabla 15. Concentración de cromo total en las muestras de suelo de la zona de Floralia.	55
Tabla 16. Concentración de cromo total en las muestras de suelo de la zona de Juanchito.....	55
Tabla 17. Concentración de cromo total en las muestras de material vegetal de la zona de Floralia.	55
Tabla 18. Concentración de cromo total en las muestras de material vegetal de la zona de Juanchito.	56
Tabla 19. Concentración de cromo total en las muestras de material vegetal de la zona de Juanchito.	56
Tabla 20. Convenciones de la variable tiempo y concentración.....	58
Tabla 21. Diseño experimental proceso químico.....	58
Tabla 22. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Juanchito al día ocho.....	61
Tabla 23. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Floralia al día ocho	62
Tabla 24. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Juanchito al día cuatro	63
Tabla 25. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Floralia al día cuatro	63
Tabla 26. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Juanchito al día dos.....	64
Tabla 27. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Floralia al día dos	64
Tabla 28. Valores para evaluar la eficiencia con cada parámetro establecido	68
Tabla 29. Rangos de evaluación de la eficiencia.	68
Tabla 30. Comparación de la eficiencia en el proceso químico y biológico	68
Tabla 31. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de los tres puntos de muestreo en Floralia.....	82
Tabla 32. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de los dos puntos de muestreo en Juanchito.	83
Tabla 33. Resultados de las propiedades fisicoquímicas del blanco en ecoparque La Bandera	84

3. Listado de Figuras

Ilustración 1. Árbol de problemas del proyecto	3
Ilustración 2. Objetivos de desarrollo sostenible.	6
Ilustración 3. Mapa de la relación con las ciencias ambientales y en el área investigada.....	7
Ilustración 4. Mapa de la ubicación del Río Cauca	8
Ilustración 5. Distribución de las cuencas del Río Cauca.....	9
Ilustración 6. Unidad cartográfica de la zona de estudio.....	11
Ilustración 7. Mapa de la distancia de la primera industria metalúrgica al río Cauca.....	17
Ilustración 8. Mapa de la distancia de los cultivos al río Cauca.	17
Ilustración 9. Servicios ambientales que ofrece la matriz suelo	21
Ilustración 10. Tipos de contaminación del suelo (local y difusa).....	21
Ilustración 11. Instituciones participantes en el proyecto.....	25
Ilustración 12. Metodología para evaluación de la reducción de cromo total en muestras de suelo aledañas al Río Cauca.	28
Ilustración 13. Metodología para la realización de la matriz de información	29
Ilustración 14. Metodología para el muestreo de suelos aledaños al Río Cauca	30
Ilustración 15. Metodología para el proceso Nanotecnológico.....	31
Ilustración 16. Metodología para el proceso de fitorremediación.....	32
Ilustración 17. Mecanismo biológico de la leonardita.....	43
Ilustración 18. Mecanismo biológico de la leonardita.....	44
Ilustración 19. Estructura cristalina de las nanopartículas de $MnFe_2O_4$	45
Ilustración 20. Diagrama del mecanismo químico, en el que el cromo se adhiere en los espacios vacíos de la estructura cristalina de las nanopartículas de $MnFe_2O_4$	46
Ilustración 21. Gráfica de la concentración de cromo de las seis muestras relacionada con los rangos de la EPA.	48
Ilustración 22. Triángulo textural.....	49
Ilustración 23. Gráfica del porcentaje de humedad de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.....	50
Ilustración 24. Gráfica del porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.....	51
Ilustración 25. Gráfica del pH de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.....	52
Ilustración 26. Gráfica de la CIC de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.	52
Ilustración 27. Implementación de proceso biológico (fitorremediación).....	54
Ilustración 28. Implementación de proceso químico (nanopartículas).....	59
Ilustración 29. Micrografía de las nanopartículas con una magnificación de 43800 X, una intensidad del haz de 20,0 kV, y una escala de 2 μm	59
Ilustración 30. Micrografía de las nanopartículas con una magnificación de 147000 X, una intensidad del haz de 20,0 kV, y una escala de 1 μm	60
Ilustración 31. Micrografía de las nanopartículas con una magnificación de 273000 X, una intensidad del haz de 20,0 kV, y una escala de 500 nm.....	60
Ilustración 32. Gráfica de relación entre la concentración de nanopartículas y la concentración de cromo total al día 8.....	62
Ilustración 33. Gráfica de relación entre la concentración de nanopartículas y la concentración de cromo total al día 4.....	64

Ilustración 34. Gráfica de relación entre la concentración de nanopartículas y la concentración de cromo total al día 2.....	65
Ilustración 35. Gráfica de relación entre el porcentaje de reducción de cromo y lo días de implementación en Floralia.	66
Ilustración 36. Gráfica de relación entre el porcentaje de reducción de cromo y lo días de implementación en Juanchito.	67
Ilustración 37. Río Cauca, límite entre Calí y Juanchito	80
Ilustración 38. Cultivos de caña de azúcar en Juanchito en la orilla del río Cauca.	80
Ilustración 39. Tubería que desemboca en el río Cauca, barrio Floralia	81
Ilustración 40. Río Cauca, barrio Floralia.....	81
Ilustración 41. Recolección de muestras, barrio Floralia	82
Ilustración 42. Implementación del método.....	85
Ilustración 43. Preparación de la leonardita.....	85
Ilustración 44. Adecuación de las condiciones	86
Ilustración 45. Preparación de las soluciones base.....	86
Ilustración 46. Calentamiento de la solución	87
Ilustración 47. Proceso de lavados	87
Ilustración 48. Proceso de secado.....	88
Ilustración 49. Proceso en el sonicador después de realizar los montajes.....	88

4. Resumen

La contaminación por cromo en los suelos aledaños a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca, representa un reto investigativo, ya que las altas concentraciones del metal pesado causan problemas sociales, económicos y ecológicos por la proliferación de enfermedades que se propagan bien sea por el contacto o por el uso del mismo, la alteración de las actividades económicas de la zona, y la pérdida de calidad ambiental del recurso suelo por la bioacumulación de cromo total. Es por tanto, que el objetivo general del proyecto se centró en evaluar la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca, por medio de un proceso químico y de biológico, este proceso se inició con la búsqueda bibliográfica de artículos de procesos químicos y biológicos, luego se caracterizaron y cuantificaron las muestras por medio de absorción atómica, y por último se aplicaron los métodos seleccionados haciendo uso de nanopartículas de ferrita de manganeso y una simbiosis entre la lechuga (*Lactuca sativa*) y la leonardita. Finalmente, se concluye que el proyecto es pionero en la aplicación de los dos métodos a nivel nacional, además de confirmar la hipótesis en la que se plantea que el método químico es tres veces más eficiente en comparación al biológico, ya que las nanopartículas tuvieron un tamaño aproximado de 4 a 15 nm.

Palabras clave: Contaminación del suelo, cromo total, fitorremediación, nanotecnología, técnicas.

5. Abstract

Chromium contamination in soils near the Valle del Cauca basin of the Cauca River represents a research challenge, since high concentrations of heavy metal cause social, economic and ecological problems because the proliferation of diseases that spread through the contact or by the use of it, the alteration of the economic activities of the area, and the loss of environmental quality of the soil resource due to the bioaccumulation of total chromium. Therefore, the general objective of the project was evaluate the reduction of total chromium in samples of soils near to the Valle del Cauca basin of the Cauca River, through a chemical and biological process, using nanoparticles of ferrite manganese and a symbiosis between lettuce (*Lactuca sativa*) and leonardite. Finally, it is concluded that the chemical method represents greater efficiency, since it obtained a percentage reduction in chromium concentration of 61.998% compared to the biological method that obtained a percentage of 8.356%.

Keywords: Nanotechnology, phytoremediation, soil pollution, techniques, total chromium.

6. Introducción

La contaminación ambiental según Téllez (2004) se posiciona como uno de los problemas más importantes que ha causado mayores afectaciones en el último siglo, siendo la alteración o pérdida de los recursos suelo, agua y aire una de las preocupaciones más relevantes a nivel investigativo, resaltando que el sector industrial, agrícola y minero son los mayores aportantes para que se produzca una alteración en las tres esferas ambientales. Uno de los elementos utilizados en estas actividades es el cromo, este es un metal pesado que en altas concentraciones no se degrada fácilmente en el medio por lo que se bioacumula, generando así que se transporte en la cadena trófica afectando no solo la salud humana sino también la ambiental. Las actividades mencionadas hacen parte de la economía de la población caleña, causando así la presencia del cromo en altas concentraciones en el río Cauca afectando la calidad de este cuerpo de agua y de sus suelos aledaños.

Esta contaminación ha generado diversas problemáticas, ya que la concentración del metal pesado causa afectaciones ambientales, por la alteración de las propiedades fisicoquímicas y biológicas y con ello la pérdida de calidad ambiental del recurso suelo, además de afectar la dinámica ecosistémica de la zona y por tanto los servicios ecosistémicos de la misma. También genera afectaciones a la salud pública por la proliferación de enfermedades que se propagan bien sea por el contacto o por el uso del mismo; y afectaciones en las actividades económicas de la población.

Aunque en la revisión bibliográfica se evidenciaron diferentes técnicas tanto químicas como biológicas para la reducción o remoción de los metales pesados, los estudios a nivel internacional que analizan la reducción del cromo son únicamente a escala laboratorio, en las que según Espinosa & Mera (2015) involucran transformaciones químicas y biológicas llevadas a cabo por microorganismos y fitorremediación; o como lo plantea Artunduaga (2008) por medio de tratamientos físico químicos, ósmosis inversa, evaporación e intercambio iónico, resaltando el físico químico ya que es el más económico y usado. También se abordan alternativas ambientales como fotocátalisis heterogénea y bioadsorción (Vílchez, 2005); o la combinación de carbón activado con biomasa (Reyes et al, 2006); mientras que Ramírez et al (2009) indica que los sistemas biológicos pueden ser una de las medidas más eficientes, lo cual se corrobora en un estudio que menciona la adecuada y benéfica interacción que presentan los microorganismos y plantas con los metales pesados (Vullo, 2003). Mientras que a nivel nacional no se encuentran estudios en el río Cauca y sus alrededores y por ende no evalúan ni aplican las técnicas mencionadas para la reducción o eliminación del cromo total; es por ello que se pretende con este proyecto comparar la eficiencia que tiene un proceso químico y biológico al reducir la concentración de cromo total en muestras de suelo cercanas a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca.

En la revisión bibliográfica realizada se evidenció que los sistemas biológicos representan un menor porcentaje en la reducción del metal ya que se involucra una mayor cantidad de variables como lo son el tiempo, el medio, la compatibilidad, entre otras, en comparación con los sistemas químicos, y es por ello que se plantea como hipótesis que el sistema químico representará una mayor eficiencia que el proceso biológico en la reducción del cromo en los suelos aledaños al río Cauca.

7. Planteamiento del problema:

En Colombia los vertimientos a los cuerpos de agua de las diferentes actividades económicas se distribuyen de la siguiente manera: el sector doméstico aporta el 27%, el agrícola el 54%, y la industria

el 19% (Pérez, 2015), siendo los dos últimos sectores según Chávez (2010) y Londoño, Londoño & Muñoz (2016) los que más contribuyen a la contaminación en aguas y suelos por metales pesados; en donde el suelo representa un recurso que regula los procesos geodinámicos, biogeoquímicos y ecológicos responsables de la estabilidad y oferta biológica, cumplen funciones hidrodinámicas y ecológicas por la captación y regulación de las aguas lluvia y de escorrentía, y asimismo, en su base geoquímica contienen metales pesados en concentraciones traza naturalmente; además, el recurso suelo presenta una diversidad de servicios ecosistémicos como el soporte para la producción de alimentos y su importancia en la mitigación de los efectos del cambio climático debido a la dinámica del carbono (Mahecha et al, 2017).

Sin embargo, dichas funciones, junto con las propiedades fisicoquímicas, se están viendo mayormente afectadas y alteradas por la diversidad de actividades antrópicas en la zona de estudio, como la alta concentración de empresas metalmeccánicas ubicadas en el norte de la ciudad de Cali, la minería que se lleva a cabo en el parque Nacional Natural los Farallones, y la agricultura en la orilla del río Cauca. (Chávez, 2010). Existen diferentes procesos como la fabricación de colorantes y pigmentos, la conservación de la madera (Gutiérrez, 2008), en la producción de aceros y aleaciones (Plaza, 2012) entre otros, que utilizan cromo como materia prima, el cual finalmente se deposita como residuo en el suelo o cuerpo de agua del río Cauca. Es por ello que uno de los metales pesados que afecta por sus altas concentraciones en el río ha sido el cromo, ya que la bioacumulación de este en los recursos de agua y suelo genera un desequilibrio (Plaza, 2012) al incorporarse en la cadena trófica, y transportarse por este medio de individuo a individuo (biomagnificación).

Estos cuerpos de agua contaminados con altas concentraciones de cromo, son utilizados para irrigar el suelo aledaño por la presencia de cultivos, generando una afectación por dicha contaminación, y por ende una alteración del equilibrio ecosistémico, ya que este representa un recurso natural no renovable que almacena grandes cantidades de agua y nutrientes, que por tanto permite el desarrollo de la vida y llevar a cabo las actividades económicas productivas.

De acuerdo con lo anterior, es posible que la matriz suelo presente contaminación por cromo total, afectando sus propiedades fisicoquímicas y biológicas como pH, materia orgánica, contenido y tipo de arcillas, óxidos del hierro, manganeso y aluminio, carbonatos, condiciones de óxido-reducción y pérdida de la fauna edáfica (Navarro & Ramirez, 2015); esto representa una problemática porque en Colombia no existe un marco legal que establezca los valores máximos permitidos de concentración de metales pesados en suelo y por ello, se toma como referencia lo emitido por la EPA (Environmental Protection Agency), la cual indica un máximo de 500 $\mu\text{g/kg}$ en suelo (Mahecha et, 2015); además, se evidencia la importancia de estudiar el cromo, ya que son escasos los estudios de suelos agrícolas contaminados por este metal en la zona aledaña al río Cauca y por ello se toma como referencia un estudio de Bonilla & Lora (2010), en el que evaluaron la remediación del suelo cercano a la cuenca alta del río Bogotá contaminado por cadmio y cromo, el cual arrojó que la lechuga (*Lactuca sativa*) y el pasto ryegrass (*Lolium perenne*) fueron eficientes a la hora de reducir los metales en las muestras de suelo, además del estudio de Navarro & Ramirez (2015) en el que durante aproximadamente un año se hizo un análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía-Villavicencio por medio de la metodología de la NTC 3888 y NTC 3934, y por último se encuentra el estudio de Mahecha et (2015) en el que se observó el contenido de metales pesados en suelos agrícolas en la región del Ariari, Departamento del Meta de acuerdo con el método de digestión de ácido nítrico, ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno y espectrofotometría de absorción atómica que permitió evidenciar la movilización de los metales en la matriz suelo - planta.

Finalmente se evidencia que el problema central de la investigación es que no se ha establecido una técnica eficiente que permita la reducción de cromo total en los suelos aledaños a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca, lo cual genera altas concentraciones del metal en el suelo y por ende afectaciones ambientales y sociales como se observa en la *figura 1*, ya que este metal es una especie no degradable que en altas concentraciones se distribuye dependiendo de diferentes factores y procesos, representando una alta toxicidad (Arboleda et al, 2017), además de ser un poderoso carcinógeno que puede atender contra la salud humana (Téllez et al, 2004), en donde la alta concentración del mismo en el suelo aumenta progresivamente.



Ilustración 1. Árbol de problemas del proyecto.

Fuente: Autores, 2019

Pregunta de investigación

¿Qué técnica representa una mayor eficiencia en la reducción de cromo total en muestras de suelos aledaños a la Cuenca Valle del Cauca del Río Cauca?

8. Justificación

La contaminación por cromo en la cuenca Valle del Cauca del río Cauca y sus suelos aledaños, constituye diversas afectaciones, ya que los medios que juegan un papel de receptores potenciales se están viendo afectados, teniendo repercusiones negativas sobre el medio y las comunidades aledañas (Fernández, 2013), lo cual se refleja en el estudio de Lozada (2012) en el que indica que la causa de una mortandad masiva de peces se presentó por la alteración de las condiciones fisicoquímicas del agua, ya que este cuerpo tenía una alta concentración de metales pesados como cadmio, plomo, mercurio y cromo, donde estos últimos superan no solo los niveles permisibles en peces (0,01 ppm), sino que también superan los niveles letales (0.1 ppm y 0.05 ppm). Así mismo, estas comunidades se encuentran en riesgo (Ministerio de Educación, 2011), debido a que los metales pesados pueden llegar a ser ingeridos por las personas a través de alimentos.

El suelo tiene la capacidad de actuar como filtro, lo cual genera afectación cuando este es irrigado con aguas contaminadas por cromo o por contaminación directa, ya que este logra solubilizar los contaminantes dependiendo de sus propiedades fisicoquímicas como lo son el porcentaje de materia orgánica, contenido de humedad, textura, entre otras, es decir que si dichas propiedades son óptimas para la movilización y oxidación del metal esta matriz se verá afectada con el tiempo alterando su calidad ambiental; por lo anterior se considera necesario evaluar la concentración de cromo total en el suelo por la capacidad que tiene el contaminante para bioacumularse y biomagnificarse, lo cual representa diversas afectaciones a la salud, ya que este es el recurso que utilizan las comunidades aledañas para sostenerse económicamente por la diversidad de cultivos (Caña de Azúcar, 181.663 ha; Café, 67,573 ha; Plátano, 30.364 ha; Maíz tecnificado, 14,686 ha, Caña panelera, 7,151 ha, Banano 7,063 ha, Cítricos 6,368 ha, Chontaduro 3,305 ha, Arroz Mecanizado 3,038, Maíz tradicional 3,038 ha y otros cultivos 29,458 ha) que están sembrados en la zona (Ministerio de Agricultura, 2014), los cuales se han visto afectados por la alteración de las propiedades físico químicas del suelo.

La problemática descrita anteriormente ha estimulado la investigación, ya que uno de los principales impedimentos es que no existen demasiadas rutas de metabolización o degradación, y las pocas que existen tienen una capacidad limitada (Martín, 2008), por lo que se presenta la necesidad de caracterizar, analizar y remediar dichos medios a través de una adecuada gestión y aplicación de técnicas eficientes. Es por ello que desde el punto de vista tecnológico, el uso del proceso químico y biológico son novedosos en la zona de estudio, ya que la mayoría de dichas técnicas no se han utilizado mayormente en el país, puesto que una gran parte de los procesos investigados, se han realizado a nivel internacional, y en los departamentos del Meta y Cundinamarca; además de ello específicamente en la zona de estudio no se evidencia que dicho metal haya sido cuantificado, y por ende no se han aplicado ningún tipo de técnicas para la disminución de la concentración del cromo, es decir que el presente proyecto fue pionero en la zona estudio. Con los resultados obtenidos se aportó datos significativos acerca de la concentración del metal en los suelos y así mismo, se evidenció el proceso más eficiente para aplicar en la zona y disminuir la presencia del cromo en los suelos aledaños a la cuenca.

El éxito del proyecto planteado proporcionará a largo plazo un beneficio indirecto para la comunidad aledaña a la zona de estudio, ya que mejoraría considerablemente la calidad de vida como se observa en la *Tabla 1* en la que se relacionan las necesidades por satisfacer, el problema y las oportunidades de la comunidad aledaña a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca; así como la ambiental, puesto que pretenderá mejorar la calidad del recurso suelo cercano a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca,

evaluando por medio de un análisis y comparación la eficiencia que puede tener un proceso biológico y químico para la reducción de la concentración de cromo, proporcionando beneficios para los ecosistemas aledaños; además, el proyecto pretende aportar con el cumplimiento de dos de los objetivos del desarrollo sostenible, en donde el primero de ellos, es el de la salud y bienestar que se enfoca en garantizar calidad de vida a la población aledaña; y el segundo objetivo que se centra en la vida de ecosistemas terrestres, como se puede apreciar en la Figura 2.

Tabla 1. Relación entre las necesidades por satisfacer, con el problema y las oportunidades encontradas en cada una.

Necesidades por satisfacer	Problema por resolver	Oportunidades por aprovechar
Mejorar la calidad de vida de la población aledaña a la cuenca de Valle del Cauca del río Cauca	Alteración de condiciones naturales, culturales y económicas del lugar.	Utilizar tecnologías ambientales y eficientes en las PTAP del municipio.
Recuperar las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos aledaños de la cuenca de Valle del Cauca del río Cauca	Los vertimientos de efluentes domésticos, industriales y agrícolas con altas concentraciones de cromo VI al Río Cauca.	Utilizar sistemas que reduzcan el cromo hexavalente en el Río Cauca y sus suelos aledaños.
Recuperar las propiedades fisicoquímicas en la cuenca de Valle del Cauca del río Cauca	Control de vertimientos de efluentes que son tratados previamente con tecnologías obsoletas (PTAR).	Proponer a comunidad e instituciones gubernamentales y ambientales el desarrollo de estudios de las propiedades fisicoquímicas del agua del Río Cauca.
Aumento de la producción pesquera y agrícola para mejorar la economía del sector.	Contaminación por cromo VI de los recursos con los que se llevan a cabo actividades económicas.	Proponer métodos de agricultura y piscicultura sostenible en el sector.
Disminuir enfermedades causadas por el consumo y asimilación del cromo en el organismo humano.	Bioacumulación de cromo VI en el cuerpo humano por la cadena trófica (alimentos y suministro de agua).	Utilizar sistemas que reduzcan el cromo hexavalente en el Río Cauca y sus suelos aledaños, para evitar la bioacumulación en la cadena trófica.
Evitar la extinción de especies de fauna y flora de la zona.	Altas concentraciones de cromo VI presentes en los recursos suelo y agua.	Utilizar sistemas que reduzcan el cromo hexavalente en los ecosistemas cercanos al Río Cauca y sus suelos aledaños, que sirven como hábitat de diferentes especies.

Fuente: (Autores, 2018).



Ilustración 2. Objetivos de desarrollo sostenible. **Fuente:** ONU, 2019

Los temas mencionados anteriormente van de la mano con la línea de investigación de saneamiento ecológico, salud y medio ambiente, debido a que tratan las problemáticas que sufre el suelo y el recurso hídrico y una manera eficiente para remediarlos; así mismo se encuentra enmarcado dentro de la rama Gestión Sostenible del Suelo propuesta por el programa de Ingeniería Ambiental y está estrechamente relacionado con el pensum de la carrera y con el perfil del egresado que propone la Universidad El Bosque, lo cual se encuentra relacionado en el Mapa de la relación con las ciencias ambientales y en el área investigada en la Figura 3. Finalmente, se determina que el alcance del proyecto se centra en establecer las condiciones actuales del suelo y comparar el sistema químico y biológico por medio estudios descriptivos y correlacionales y el límite se basa en la implementación de los métodos a escala laboratorio.

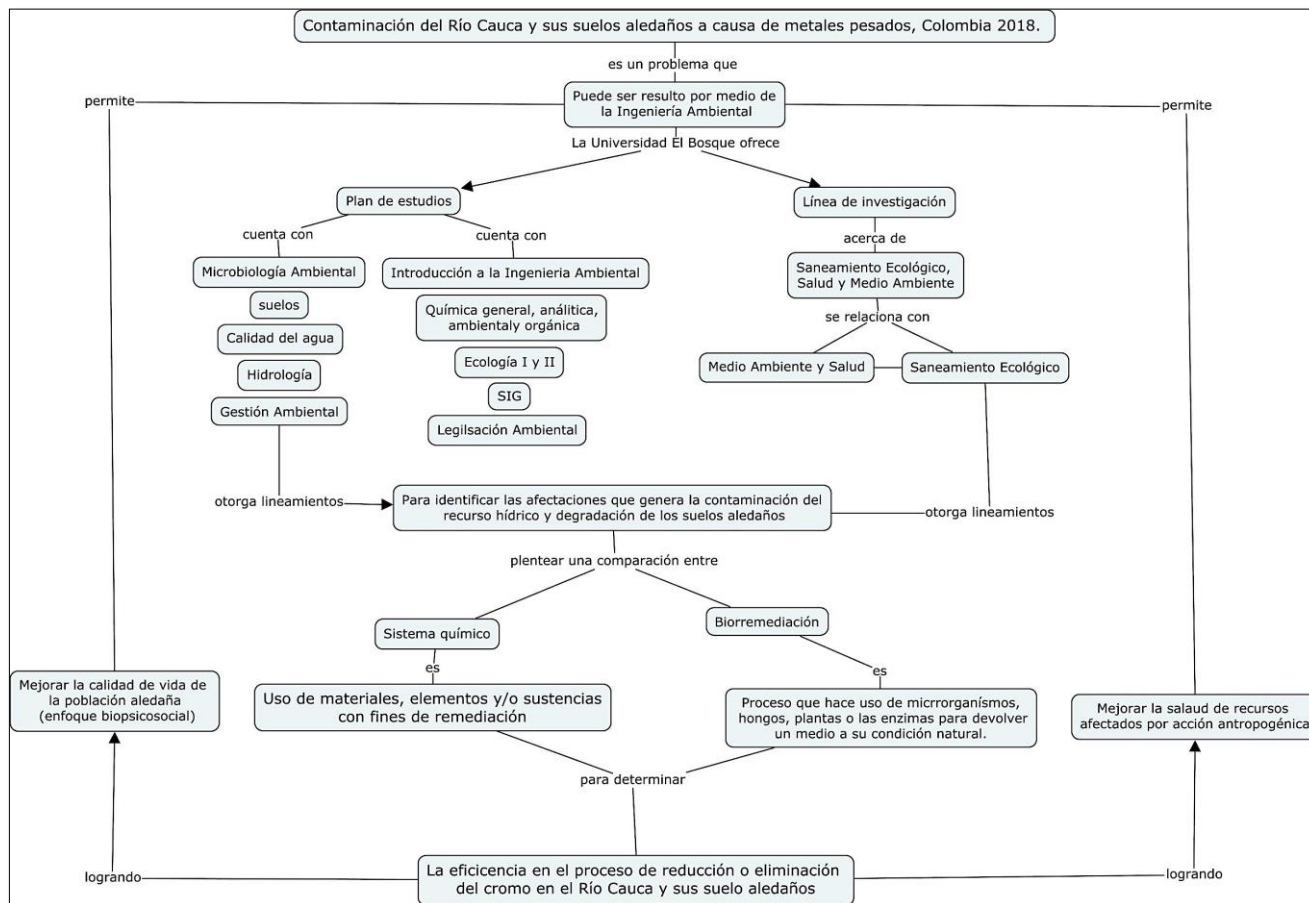


Ilustración 3. Mapa de la relación con las ciencias ambientales y en el área investigada.

Fuente: Adaptada de (Universidad El Bosque, 2018); (IUPAC, 2006); (Cruz, 2007).

9. Objetivos:

A continuación, se presenta el objetivo general y los específicos planteados para el siguiente proyecto:

Objetivo general

Evaluar la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca, por medio de un proceso químico y de biológico.

Objetivos específicos:

1. Determinar a través de una matriz de información los requerimientos necesarios del procesos químico y biológico, para reducir el cromo total en las muestras de suelo.
2. Caracterizar química y físicamente las muestras de suelo y cuantificar la concentración de cromo total en las mismas.
3. Comparar la eficiencia del proceso químico y biológico en la reducción de la concentración de cromo total en las muestras de suelo.

10. Marco de referencia:

10.1. Marco geográfico:

La zona de estudio está localizada en la cuenca valle del cauca perteneciente a la cuenca del río cauca, a continuación, se explicará específicamente cada área:

- Río Cauca:** El Río Cauca nace en el departamento de Cauca y desemboca a la altura de la población de Pinillos en el departamento de Bolívar al norte del país como se puede apreciar en la *Figura 4*, este atraviesa más de 180 municipios en los departamentos de Cauca, Valle del Cauca, Risaralda, Caldas, Antioquia, Sucre y Bolívar y es el principal afluente del río Magdalena (Páez, 2015). El río cuenta con una longitud total de 1350 km y una cuenca hidrográfica de 63300 km² aproximadamente y se divide en 4 tramos: alto Cauca, Valle del Cauca, Cauca Medio y Bajo Cauca, como se evidencia en la *Figura 5*. El tramo del cuerpo de agua evaluado en el presente proyecto parte desde la desembocadura del río Jamundí hasta el límite entre Cali y Yumbo, el cual recibe una carga contaminante de aguas negras (domésticas e industriales) perteneciente al Canal Interceptor, 11 km después encuentra la planta de potabilización de Puerto Mallarino que toma el 80% del agua que consume la ciudad, 3,4 km después pasa por una planta de tratamiento de aguas residuales de Cañavalejo, y para finalizar su recorrido pasa por el centro industrial de Yumbo (Alcaldía de Santiago de Cali, 2018).

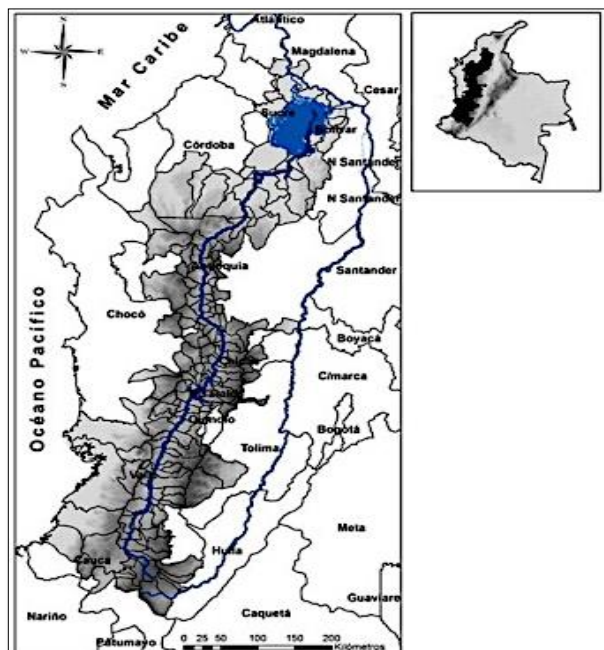


Ilustración 4. Mapa de la ubicación del Río Cauca.

Fuente: Pérez, 2015. Obtenida el 16 de noviembre de 2018 de:
http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_225.pdf

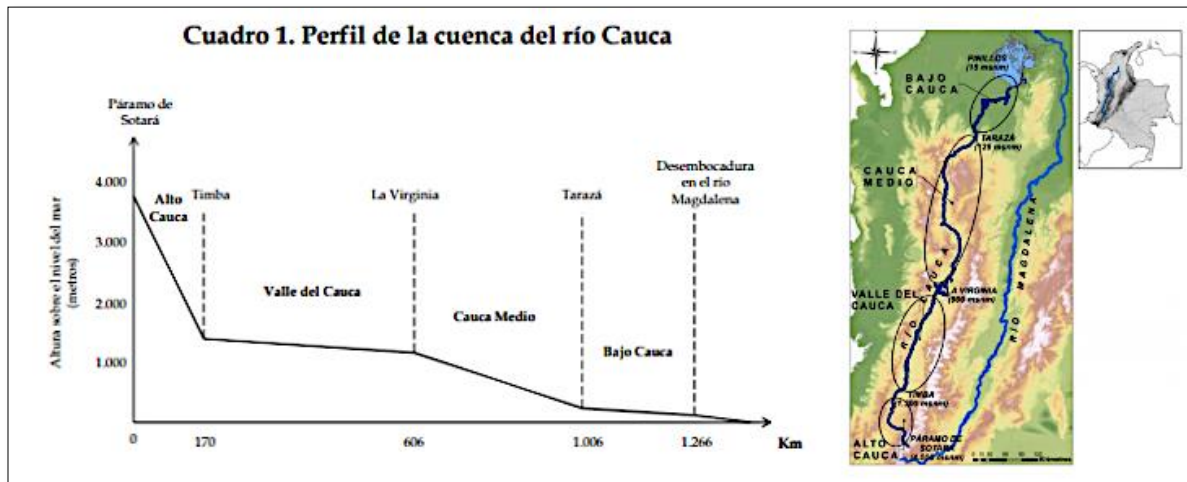


Ilustración 5. Distribución de las cuencas del Río Cauca.

Fuente: Pérez, 2015. Obtenida el 16 de noviembre de 2018 de:
http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_225.pdf

- **Cuenca Valle del Cauca:**

El muestreo para llevar a cabo el proyecto se realizará en la cuenca de Valle del Cauca del río Cauca, específicamente en el tramo de Jamundí a Cali.

→ **Clima:** Presenta un clima tropical caracterizado por sus temperaturas altas y uniformes durante todo el año (Páez, 2015), además la franja comprendida entre las latitudes 0° y 10° N y las longitudes 75° y 80° W transporta aire húmedo proveniente del océano pacífico, con presencia de brisa marina que penetra al Valle del Cauca.

La temperatura de acuerdo con los registros de la estación del aeropuerto, oscilan entre 23.2 y 24.2 °C, presentándose los valores más bajos de temperaturas entre los meses de octubre a diciembre siendo el mes de noviembre el de menores temperaturas y siendo el mes de marzo el que mayor temperatura presenta. La precipitación es de origen convectivo u orográfico (Páez, 2015) y su promedio anual es de 908.5 mm, en donde se presenta un régimen de tipo bimodal, con un periodo inicial de lluvias entre marzo y mayo, y una segunda temporada entre los meses de septiembre a noviembre.

→ **Hidrología:** Los afluentes más importantes sobre la margen derecha son los ríos Ovejas, Palo, Anaime, Guadalajara, Tulua, Bugalagrande y la Vieja; sobre la margen izquierda los afluentes más importantes son los ríos Jamundí, Timba, Riofrío, Cañaveral y Risaralda. En el sector analizado, el río Pance desemboca en el Jamundí y éste en la margen izquierda del río Cauca; en la margen derecha el río Palo desemboca en el río Cauca (Páez, 2015). Existe una variación mensual de caudales medios, teniendo un régimen de tipo bimodal, con un caudal medio máximo de 230 m³/s con una temporada de altos caudales entre noviembre y diciembre, y los caudales más bajos entre agosto y septiembre.

- **Santiago de Cali:**

Santiago de Cali es la capital del departamento Valle del Cauca, esta ciudad cuenta con una extensión de 564 km², una altitud de 995 m.s.n.m, y una temperatura media de 23 °C y una densidad poblacional estimada según el DANE (2018) de 2.445.405 habitantes, con un alto porcentaje de población afro-colombiana de aproximadamente un 26%, que está representada con una edad menor de 40 años, con una mayor proporción de mujeres (Alcaldía de Santiago de Cali, 2018).

Cali cuenta con varios ríos que descienden de la Cordillera Occidental, en el norte del municipio nace la Quebrada el Chocho y el río Aguacatal, en el occidente del municipio nace el río Cali y el río Pichindé, en el centro del Municipio nacen los ríos Cañaveralejo, Meléndez y Lili, terminando en el Canal Interceptor, y por último en el Corregimiento de Pance, nace el río homónimo que a su vez desemboca en el río Cauca al suroriente del municipio.

En cuanto a los suelos del área rural la fertilidad se clasifica de muy baja a moderada (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2000), en donde la parte baja, comprende la llanura aluvial del río Cauca, conformada por diques y los basines del río, formados por depósitos aluviales finos como limos y arcillas. En este sector se encuentran suelos con características morfológicas que dependen de la dinámica del río; mientras que los suelos del conjunto Juanchito, Coque y La Barca tienen una alta fertilidad, la cual se limita parcialmente por las condiciones de drenaje superficiales. Así mismo, el POT identificó que por distintas actividades antropogénicas de las 56.025 hectáreas de la zona, 24.199 hectáreas poseen problemas de erosión.

Además, se identificó que la zona de estudio pertenece al subgrupo de suelo *Typic Ustifluvents* (IGAC, 2019), el cual es desarrollado a partir de sedimentos aluviales moderadamente gruesos a moderadamente finos, también cuentan con una baja capacidad de intercambio catiónico en combinación con los bajos contenidos de carbono orgánico y fósforo aprovechable, los cuales son responsables de un nivel de fertilidad medio a bajo y pertenecen al orden Entisol (Chinchilla, Mata & Alvarado, 2011). El orden Entisol representa los suelos jóvenes, no evolucionados, con depósitos de arena pura, formados por aluviones, y pobres en materia orgánica. Cabe resaltar que los suelos de la zona de estudio se caracterizan por tener una geoforma de albardón de orilla, la cual se localiza en la orilla de los ríos con textura arenosa dominante, ser bien drenados, moderadamente profundos, limitados por el nivel freático, ser de neutros a fuertemente alcalinos, y una fertilidad moderada como se observa en la *Tabla 2* y *Figura 6*, donde se evidencian las características de la unidad cartográfica (UCS). A continuación, se evidencia gráficamente el tipo de suelo que se encuentra en la zona de estudio:

Unidad Cartográfica de Suelos Muestreados

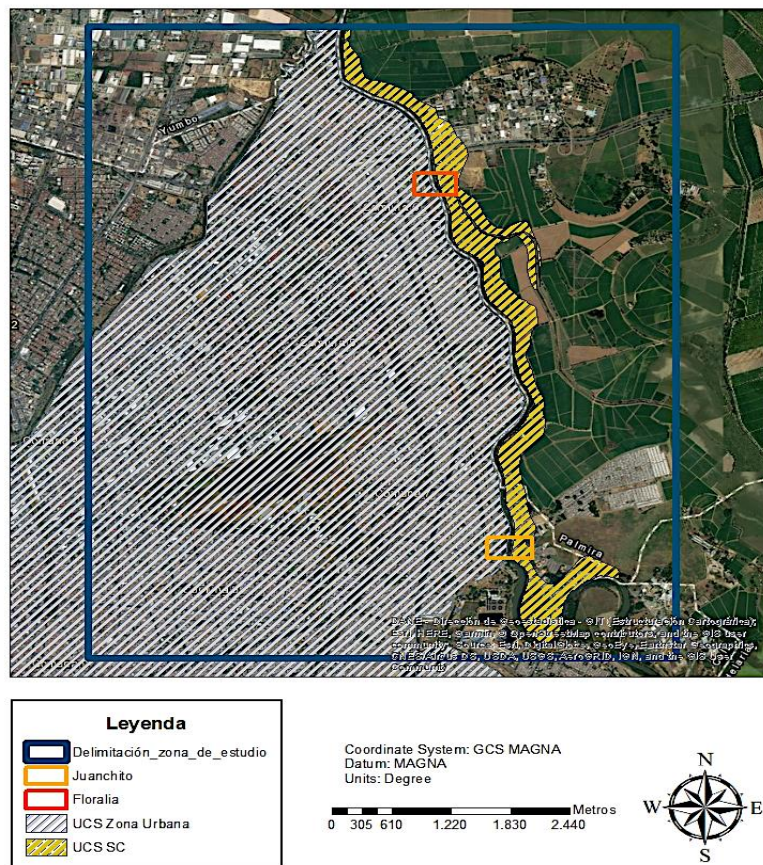


Ilustración 6. Unidad cartográfica de la zona de estudio.

Fuente: Autores, 2019 con base en IGAC, 2019

Tabla 2. Características de la unidad cartográfica de la zona de estudio

UCS	Paisaje	Clima	Tipo de relieve	Litología	Geoforma	Área (ha)
SC	Planicie aluvial	Cálido seco	Plano de desborde	Aluviones gruesos	Albardón	198,75

Fuente: Autores, 2019 con base en IGAC, 2019

El Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2000) reporta que de las 90 especies de fauna observadas dentro de las que se encuentran mayormente aves y peces, 76 (87%) son frecuentes en las zonas aledañas a los ríos dentro de la ciudad, mientras que 14 de ellas (13%) utilizan los ríos como corredores y es posible que no lo abandonen; y en la flora, se evidencia un gran número de plantas vasculares, especies leñosas y entre 50 y 60% de las especies son herbáceas.

La ciudad cuenta con cuatro ecosistemas representativos, dentro de ellos se encuentra el ecosistema Valle Geográfico que cuenta con una extensión de 21.400 hectáreas, con la mayor degradación a nivel municipal a causa del del urbanismo y la agricultura. El ecosistema Bosque Sub-Andino dedicado al uso de parcelaciones y el ecosistema Bosque Andino, se encuentra mayormente afectado por la actividad humana y los incendios forestales, ocasionando conflicto por el uso del suelo, erosión, degradación, fragmentación de los bosques y pérdida de la biodiversidad. El último ecosistema es el Páramo o Bosques de Niebla, el cual se encuentra cubierto por especies forestales de tipo arbustivo, herbáceas y pajonales, estas se caracterizan por tener una alta capacidad de almacenamiento de agua (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2000).

Cali es el mayor centro de actividades secundarias y terciarias, centro de gestión económica financiera y de servicios regionales, su actividad industrial se localiza en los ejes viales regionales conectados al centro principal (El país, 2014), donde se identificó que dicha actividad es una de las que mayores afectaciones ha tenido hacia el río Cauca y a la población aledaña a este. La actividad económica de Cali depende del sector geográfico, ya que aunque la mitad de la tierra plana del valle está dedicada al cultivo intensivo de la caña de azúcar, sobre la Cordillera Occidental (entre Cali y Yumbo), se desarrolla un corredor minero, la industria manufacturera y de transformación y en el valle geográfico predomina la actividad agropecuaria e industrial (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2000).

10.2. Marco conceptual:

- **Agricultura:** Actividad basada en la producción de alimentos de origen vegetal, es una actividad agraria que comprende un conjunto de acciones humanas que transforma el medio ambiente natural, con el fin de hacerlo más apto para el crecimiento de las siembras; para ello hacen diferentes tratamientos al suelo. (Tesauro Ambiental para Colombia, 2019).
- **Bioacumulación:** Es el proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos, en donde estos alcanzan concentraciones más elevadas que las presentes en el medio ambiente o en los alimentos. En función de cada sustancia, esta acumulación puede producirse a partir de fuentes abióticas, o bióticas. (Artica, 2018)
- **Biomagnificación:** La biomagnificación es la propagación sucesiva de la bioacumulación en los diferentes eslabones que participan a lo largo de la cadena trófica. Ésta se presenta en bajas concentraciones en organismos al principio de la cadena trófica y en mayor proporción a medida que se asciende en dicha cadena. (Artica, 2018)
- **Calidad del suelo:** Es la capacidad que tiene un suelo para funcionar y realizar funciones básicas y por ende se evalúa al medir propiedades físicas como densidad aparente, contenido de agua,

velocidad de drenaje, desleimiento y estimaciones morfológicas, las propiedades químicas como pH, conductividad eléctrica (CE) y niveles de nitratos, y las propiedades biológicas como respiración del suelo y lombrices. (Soil Survey Staff, 2000). Además según Tesauro Ambiental para Colombia (2019) es también un atributo del suelo que actúa de una forma diferencial sobre la adaptabilidad del suelo para una clase concreta de empleo o sobre su vulnerabilidad ante aquel. La fertilidad, la productividad y la erosionabilidad son factores de la calidad del suelo.

- **Contaminación:** Es cuando el ser humano, directa o indirectamente, introduce en el ambiente sustancias de energía con resultados negativos que pueden poner en peligro la salud de los seres vivos, disminuir la calidad del ambiente y reducir las actividades recreacionales y de estética del paisaje. (IDEAM, 2014).
- **Cromo:** El cromo es un elemento que ocurre naturalmente en rocas, animales, plantas y en el suelo, en donde existe en combinación con otros elementos para formar varios compuestos, además este se encuentra presente en la naturaleza en forma de cromo II, cromo III, cromo VI, el cual es ampliamente utilizado en la industria ya que contiene propiedades beneficiosas, como resistencia a la corrosión, durabilidad y dureza. (Téllez, 2004)
- **Fitorremediación:** La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. Este método se basa en los procesos naturales mediante los cuales las plantas y la microbiota asociada a sus raíces degradan y/o secuestran los contaminantes, en esta encontramos cuatro alternativas llamadas fitoextracción, fitoestabilización, rizodegradación, fitovolatilización. (Delgadillo et, 2011)
- **Metalmecánica:** Esta industria comprende un diverso conjunto de actividades manufactureras que, en mayor o menor medida, utilizan entre sus insumos principales productos de la siderurgia y/o sus derivados aplicándoles a los mismos algún tipo de transformación, ensamble o reparación. Así mismo, forman parte de esta industria las ramas electromecánicas y electrónicas, que han cobrado un dinamismo singular en los últimos años con el avance de la tecnología. (Procolombia, 2015).
- **Nanopartículas:** Son partículas en tamaño nano, donde según la ciencia “nano” representan la mil millonésima parte de algo, es decir que un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro y por ende las nanopartículas serían partículas con un tamaño menor a 100 nm. (UNAM, 2016)
- **Proceso biológico:** Se refiere a las etapas o procesos que se dan de forma natural y son desempeñados por los seres vivos o que ocurren en los seres vivos, que tienen alguna incidencia en el entorno que los rodea, además están conformados por una serie de reacciones químicas que da lugar a transformaciones. (Ciencias Naturales, 2016)
- **Proceso químico:** Son un conjunto de operaciones y procesos unitarios en los que ocurre una transformación de materia prima y materiales secundarios, lo que implica una reacción química de las mismas. (Rojas, 2012), los cuales conllevan diferentes características y atributos cuantitativos y cualitativos. (IUPAC, 2006).

- **Río:** Corriente natural de agua de grandes dimensiones que se mantiene en permanente movimiento y que se conecta con otros cursos de agua mayores como lagos o mares.; los cuales sirven como conexión entre las diferentes regiones y pueden presentar una longitud, extensión, profundidad y ancho completamente variables entre un caso y otro (IDEAM, 2014).
- **Suelo:** Es una colección de cuerpos naturales que descansan sobre la superficie de la tierra, contiene materia viviente, capaces de soportar plantas y son el resultado de una serie de factores formadores del suelo, con un sistema trifásico (Soil Survey Staff, 1975); mientras que según el Tesoro Ambiental para Colombia (2019) es la capa superficial de espesor variable, no compactada, originada por la acción de la atmósfera, el agua y los procesos de desintegración orgánica; en el cual se desarrollan la mayoría de organismos que viven sobre o dentro de la litosfera. Para la FAO (2019) suelo “se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas y como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua.”

Así mismo para Navarro en su libro química agrícola el suelo es el producto final de factores como el tiempo, relieve, clima, organismos (flora y fauna) y material parental (rocas y minerales originarios), el cual se define por su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas, por lo que están en continua evolución y variedad. Independientemente de su origen tienen como función soportar una vegetación y para ello deben propiciarse las condiciones necesarias para el desarrollo de la misma.

10.3. Estado del arte:

- **Antecedentes:** Los suelos han sido altamente contaminados y afectados por las actividades humanas a lo largo del tiempo, pero así mismo se han implementado diversas técnicas para remediarlos, dentro de las que se encuentran los mecanismos convencionales, en estos se engloban los relacionados a tratamientos biológicos, fisicoquímicos y térmicos, mientras que los mecanismos no convencionales utilizan tecnologías novedosas como la oxidación avanzada, la nanotecnología, la electrorremediación, la bioelectrocinética, entre otras (Martínez & Casallas, 2018). Además se mencionan los diversos criterios base para la elección del método más adecuado, en los que incluye criterios de localización, de características del medio, de aplicabilidad técnica y de costos asociados.

A nivel nacional, Colombia desde 1974 cuenta con normatividad ambiental y control de vertimientos, denotado en el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, la Ley 9 de 1979 (Código Sanitario Nacional), la Ley 99 de 1993 (establece normas generales sobre protección al ambiental), el Decreto 1594 de 1984 que contempla los vertimiento de los residuos líquidos y cuáles de ellos deben ser sometidos a tratamiento especial, la Ley 1252 del 2008, que dicta normas de los residuos y desechos peligrosos y establece que el que genere el residuo será responsable (Espinoza & Mera, 2015).

A nivel departamental, un estudio en Valle del Cauca realizado por Bonilla et al (1991) realizó una recolección de muestras de suelos pertenecientes a las subgrupos predominantes en el Valle del Cauca, CI-Palmira (*Pachic Haplustoll*), “que tiene un horizonte sálico dentro de los 75 cm de la superficie del suelo mineral y en años normales están saturados con agua en una o más capas dentro de los 100 cm de la superficie del suelo mineral”, la Argelia (*Fluvaquentic Haplustalf*) “que tienen un contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral” y Fumivalle (*Typic Ustropept*), que por su ubicación están siendo regados o pueden llegar a serlo en un futuro con aguas contaminadas; para dicho estudio contaminaron las muestras con una mezcla de cadmio, cromo y mercurio, los resultados arrojaron que el Cr y el Hg presentaron mayor adsorción en pH ácido y el Cd en pH neutro o alcalino en todos los suelos, esto puede suceder por la formación de compuestos con la materia orgánica del suelo o con los óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mn, razón por la cual permanecen menos en la solución de equilibrio a valores de pH entre 5.4 y 5.7.

En relación con la gestión de sustancias químicas, se plantea la preocupación por el uso y disposición de las mismas, lo que trajo consigo en 2013 un Plan de Acción Nacional para la gestión de sustancias químicas en Colombia (2013-2020), para lograr la reducción de los efectos en la salud humana y el medio ambiente, y por ende su control y presencia en los diferentes recursos naturales (Espinoza & Mera, 2015). Por último, aunque en el decreto 4741 de 2005 se reglamentó parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos, en el año 2010 se reportaron en el país 104,7 toneladas de desechos con compuestos de cromo, de los cuales 61,5 se llevaron a disposición final según las disposiciones del decreto 4741 de 2005, lo que refleja que no se han implementado suficientes alternativas de manejo y disposición final de estos residuos.

En el año 2005, el tratamiento de remoción del cromo VI se basaba en la reducción a Cr III, ya que esta se considera una especie menos tóxica y menos móvil en el medio ambiente, sin embargo esta continuaba causando afectaciones medioambientales y problemas de salud pública, es por ello que se buscaron diferentes alternativas para reducir totalmente dicho metal en el medio. Las primeras técnicas utilizadas fueron la fotocatalisis heterogénea y la bioadsorción, la publicación del primer método lo realizaron Carey, Lawrence & Tosine en 1974 (Espinoza & Mera, 2015), y desde ahí el análisis histórico se define en cuatro etapas, en donde la cuarta comenzó en el año 2000 y va hasta la actualidad, esta se enfocó en aquellas aplicaciones específicas y concretas cuyo método resulta viable y competitivo como lo es el sistema de TiO_2/UV .

El otro método es el de bioadsorción, los primeros intentos fueron realizados por Adams & Holmes en 1935, ellos analizaron la eliminación de iones con resinas de tanino, y ya en 2015 Poojari, Maind & Bhalerao evaluaron cáscara de naranja en la remoción de cromo hexavalente controlando el pH, la dosis de bioadsorbente, concentración inicial de Cr (VI), tiempo de contacto y temperatura (Espinoza & Mera, 2015). Sin embargo, se considera que una de las técnicas más relevantes es aquella en la que se hace uso de un proceso físicoquímico que ajusta el pH y elimina sólidos, coloides, aceites o grasas, luego se procede con el tratamiento por medio de microorganismos, el cual elimina la materia orgánica biodegradable, y por último, el tratamiento terciario que permite la separación del agua de las especies que no pudieron ser removidas anteriormente como los aniones, cationes y los compuestos orgánicos no biodegradables (Rosales, 2014).

- **Metales pesados:** Los metales pesados se encuentran en bajas concentraciones en la naturaleza y pueden ser de origen geogénico o antropogénico, en donde los del primer caso hacen parte de la formación geológica de la zona, y los que son liberados por el segundo caso, se dan en su mayoría por diferentes actividades industriales (Sánchez, 2013), un ejemplo de ello son los compuestos de cromo, debido a que estos son un grupo de sustancias químicas que tiene propiedades beneficiosas, como resistencia a la corrosión, durabilidad y dureza por lo que son altamente utilizados en diferentes sectores industriales, mineros y agrícolas (pesticidas, herbicidas, etc) (Téllez, 2004); dichos metales pesados llevan consigo afectaciones al suelo y cuerpos de agua aledaños, lo cual representa una contaminación peligrosa que atenta contra la salud humana y ambiental por su toxicidad y abundancia en el medio, además de que según Fontalvo & Marrugo (2017) y Covarrubias (2015) existen muchos ríos en Colombia que presentan esta situación como lo son el Cauca y el Magdalena; siendo los metales más estudiados el mercurio, el arsénico y el plomo.

En Colombia la contaminación del suelo y el recurso hídrico representa una problemática a nivel nacional, la cual se puede delimitar al caso de la contaminación por metales pesados que sufre el río Cauca, ya que el cuerpo de agua ha sufrido de degradación por las malas prácticas que genera la industria, por el vertimiento de aguas contaminadas sin pre-tratamiento a distintas quebradas y ríos que luego desembocan en el río Cauca, lo que a su vez genera una problemática en los suelos aledaños al río, afectando la actividad económica de la agricultura que practican las comunidades aledañas, y así mismo generando enfermedades que inciden de manera directa la salud humana de la población (Sánchez, 2014).

- **Contaminación por cromo en suelos:** El cromo predomina principalmente en los procesos metalúrgicos y de manufactura, en la producción de ferrocromo y acero inoxidable, y en algunas operaciones de hornos de alta temperatura (Sánchez, 2013); dichos procesos se llevan a cabo en aproximadamente 19 empresas ubicadas en el casco urbano, que depositan sus vertimientos al río Cauca, en donde la primera de estas tiene aproximadamente una distancia de 160,0 metros al río, como se aprecia en la *Figura 7*, lo que a su vez genera afectaciones sociales y ecológicas por las altas concentraciones de cromo en el cuerpo de agua. La siguiente actividad relevante es la agricultura, en la que se ubican cultivos con una proximidad al río Cauca de aproximadamente 168,9 metros como se observa en la *Figura 8*; en esta actividad hacen uso de pesticidas, herbicidas y demás agroquímicos que se dispersan y traen consigo una contaminación en la matriz suelo. Otra actividad que genera un aumento de la concentración de cromo en el río Cauca es la extracción de oro aluvial, la cual se realiza llegando al alto del Buey, justo donde nace el río Cali a 4100 metros de altura, allí aparecen expuestas varias montañas en el santuario natural los Farallones.



Ilustración 7. Mapa de la distancia de la primera industria metalúrgica al río Cauca.

Fuente: Google maps, 2019. Obtenida el 07 de abril de 2019, disponible en:
<https://www.google.com/maps/search/metalmecanicas+de+cali/@3.4551404,-76.4801619,16.5z>

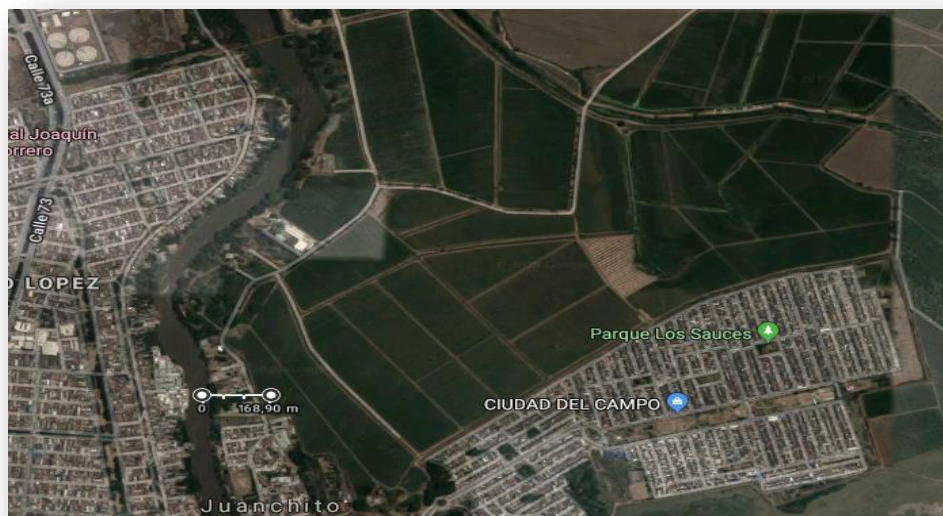


Ilustración 8. Mapa de la distancia de los cultivos al río Cauca.

Fuente: Google maps, 2019. Obtenida el 014 de septiembre de 2019, disponible en:
<https://www.google.com/maps/@3.4607858,-76.4743511,2214m/data=!3m1!1e3>

Esta contaminación por cromo presente en el río, tiene repercusiones negativas en sus suelos aledaños, ya que hay un paso de la misma por dos factores: el primero son las irrigaciones constantes que se realizan a los cultivos proveniente de este tipo de agua, y el segundo es el paso de la contaminación en las temporadas de lluvia en las zonas inundables del río, debido a que este se desborda y hay contacto directo entre los dos recursos; además, la matriz suelo se contamina con el cromo por el uso recurrente de fertilizantes, pesticidas y plaguicidas que los que más aportan cromo son los fosfatados, nitrogenados y fitosanitarios; así mismo por contaminación directa por la cercanía a industrias de metalmecánicas (Mahecha et al, 2017).

- **Afectaciones del cromo total:** La concentración y contaminación con cromo en el río Cauca y sus suelos aledaños evidencian una relación directa con la baja calidad de vida, ya que este río representa el 75% del agua y alimentos que se consumen en la región, generando una biomagnificación del cromo en los organismos humanos, causando deterioro de la calidad de vida (Calao & Marrugo, 2015). La acumulación de dicho metal en la sangre causa alteraciones al ADN, lo que produce graves enfermedades y problemas de salud; información que se corrobora con los datos arrojados por la OMS según Guerinoni (2013) que reportó que se presentan 4.000 muertes prematuras al año en América Latina por el consumo del metal.
- **Técnicas para la degradación o reducción de metales pesados:** Existen diferentes métodos para la mitigación de esta problemática, como la adición de compost a suelos, la cual puede aumentar simultáneamente el contenido de materia orgánica del suelo y la fertilidad del suelo (Chen, 2015), aunque su estudio y uso hoy en día no es significativo; mientras que las alternativas que se han planteado en los últimos años para la resolución de dicha problemática, se reconocen mayoritariamente los sistemas químicos y biológicos, los cuales han demostrado su eficiencia en la reducción del cromo (Cr).

Los sistemas químicos son eficientes, pero representan un costo económico y ambiental (Covarrubias, 2015); sin embargo, en la revisión bibliográfica se encontraron estudios que abordan dicho tema, en donde tres artículos analizan el potencial de materiales para la retención de metales pesados por su estructura y superficie, el primero de ellos (Díaz, 2013) evalúa un material arcilloso, el segundo (Millán, 2016) a los hidróxidos dobles laminares (HDLs) con características adsorbentes y descontaminantes, y el tercer material (Zu, 2016) que consiste en la eliminación de iones de metales pesados en materiales basados en NZVI con tecnología EXAFS, que además de ello permiten la limpieza de la contaminación ambiental.

Otro estudio relevante que fue hallado, es el del uso de tecnologías de separación basadas en líquidos iónicos, en donde el líquido iónico [MTOA+][Cl⁻] produjo una extracción casi total de metales como Fe(III), Zn(II) y Cd(II) con ayuda del ácido clorhídrico (Anzola, 2014). Por otro lado, un estudio realizó una comparación entre carbón activado, cáscara de plátano y naranja y biomasas modificadas con quitosano a determinadas condiciones, donde se mostró una mayor remoción de los iones de Cr, con el uso de las cáscaras de plátano y el carbón activado (Benítez, 2014). La última metodología interesante en la recolección de información (Arboleda et, 2017), es en la que a partir de residuos industriales se sintetizan zeolitas LTA y/o FAU para la adsorción de Cr (III) en Antioquia, Colombia.

La biorremediación es un método biológico que tiene diversos procesos en los que se destacan la sorción, precipitación, lixiviación y volatilización de metales pesados (Covarrubias, 2015); sin embargo, la naturaleza no selectiva y no específica del biosorbente y la tecnología son un obstáculo importante para su comercialización (Kumar, 2015). Uno de los artículos más relevantes encontrados, (Joshi & Kalita, 2017) menciona que las *Pseudomonas sp* tienen mayor capacidad para resistir el plomo de agua subterránea, en comparación con la capacidad de las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* y *Pseudomonas alcaligenes* en suelo forestal, ya que se adhiere efectivamente al plomo con mayor afinidad para unirse, y adicional a ello, ofrece una tecnología económica y respetuosa con el medio ambiente para el tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales.

El presente proyecto tiene interés en aportar información del cromo total, ya que es uno de los metales menos estudiados hoy en día a nivel nacional, lo que representa un problema ecológico y social, ya que tiene la capacidad de formar subproductos contaminantes, y en el presente estudio (DhalaH et, 2013) se evidencia que para reducir la concentración de dicho metal es necesario tener en cuenta características del medio y de los microorganismos. Un informe adicional a este (Deyad, 2016), encontró mediante diversos procesos que el hongo *Aspergillus fumigatus* puede reducir las concentraciones de Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, y así mismo tiene la capacidad de adaptarse rápidamente a un amplio rango de contaminación; mientras que un artículo de revisión analizado (Dixit, 2015), informa únicamente acerca de las capacidades de los microorganismos y plantas en términos de tolerancia y degradación de los metales pesados y demás estrategias de biológicas.

A diferencia de los estudios analizados anteriormente, Mora & Bravo, (2016) indican que la cepa de *Acinetobacter* CrMFC₂ tiene el mejor desempeño en la reducción de cromo hexavalente en un lapso corto de tiempo; y en continuación a la temática se evalúan los subproductos bacterianos como los polisacáridos extracelulares o exopolisacáridos (EPS) que son eficientes en la biorremediación por la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos como ácido urónico, lípidos, aminoácidos y polisacáridos (Bhargavi et, 2018). Por último, en la búsqueda de documentos fueron hallados dos artículos de biosorción, en el primero de ellos (Kumar, 2015), se hizo la unión de peptidoglucano y polisacáridos de la pared celular de la biomasa para la biorremediación; y el segundo estudio (Martín, 2008) evaluó la capacidad de tres residuos (hueso de aceituna, alperujo que es un subproducto de la extracción del aceite de oliva y la poda del olivo) de una industria de aceite de oliva para reducir plomo y cromo, y demostró que los tres residuos tienen la capacidad de retener Pb (II).

La fitorremediación es otro de los métodos estudiados en las últimas décadas a nivel internacional, estos son económica y ecológicamente viables pero presentan una desventaja, ya que tienen un largo tiempo de espera; entre estos estudios, se encontró uno realizado por Bartolomé et al (2018) que denota la capacidad que tienen microalgas eucariotas del *phylum Chlorophyta* verdes en resistir metales tóxicos; y otro realizado por Orroño (2002) hizo uso de plantas ornamentales del género *Pelargonium* proporcionó una acumulación de los metales en los tallos, hojas y flores; sin embargo esta no puede ser mayormente utilizada en suelos con altas concentraciones.

La rizorremediación es un método biológico en el que se hace una simbiosis entre el método de biorremediación y el de fitorremediación, el cual representa una alternativa eficiente por el aporte que tienen los microorganismos al promover el crecimiento vegetal mediante varios mecanismos como la producción de fitohormonas, además de la capacidad de movilizar metales (fitoextracción) o inmovilizarlos en las estructuras celulares (fitoestabilización), que asimismo generan una rápida y eficiente reducción de los niveles del contaminante (Covarrubias & Peña, 2017).

A lo largo del mundo se ha implementado la rizorremediación con el fin de remediar los suelos contaminados por metales pesados de una manera más eficiente, un ejemplo de ello es un estudio realizado en Pakistán por Ali et al (2019) en el que inocularon semillas de soja (*Glycine max*) con la bacteria *Kocuria rhizophila* y posteriormente le agregaron ácido cítrico para evaluar la acumulación de Cd, Cr, Cu y Ni; otro estudio en Marruecos realizado por Asri et al (2018) utilizó la combinación de Alfalfa con la bacteria *Cellulosimicrobium sp* para evaluar su eficiencia en la reducción de algunos metales pesados; otro informe (Ahemad, 2015) en el que aplican bacterias promotoras del crecimiento de plantas multifuncionales (PGPB) indica que estas muestran resistencia al cromo y rasgos reductores, lo que genera un mejor crecimiento de la planta y en la eficiencia de remediación; y un estudio de Amabilis (2016) evaluó la acumulación y distribución de mercurio en carrizo (*Phragmites australis*) usado como barrera biológica en humedales artificiales, donde después de 304 días de operación, los sistemas con carrizo (especie de caña) y bacterias metalotolerantes (extremófilos que son capaces de sobrevivir en entornos con una alta concentración de metales pesados disueltos en solución), removieron un porcentaje significativo del mercurio total, y se halló que el único que presenta este método es la contaminación atmosférica que puede generar con la implementación de estos sistemas.

10.4. Marco teórico:

El suelo se considera como un componente esencial del ambiente en el que se desarrolla la vida por su contenido de agua y elementos nutritivos, pero así mismo es considerado un recurso natural con extensión limitada no renovable por su vulnerabilidad al ser difícil y larga la recuperación de este; es por ello, que analizarlo y estudiarlo, representa una alta importancia para lograr su conservación a través del tiempo (Correa & Silva, 2009).

La formación del suelo es un proceso en el que intervienen factores como el clima, el relieve, el tiempo, los seres vivos y el material parental, este es una sucesión ecológica en la que va madurando el ecosistema suelo. El proceso inicia cuando la roca es meteorizada por los agentes meteorológicos (frío/calor, lluvia, oxidaciones, hidrataciones, etc.), luego está se va fragmentando para que se mezclen entre sí y con los restos orgánicos (heces, organismos muertos o en descomposición, fragmentos de vegetales, pequeños organismos que viven en el suelo, etc), y así con el paso del tiempo todos estos materiales se van estratificando y terminan por formar lo que comúnmente se conoce como suelo (Correa & Silva, 2009). En la *Figura 9* se pueden observar los servicios ambientales que ofrece la matriz suelo, indicando así que este recurso natural desempeña diversas funciones medioambientales, sociales y económicas, que resultan fundamentales para la vida, como la producción, ambiente biótico, regulación climática e hidrológica, almacenamiento de nutrientes y materias primas, control de residuos y contaminación, las cuales se presentan a continuación:

Servicio ambiental	Descripción
Generación de alimento y demás producción de biomasa	Los alimentos y otros productos agrícolas, esenciales para la vida humana, así como la silvicultura dependen totalmente del suelo. Prácticamente toda la vegetación-pastos, cultivos y árboles, inclusive- necesitan del suelo para obtener tanto agua y nutrientes como soporte físico.
Almacenaje, filtración y transformación	El suelo almacena minerales, materia orgánica, agua y varias sustancias químicas. Sirve de filtro natural de las aguas subterráneas, la principal reserva de agua potable, y libera dióxido de carbono, metano y otros gases a la atmósfera.
Hábitat y reserva genética	El suelo es el hábitat de una cantidad ingente de organismos de todo tipo que viven tanto en el suelo como sobre él, cada uno con un genotipo irremplazable. Esta es una función ecológica esencial.
Entorno físico y cultural para la humanidad	El suelo sirve de base a las actividades humanas y es asimismo un elemento del paisaje y del patrimonio cultural.
Fuente de materias primas	Los suelos proporcionan materias primas tales como las arcillas, las arenas y los minerales, entre otros, que son empleados en los diversos procesos productivos de las organizaciones.

Ilustración 9. Servicios ambientales que ofrece la matriz suelo. **Fuente:** Correa & Silva (2009)

Una de las principales problemáticas identificadas es la pérdida o degradación de este recurso, ya que se da una modificación de las condiciones originales, lo cual se puede presentar por la presencia superior a los valores límite permisibles de sustancias que tengan la capacidad de modificar o variar alguna condición del recurso, y así mismo compromete satisfacción de necesidades sociales, ambientales y económicas (Correa & Silva, 2009). Es por ello, que la contaminación del suelo generada por actividades económicas puede presentarse de dos formas como lo indica la siguiente Figura:

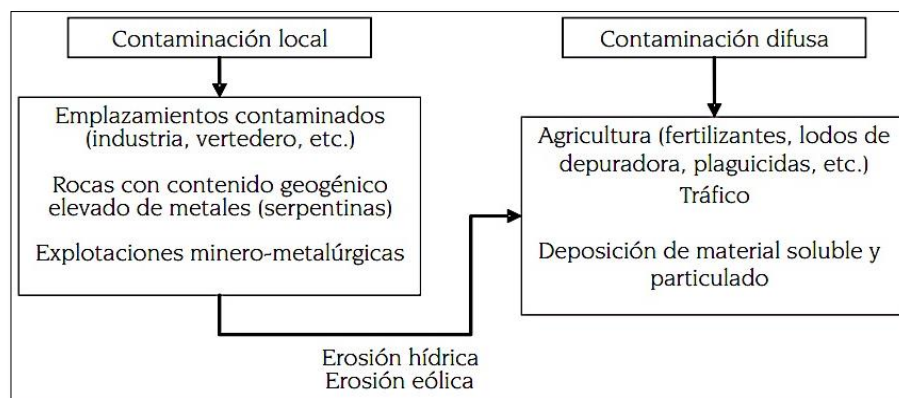


Ilustración 10. Tipos de contaminación del suelo (local y difusa). **Fuente:** Correa & Silva (2009)

La matriz del suelo se puede ver afectado por el uso del cromo, en donde los compuestos de este metal se han usado en amplia medida como anticorrosivos y para fabricación de pigmentos, acabado de metales y cromados, producción de acero inoxidable, curtido de cueros y conservantes para madera, también se han usado en procesos de teñido en la industria textil, tintas de impresión, lodos de perforación, fuegos artificiales, tratamiento de aguas, síntesis de sustancias químicas, galvanoplastia, fabricación y soldadura de acero inoxidable, revestimientos de superficies, quemados de gas natural, petróleo o carbón, entre otras (Téllez, 2004); dichas actividades industriales y mineras tienen implicaciones directas con la concentración de metales pesados y se evidencia que la pobreza sumada al consumo y a la biomagnificación de metales, generan deterioro de la calidad de vida de las poblaciones (Calao & Marrugo, 2015). El estudio arroja que las muestras de sangre del grupo analizado sobrepasaron los límites permisibles de metales pesados, generando alteraciones al ADN, lo cual se presenta porque los habitantes consumen agua y alimentos provenientes del suelo y río que están previamente contaminados, causando graves enfermedades y problemas de salud.

En Colombia la utilización del cromo en procesos de manufactura, es una actividad de alto riesgo para la salud del trabajador, es por ello que dichas actividades están sometidas a un control especial por los organismos e instituciones componentes del sistema general de riesgos profesionales (Téllez, 2004). El cromo al ser liberado por una planta industrial o alguna actividad productiva entra al ambiente y este conlleva diversas consecuencias cuando tiene contacto directo con el ser humano, bien sea a la hora de inhalar, comer, beber o por contacto con la piel con dicha sustancia. El compuesto que según Office of Environmental Health Hazard Assessment (2016) que más fácilmente se absorbe es el cromo VI, ya que es tomado por los eritrocitos y se integra a otras células por el sistema transportador de sulfatos y al reducirse en cromo III intracelularmente, genera intermediarios reactivos (cromo II, cromo III y cromo IV), radicales libres hidroxilo y oxígeno, los cuales pueden alterar el ADN, y dañar las células de reacción en cadena, propiciando diferentes enfermedades como el cáncer.

Esta sustancia puede causar reacciones alérgicas, (erupciones cutáneas), malestar de estómago y úlceras por consumo en cuerpos de agua, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón, muerte, daño a los espermatozoides y por tanto al sistema reproductivo (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012); y aunque el cromo puede ser eliminado por el cuerpo a través de la orina dentro de una semana, este puede permanecer en las células durante años. Para evaluar la exposición en los seres humanos con posibles sospechas de contaminación por cromo se realiza por monitoreos de sangre y orina, el aliento condensado y su concentración en los eritrocitos para evaluar algunos tejidos y órganos en riesgo (Molina, 2010). Por lo expuesto anteriormente la OSHA reglamenta unos límites máximos permisibles para la exposición de los trabajadores al cromo en el aire (Rosales, 2014).

El cromo no permanece en la atmósfera, ya que este se deposita en el suelo y el agua (Téllez, 2004); su presencia en altas concentraciones en los cuerpos de agua ocurre por los vertimientos derivados de la industria, que genera como residuo metales que se van al fondo del agua afectando gravemente la fauna acuática, y es por ello que se tiene unos valores máximos permisibles dependiendo del tipo de cuerpo de agua (Rosales, 2014); así mismo, la contaminación en el suelo también puede darse por los depósitos de residuos industriales y las cenizas de carbón provenientes de plantas generadoras de electricidad, lo que genera la acidificación de este recurso, que a su vez puede influir en la absorción de cromo por los cultivos.

En la matriz suelo se ha observado que la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) se lleva a cabo en presencia de manganeso (Mn) oxidado a pH alto por la participación de protones en la mayoría de los procesos implicados en la oxidación de cromo y la reducción del manganeso (Mn), además se evidenció que no se ha hallado la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) en suelos ricos en humus o en suelos libres de humus, sin embargo, se encontró la liberación de Cr (VI) a partir de polvo de cuero curtido con Cr (III) en vermiculita que se considera un mineral de arcilla formado por silicatos de hierro o magnesio y en suelos limosos pobres en humus, a pH 8-8,5 y humedad relativa del 95%, también se halló que la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) suele ser frecuente en suelos alcalinos, pobres en materia orgánica y con alto contenido en humedad. Por regla general la contaminación por cromo del agua superficial y de los sedimentos no suele repercutir de forma peligrosa en los niveles de cromo en el agua subterránea, debido a la retención del cromo por las partículas del suelo durante el proceso de infiltración (Murcia, 2014). Por lo mencionado anteriormente se concluye que la oxidación del cromo total se puede dar en pH ácidos y básicos, sin embargo la reacción se facilitará dependiendo del estado de oxidación del cromo.

Un estudio realizado por Murcia (2014) indica que los sedimentos del cauce fluvial que estudiaron presentan pH alcalino y con un bajo contenido de materia orgánica, favoreciendo la oxidación del Cr y su movilidad por el lavado con las aguas de escorrentía y lixiviación en épocas de lluvia y altas temperaturas. Además evidenciaron que los suelos con mayores contenidos de arcilla tienen una mayor capacidad de adsorber cationes (solo si no excede el contenido de los mismos, ya que de lo contrario puede dificultar el desarrollo de la vegetación) y se encontró una relación entre la cantidad de arena y el cromo, puesto que entre menor sea la proporción de arena, menor concentración de cromo se encontrará presente en dicho suelo. Adicional a ello, se evidencio que a mayor contenido de carbonato cálcico, se encontrará una alta concentración de cromo, por qué esta propiedad junto con la baja cantidad de carbono orgánico, favorece la oxidación del Cr (III) a Cr (VI); por consiguiente se puede inferir que la menor concentración de cromo total en el área indicaría la solubilización del Cr (VI) que se transporta con las aguas de escorrentía; y según Bonilla et al (1991) los cationes son más débilmente ligados a bajos valores de pH y la capacidad de sorción de los suelos puede incrementar varias veces por unidad de incremento de pH dentro del rango de 4.0 a 7.0

La concentración del cromo según Navarro & Ramírez (2015) altera los rangos normales de diversas propiedades del suelo como el pH, materia orgánica, contenido y tipo de arcillas, óxidos del hierro, manganeso y aluminio, carbonatos y condiciones de óxido-reducción; dichas propiedades se convierten en los indicadores de calidad del suelo estudiado, debido a que son las propiedades que se alteran con el tiempo por la contaminación del cromo total, es decir que fluctúan sus valores normales. En Colombia se han realizado algunos estudios de metales pesados en suelos, como el de Navarro & Ramírez (2015) que analizaron suelos de cultivo de arroz que eran irrigados con agua del río Guatiquía, y compararon sus resultados con la normativa internacional, se obtuvo que los niveles de concentración de dichos metales (cadmio, cobre, plomo, níquel y zinc) estaban dentro de los límites establecidos por la EPA en 1996 (100 - 500 $\mu\text{g/kg}$); sin embargo no propusieron o recomendaron algún método para reducir aún más su presencia. Otro estudio realizado por Mahecha et al (2017), analizó la presencia de cromo en suelos con uso agrícola intensivo de orden oxisol en la región del Ariari, aunque sus resultados también arrojaron que se encuentran dentro de los límites permisibles de la EPA, tampoco plantean una alternativa para su remoción. Mientras que el estudio realizado por Bonilla & Llorca (2010) fue realizar un ensayo en laboratorio para la reducción de cromo y cadmio en suelos aledaños al río Bogotá, y sus resultados arrojaron que para Cr, la aplicación de 4000 kg ha⁻¹ de CaCO₃ o de 400 kg ha⁻¹ de FeSO₄ rebajó en 2,50 ppm el contenido de los metales.

Es importante la reducción de las altas concentraciones de cromo bien sea en cuerpos de agua o suelos, por medio de diversas técnicas para la remoción o reducción de los metales pesados en cuerpos de agua y en suelos como son la biorremediación, rizorremediación, fitorremediación, y los sistemas químicos, siendo cada una de ellas diferentes no solo por sus metodologías sino también por el componente principal que utilizan, bien sea plantas, materiales, bacterias, hongos, o materia orgánica, haciendo que cada una de ellas actúe de manera diferente cuando entra en contacto con el cromo y que sus resultados finales varíen de alguna manera.

10.5. Marco normativo:

En Colombia no se registra un marco legal relacionado con los parámetros máximos permisibles de metales pesados en suelos, ni la calidad de los mismos; sin embargo a continuación se relacionan las normas que se vinculan con el tema de estudio:

- Código de minas (Ley 685/2001)
- Código de los recursos naturales (decreto-ley 2811/1974)
- Constitución política de Colombia
- Ley 99 de 1993
- Decreto 1713 del 2002

Estas normas definen algunos factores que afectan la calidad del suelo por ciertas actividades económicas que se llevan a cabo en el país, y por último como se indica en la *Tabla 3* la Norma Técnica Colombiana 3888 y 3934 que describe la cuantificación de metales en suelos. Es por ello, que el presente proyecto tomará como norma de referencia los valores emitidos por la EPA, la cual establece que el rango normal de contenido de cromo en el suelo es de 100 – 500 µg/kg y el rango tóxico está entre 5000 y 30000 µg/kg.

Tabla 3. Normas técnicas.

Norma técnica	Propósito
NTC 3656 / 1994 Icontec	Establece metodologías de muestreo de suelo para determinar la contaminación y garantizar los análisis de laboratorio.
NTC 3888 / 2001 Icontec	Permite evaluar la calidad del suelo que se ve afectada por los elementos traza solubles en agua, por medio de herramientas como la gestión ambiental y metodologías de extracción.
NTC, 3934 / 2003 Icontec	Determinación de elementos químicos como el cadmio, cromo, cobalto, cobre, plomo, manganeso, níquel y zinc en suelos, por medio de métodos de espectrofotometría.

Fuente: Autores, 2018

La contaminación del río Cauca propicia la contaminación de cromo en sus suelos aledaños, bien sea por el transporte de dicho contaminante o por el riego de cultivos realizado por parte de la comunidad; es por ello que la normatividad Colombiana presentada a continuación en la *Tabla 4* se tiene en cuenta para el presente proyecto, ya que establece parámetros de la calidad en cuerpos de agua.

Tabla 4. Normas legales.

Norma legal	Propósito
Resolución 883, 18 de mayo de 2018, Ministerio de Ambiente.	Establece los parámetros y valores límites máximos permisibles, además de los parámetros para el análisis y reporte de los vertimientos en cuerpos de agua.
Decreto 1594, 1984	Establece el tratamiento de los residuos líquidos antes de su respectivo vertimiento en un cuerpo de agua.
Decreto 4741, 2005	Establece lineamientos de RESPEL y obligaciones de generadores, fabricantes y transporte de los mismos.

Fuente: Autores, 2018

10.6. Marco institucional:

Se presentan diferentes instituciones que fueron esenciales para el desarrollo del presente proyecto, de las cuales la Policía Nacional y la comunidad de Cali son actores necesarios para el proceso de acompañamiento en la toma de muestras en los suelos aledaños a la Cuenca Valle del Cauca del río Cauca para cumplir con el objetivo número dos, así mismo la Universidad El Bosque ya que ha proporcionado diversos recursos y la infraestructura para llevar a cabo el trabajo de grado; y el laboratorio Agrilab, el cual es la institución elegida y encargada del análisis de las muestras recolectadas.

- Policía Nacional
- Laboratorio Agrilab
- Universidad El Bosque
- Comunidad de Cali



Ilustración 11. Instituciones participantes en el proyecto. **Fuente:** (Autores, 2019)

11. Metodología

El proyecto presentó un enfoque mixto, por que los resultados que arrojó son de tipo cuantitativo como se observa en la matriz de la *Tabla 5*, ya que se obtuvieron datos que informaron acerca de la comparación entre la concentración del cromo en el recurso suelo tanto al inicio del estudio, como al final del proceso experimental con la técnica elegida; así mismo, los resultados obtenidos arrojaron información cualitativa y cuantitativa, y por medio de estos se concluyó cuál es la técnica que presenta una mayor eficiencia en la reducción de la concentración del cromo. Además se determina que el proyecto maneja un método inductivo ya que se pretende generar nuevo conocimiento a partir del análisis de datos e información de hechos y fenómenos observados, sumado a que es un estudio pionero en la zona como se describe en la justificación

Tabla 5. Matriz de los objetivos específicos del proyecto.

Objetivo específico	Alcance de objetivos	Hipótesis de investigación asociada al objetivo	Variables asociadas al objetivo
Determinar a través de una matriz de información los requerimientos necesarios del procesos químico y biológico para reducir el cromo total en las muestras de suelo.	Descriptivo	El sistema químico representará una mayor eficiencia a comparación al proceso biológico en cuanto a la reducción del cromo en los suelos aledaños al río Cauca, ya que en la revisión bibliográfica realizada, se encontró que los sistemas químicos representan una mayor eficiencia en el proceso de reducción de dicho metal, aunque este es altamente costoso en su etapa de instalación y mantenimiento, mientras que los sistemas de biológicos representan un bajo costo pero su eficiencia se reduce ya que se involucran diferentes variables como la fenología, tasa de crecimiento, adquisición, costo, clima, meteorología, entre otros aspectos.	Concentración de cromo Tecnologías de biorremediación. Tecnologías de fitorremediación Tecnologías de rizorremediación Tecnologías de sistemas químicos. Tipos de actividades de la zona
Caracterizar química y físicamente las muestras de suelo y cuantificar la concentración de	Descriptivo	Las concentraciones de cromo hexavalente sobrepasan los límites indicados en las tablas de la EPA 1996	Coordenadas Concentración Número muestras

cromo total en las
mismas.

Comparar la eficiencia del proceso químico y biológico en la reducción de la concentración de cromo total en las muestras de suelo.	Descriptivo Correlacional	El sistema químico y biológico será eficiente pero cada uno presentará falencias, sin embargo el que presentará menos es el de fitorremediación por su fácil aplicabilidad, bajo costo y alta eficiencia.	Tecnologías de biorremediación. Concentración de cromo Tecnologías de fitorremediación Tecnologías de rizorremediación Tecnologías de sistemas químicos.
---	------------------------------	---	--

Fuente: Autores, 2018

Para llevar a cabo el objetivo general propuesto, el cual pretendía evaluar la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños a la cuenca Valle del Cauca del río Cauca, por medio de un proceso químico y biológico, el proyecto requirió de una serie de estudios, normas y procesos experimentales, para asegurar la completa viabilidad del mismo, para ello fue necesario realizar en primera instancia una revisión bibliográfica de estudios previos acerca de la calidad del suelo, el comportamiento del cromo y técnicas para remediar el recurso suelo, lo cual implicó el uso de estudios descriptivos, ya que era relevante tener en cuenta los antecedentes en la zona de estudio, para poder abarcar de una manera más completa la relación causa - efecto en un periodo; seguido de esto, fue necesario establecer las condiciones actuales de los suelos aledaños a la Cuenca Valle del Cauca del río Cauca mediante procedimientos experimentales por medio estudios descriptivos; luego, se realizó por medio de estudios descriptivos y correlacionales una comparación del sistema químico y biológico; y por último, se evaluó y comprobó la eficiencia de dichos sistemas en el laboratorio.

Finalmente, se determinó que el alcance del proyecto se centra en establecer las condiciones actuales del suelo y comparar el sistema químico y biológico por medio estudios descriptivos y correlacionales, ya que describen la distribución de las variables y las comparan entre sí; y el límite del proyecto se basa en la evaluación de los métodos a escala laboratorio. A continuación se presenta la *Figura 12* en la se presenta la metodología establecida para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados:

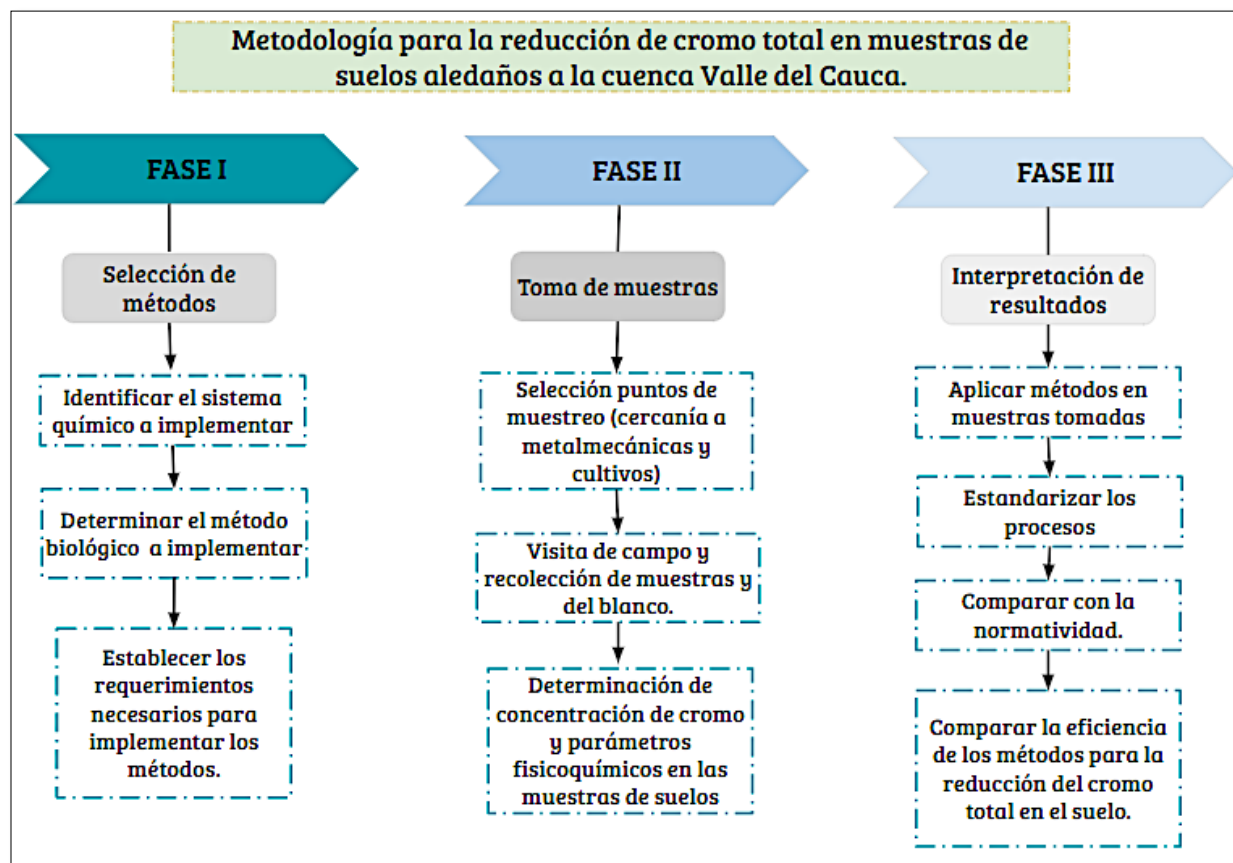


Ilustración 12. Metodología para evaluación de la reducción de cromo total en muestras de suelo aledañas al Río Cauca.
Fuente: Autores, 2019.

Fase I.

Para llevar a cabo la investigación bibliográfica y cumplir el objetivo número uno, se tuvo en cuenta como tema principal, las técnicas de reducción de la concentración de cromo en la matriz suelo; haciendo uso de palabras clave como: suelo, cromo, biorremediación, fitorremediación, rizorremediación y sistemas químicos, las cuales fueron consultadas en las bases de datos de ScienceDirect, Redalyc, ProQuest Central, Google Académico, SciElo, entre otras. En la siguiente Figura se muestra la metodología para la realización de la matriz de información, en la cual se encuentra de forma sintetizada la secuencia del proceso de búsqueda y selección de los documentos:

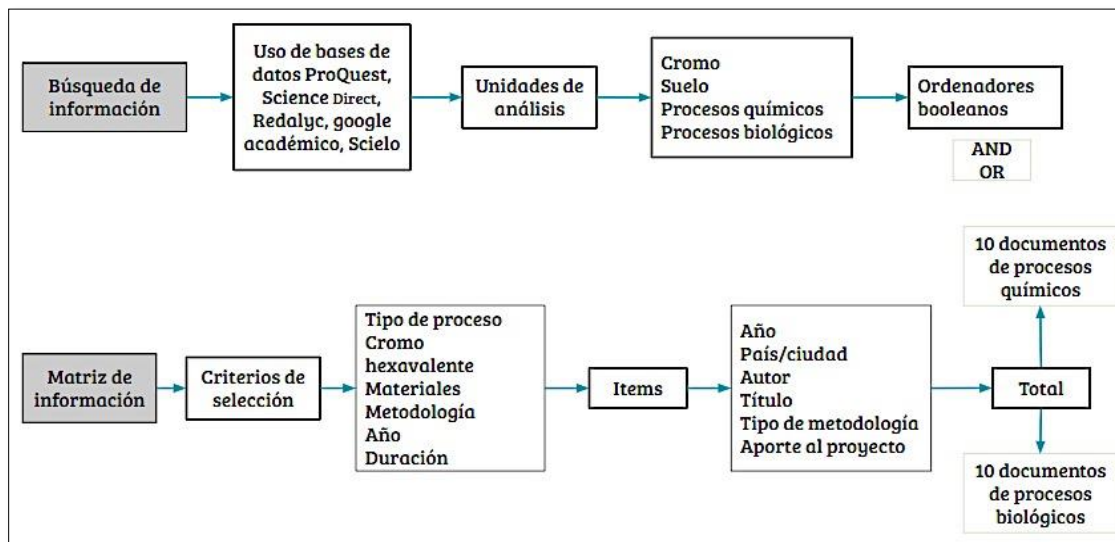


Ilustración 13. Metodología para la realización de la matriz de información. **Fuente:** Autores, 2019.

Fase II.

Los puntos para llevar a cabo la recolección de muestras de suelo fueron seleccionados y localizados principalmente con ayuda del software Google Earth Pro, en el que se observó la zona que tenía una mayor concentración de empresas metalmecánicas, además de la zona con cultivos a la orilla del río. Luego de ello, se determinó que el primer punto de muestreo se llevaría a cabo en la zona de cultivos en el límite de Cali y Juanchito (orilla derecha del río), el siguiente punto de muestreo en el barrio Floralia, ya que este tiene una cercanía con las industrias metalmecánicas (orilla izquierda del río), y una última muestra en el bosque Ecoparque La Bandera el cual no se encuentra mayormente intervenido y su ubicación es a 10,67 km respecto a la industria metalmecánica más cercana.

Para la toma de muestras en la zona como se observa en las siguiente Figura se utilizó la metodología planteada por el IGAC, estas indican la secuencia del muestreo y la utilización de la aplicación Survey 123, que tenía una encuesta con la ubicación del punto, el código, la cantidad recolectada y una fotografía de la zona; todo ello con el fin de realizar un mapa para ubicar cada uno de los puntos.



Ilustración 14. Metodología para el muestreo de suelos aledaños al Río Cauca. **Fuente:** Autores, 2019.

Fase III.

Para llevar a cabo el objetivo tres se implementaron las metodologías seleccionadas de la siguiente manera:

- **Proceso químico:** Para implementar la metodología de preparación de nanopartículas de ferrita de manganeso (MnFe_2O_4) planteada por Eyvazia, B., Jamshidi, A., & Khodadadi en 2019, se procedió inicialmente a preparar 1500 mL de MnSO_4 a una concentración de 0,05 M, FeCl_3 a 0,1 M y NaOH a 0,4 M; seguido de esto se realizó el montaje de reflujo con la solución de NaOH hasta que esta llegara a punto de ebullición, con el fin de evitar su evaporación; simultáneamente se mezclaron las otras dos soluciones (MnSO_4 , FeCl_3) haciendo uso de una placa de calentamiento a 200 RPM por 30 minutos, lo que permitió la mezcla homogénea de las mismas. Cuando el NaOH llegó a punto de ebullición se agregó al montaje la mezcla que se agitó anteriormente, dejándolas por dos horas más para consolidar la formación de las nanopartículas.

Después se procedió a realizar lavados constantes utilizando la centrifuga y se repitió el procedimiento de diez a doce veces con el fin de neutralizar la solución, y posterior a ello se colocó en la estufa por 24 horas a 70°C para evaporar los residuos de sal en la misma; cuando las nanopartículas cumplieron el tiempo estimado se pasaron por un tamiz metálico de 425 micras para asegurar el tamaño de las mismas, ya que al tener un menor diámetro, se tiene una mayor área superficial para adherir mayor número de moléculas de cromo.

Por último se procedió con el montaje de las muestras de suelo del punto dos en la zona de Juanchito y Floralia en un lapso de 2,4 y 8 días, con una concentración de nanopartículas de ferrita de manganeso de 0,5 mg/L, 1 mg/L y 2 mg/L, estos ensayos se colocaban en el sonicador los primeros 30 minutos del proceso con el fin de que las nanopartículas se separan y se dispersaran en la solución, y en tiempo restante se mantuvieron en agitación constante a 200 RPM; cada uno de los montajes se realizó por duplicado con la finalidad de obtener un promedio estadístico. Finalmente se procede con la cuantificación de cromo en las muestras de suelo, por medio de la metodología de espectrofotometría UV, la cual requiere una celda blanco y otra con una solución preparada haciendo uso del kit de cromo.

En la siguiente figura se observa de forma sintetizada la metodología para la obtención de las nanopartículas, el montaje de los ensayos y la lectura de la concentración de cromo total después de los mismos:

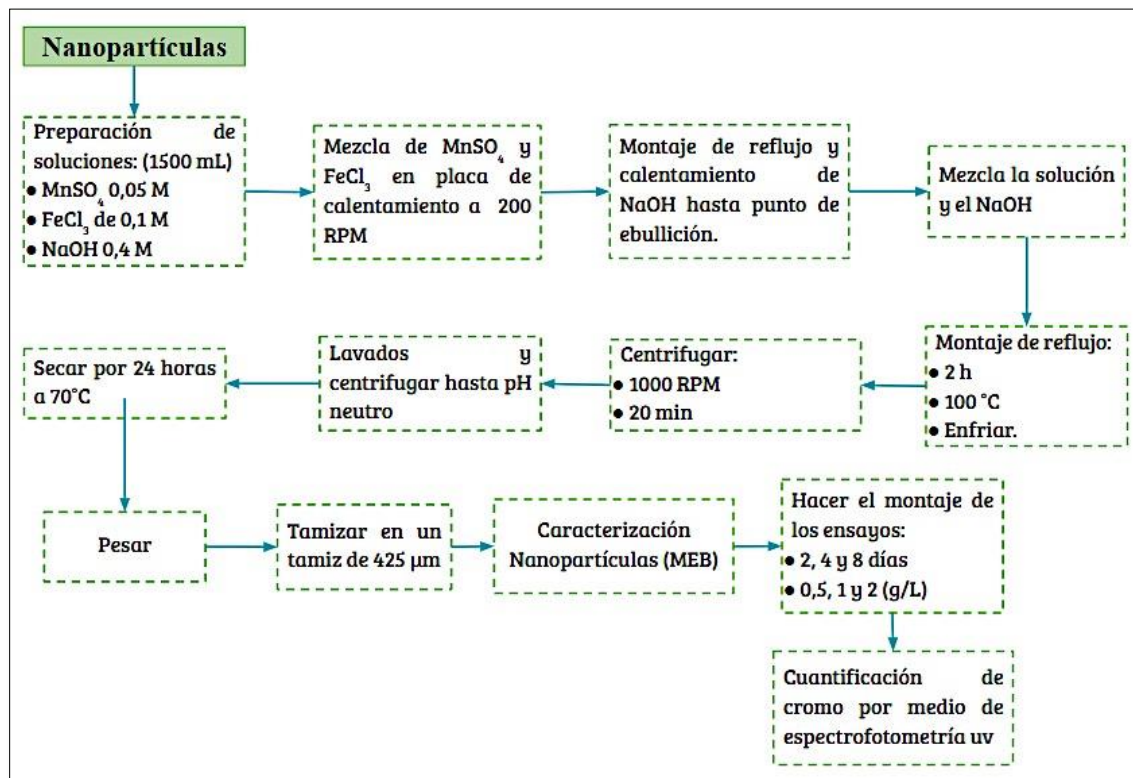


Ilustración 15. Metodología para el proceso Nanotecnológico. **Fuente:** Autores, 2019.

- **Proceso biológico:** Para llevar a cabo la metodología de fitorremediación se procedió con la siembra de ocho plántulas de lechuga, cada una en una maceta de 8 centímetros de profundidad, y 300 gramos de suelo del punto dos de la zona de Juanchito y Floralia. Dos de los montajes de cada zona fueron regados diariamente con una solución de leonardita previamente preparada (50cm^3 en 20 litros de agua), y los otros dos con agua; además estos fueron cubiertos con un domo plástico y posterior a ello se instaló un bombillo incandescente con el fin de aumentar la temperatura. Cuando las plantas llegaron a su estado de maduración en el día 35 fueron llevadas las muestras tanto de suelo como las de material vegetal al laboratorio Agrilab para la cuantificación de cromo por medio de la metodología de absorción atómica.

En la siguiente Figura se observa de forma sintetizada la metodología para el montaje de los ensayos del proceso de fitorremediación:

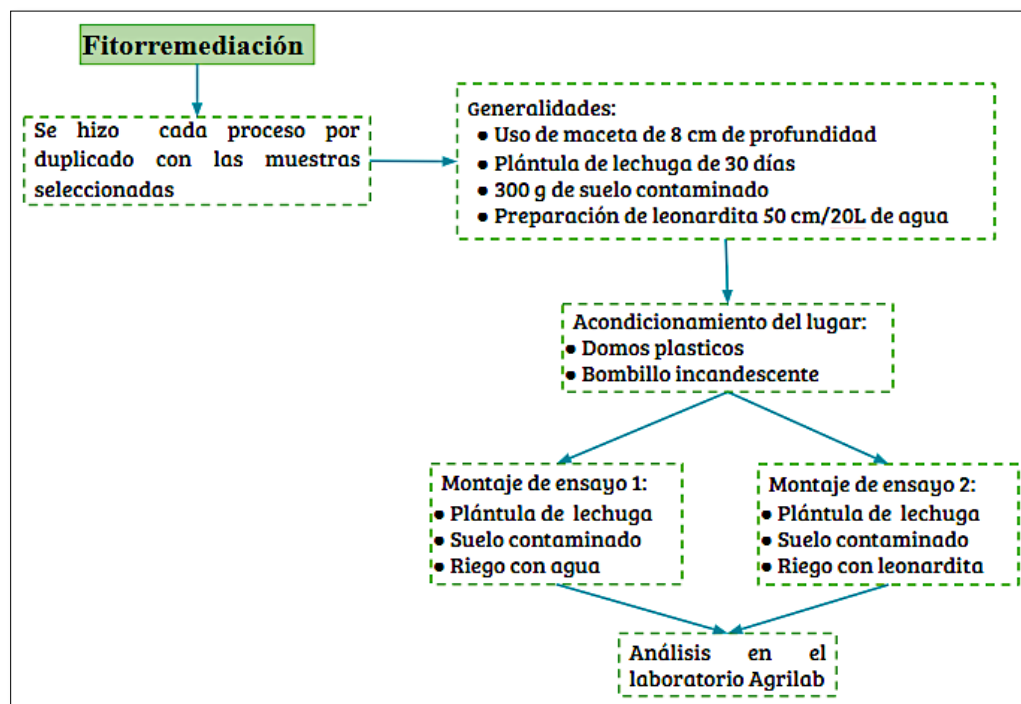


Ilustración 16. Metodología para el proceso de fitorremediación. **Fuente:** Autores, 2019.

12. Resultados, análisis y discusión:

Objetivo 1:

El cumplimiento del primer objetivo arrojó como resultado una matriz de información en la que se analizaron 13 estudios en inglés y 7 en español de procesos biológicos y químicos, a nivel nacional e internacional, en los que se encontraron artículos de revisión, científicos y tesis, los cuales fueron organizados cronológicamente y por el tema de los mismos. Para la selección del número de documentos mencionados anteriormente, se tuvo en cuenta que los documentos hicieran pruebas con el metal cromo en cualquiera de sus estados de oxidación, que los insumos para llevar a cabo la metodología fueran accesibles, y que la misma no superará el tiempo de duración de 4 meses; así mismo se identificaron los diferentes métodos aplicados para la reducción de la concentración de cromo en los suelos, y el aporte que estos proporcionaban al proyecto. Cada uno de los estudios seleccionados arrojaron diferentes metodologías acerca del muestreo en cuanto a la recolección, tratamiento, almacenamiento y preparación para el inicio del proceso químico y biológico, que indica detalladamente condiciones ambientales y el tiempo ideal de espera. En las siguientes tablas se puede identificar la matriz de información realizada en la que se eligieron diez procesos biológicos y diez químicos, y se determinó cual de ellos era el más favorable para aplicar y en la zona de estudio para su posterior comparación:

Tabla 6. Matriz de información de metodologías utilizadas para la reducción, acumulación o eliminación del cromo en suelos, basadas en procesos biológicos.

Técnicas biológicas				
Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2002	Buenos Aires, Argentina	Orroño, D.	Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género <i>Pelargonium</i> : suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad.	Fitorremediación
Aporte				
El uso de plantas ornamentales del género <i>Pelargonium</i> proporcionó una acumulación de los metales en los tallos, hojas y flores; sin embargo ésta no puede ser mayormente utilizada, en suelos con altas concentraciones.				
Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2010	Colombia, Bogotá	Bonilla, H., & Lora, R.	Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo.	Fitorremediación
Aporte				
Análisis y toma de muestras de 20 cm de profundidad de suelos cercanos al río Bogotá, en el cual se determinó la eficiencia de reducción de cromo y cadmio por medio de las plantas lechuga (<i>Lactuca sativa</i>) y pasto ryegrass (<i>Lolium multiflorum</i>), con la adición de carbonato de calcio y sulfato de hierro. Realizaron bloques al azar con tres réplicas y un blanco cada uno.				
Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología

2011	México, Hidalgo y San Luis de Potosí	Acosta, I., Cardenas, J., & Martínez, V.	Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de <i>Paecilomyces sp</i> resistente a Cromato.	Biorremediación
------	--------------------------------------	--	---	-----------------

Aporte

La cepa *Paecilomyces sp* al ser incubada en medio glucosa y otras fuentes de carbono, tuvo la capacidad en siete días, a 28°C, con un pH 4.0, y un inóculo de 38 mg de reducir el cromo VI a cromo III en un suelo contaminado con 50 mg/L de Cr (VI).

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2014	Ecuador, Sangolquí	Montes, L.	Especialización de concentración de metales pesados cromo, zinc y plomo en el complejo industrial fabrillfame y propuesta de remediación de suelos.	Fitorremediación

Aporte

Recolección de muestras homogenizadas y secadas a 70°C por 24 horas, para cuantificar el metal por medio de absorción atómica; en donde se extrae el metal por medio de la siembra de papa (*Solanum tuberosum*), rábano (*Raphanus raphanistrum subsp. sativus*), yuca (*Manihot esculenta*), papachina (*Colocasia esculenta*), se obtuvo una mayor eficiencia por parte de la papa china al bioacumular dicho metal.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2015	México, Pachuca de Soto y San Luis de Potosí	Acosta, I., Cardenas, J., Martínez, V., & Rivera, E.	Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de <i>Aspergillus niger</i> resistente al Cromato.	Biorremediación

Aporte

Se analizó la capacidad de reducción de Cr (VI) a Cr (III) de la cepa *Aspergillus niger* por medio del método colorimétrico de la difenilcarbazida, en el cual se determinó una mayor eficiencia cuando ésta era incubada en fuentes de carbono por 6 días a 28°C, a un pH de 5.3 y 6.2, con una velocidad de agitación de 100 rpm y un inóculo de 8.3 mg de peso seco.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2016	Colombia, Bogotá	Beltrán, M., & Gómez, A.	Biorremediación de metales pesados cadmio, cromo, y mercurio. Mecanismos bioquímicos e ingeniería.	Rizorremediación

Aporte

La adición de una cepa modificada de la bacteria *Ralstonia eutropha*, que tiene la capacidad de secuestrar metales en suelos contaminados, utilizaron la tecnología de la biosorción, se utilizó biomasa microbiana activa o inactiva para “secuestrar” los metales mediante su unión a la superficie celular de los microorganismos. Así mismo plantearon la posibilidad de realizar una sinergia entre microorganismos y plantas, para aumentar la eficiencia en la extracción de contaminantes, por lo que indicaron algunos microorganismos y plantas útiles para remover metales en específico.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2017	México, Irapuato	Covarrubias, S., & Peña, J.	Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación.	Rizorremediación

Aporte

Se llevó a cabo un estudio, en el que se determinó el beneficio que trae la sinergia entre microorganismos y plantas a la hora de reducir un contaminante, ya que el microorganismo estimula el rápido crecimiento de la planta, para que así mismo ésta pueda cumplir de una manera más eficiente con la reducción del contaminante.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2018	Grecia, Piera	Economou, M., Gasparatos, D., Petridis, A., & Raptisa, Stavros.	Chromium uptake by lettuce as affected by the application of organic matter and Cr(VI)-irrigation water: Implications to the land use and water	Fitorremediación

			management.	
Aporte				
Se determinó por medio del método de absorción atómica la concentración de Cr (VI) en muestras de suelo contaminadas, en donde se concluyó que se obtiene una mayor eficiencia en la reducción del contaminante con la leonardita como materia orgánica en la siembra de lechuga, que la siembra de lechuga sin adición de materia orgánica.				

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2018	Marruecos, Fez	Asri, M., Bahafid, W., El Ghachtouli, M., Kouchou, A., Sayel, H., Tahri, N., & Tirry, N.	Screening of plant growth promoting traits in heavy metals resistant bacteria: Prospects in phytoremediation.	Rizorremediación
Aporte				
En el estudio se llevó a cabo un proceso de rizorremediación en el que se hizo uso de la leonardita. Su rápido crecimiento y su capacidad de producir biomasa, permitió aumentar considerablemente la eficiencia de reducción de cromo, además el proceso fue mejorado, ya que se realizó una inoculación de <i>Cellulosimicrobium sp</i>, donde se concluyó que la absorción aumenta en un 43%.				

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2019	Pakistan, Islamabad	Ali, M., Ali, N., Aqeel, A., Amna., Asad, M., Hayat, K., Hussain, A., Jan, F., Javed, H., Manghwar, H., & Tariq, M.	Individual and combinatorial application of <i>Kocuria rhizophila</i> and citric acid on phytoextraction of multi-metal contaminated soils by <i>Glycine max L.</i>	Rizorremediación
Aporte				

Inocularon semillas de la planta *Glycine max L* (Soja) con la bacteria *K. rhizophila* para verificar la eficiencia de la acumulación de metales pesados como cromo, cadmio, cobre y níquel; para ello realizaron 4 procedimientos en los que estaba el no inoculado, el tratado con *K. rhizophila*, el tratado con 5 mmol kg⁻¹ de ácido cítrico (CA) y el tratado con *K. rhizophila* y ácido cítrico CA, siendo el último proceso, el más eficiente debido a que se aumentó la biomasa de la planta.

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 7. Matriz de información de metodologías utilizadas para la reducción, acumulación o eliminación del cromo en suelos, basadas en procesos químicos.

Técnicas químicas				
Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2003	Grand Est, Francia	Dupont, L., Guillon, E.	Removal of Hexavalent Chromium with a Lignocellulosic Substrate Extracted from Wheat Bran.	Sustrato lignocelulósico.
Aporte				
Para la recuperación del cromo hexavalente tóxico Cr (VI) se utilizó un sustrato lignocelulósico, derivado del proceso de tratamiento industrial del salvado de trigo, en el cual se estudió el mecanismo de adsorción de Cr (VI) sobre el sustrato lignocelulósico, se demostró que consume una gran cantidad de protones a lo largo de la reducción de Cr (VI) en Cr (III), además de observar que la oxidación de los restos de lignina tiene lugar simultáneamente a la reducción de cromo.				
Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2004	Japón	Sawada, A., Mori, K., Tanaka, S., Fukushima, M., Tatsumi, k.	Removal of Cr (VI) from contaminated soil by electrokinetic remediation.	Remediación electrocinética.
Aporte				

Los aniones cromados fueron removidos del suelo al reservorio anódico por la fuerza móvil de la electromigración, ya que los aniones de cromato que se acumulan en el reservorio anódico y se eliminan simultáneamente, mediante el uso de un adsorbente empaquetado en columna. Además, se encontró que el Cr (VI) se absorbía a este adsorbente de manera eficiente. En el proceso se mantiene el control del pH, lo que promueve la liberación de Cr (VI) del suelo por electromigración, permitiendo así la máxima adsorción de Cr (VI) en el tanino inmovilizado.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2005	Palma de Mallorca, España.	Long, X., Miró, M., Harald, B.	On-line dynamic extraction and automated determination of readily bioavailable hexavalent chromium in solid substrates using micro-sequential injection bead-injection lab-on-valve hyphenated with electrothermal atomic absorption spectrometry	Fraccionamiento de micro-secuencia de inyección.

Aporte

Se desarrolló un novedoso sistema, de fraccionamiento de micro-secuencia de inyección de bolas en laboratorio (μ SI-BI-LOV) para la extracción de cromo hexavalente en suelos contaminados. El enfoque ofrece varias ventajas ya que se da la separación inmediata con preconcentración del cromato liberado, la minimización de los riesgos de interconversión de Cr (VI) a Cr (III), la precisión mejorada y la no existencia de problemas de re-adsorción / redistribución junto con un patrón detallado de la cinética del proceso de lixiviación.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2008	Lousiana, USA	Merdoud, O., Djamal, E.	Electroremediation of an industrial area contaminated by chromium.	Electrocinetismo.

Aporte

Los experimentos de 20 días muestran que el uso de NaNO_3 en estos compartimentos induce una oxidación de cromo por el anión nitrato y su eliminación sólo a través de la membrana de intercambio aniónico hacia el ánodo. Otros iones (Cl^- y SO_4^{2-}) dan lugar a la transferencia de iones hacia los dos electrodos que muestran que el cromo está presente en dos estados de oxidación. El estudio ha demostrado una contribución a la comprensión de los mecanismos de eliminación en el curso de la electroremediación de un suelo contaminado por cromo.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2016	Shangai, China	Liu, C., Yang, J., & Yu, K.	Chromium immobilization in soil using quaternary ammonium cations modified montmorillonite: characterization and mechanism	Modificación química de montmorillonita.

Aporte

Se estableció un suelo contaminado con cromo hexavalente por medio de la modificación de la montmorillonita, en la primera se utilizó tetrametilamonio (TMA), se evidenció un aumento del área de superficie y el volumen de poros; la segunda modificación fue con hexadeciltrimetilamonio (HDTMA), allí identificaron que a diferencia del TMA hubo una disminución del área de superficie y el volumen de poros; sin embargo se evidenció que con las dos metodologías se lograba estabilizar el cromo en el suelo, en las diferentes condiciones de lixiviación por el proceso de adsorción en cada una.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2017	Shangai, China	Fu, R., Gu, Y., Wen, D., Xia, X., & Zhang, W.	Electrokinetic remediation of chromium (Cr)-contaminated soil with citric acid (CA) and polyaspartic acid (PASP) as electrolytes.	Remediación electrocinética.

Aporte

Utilizando dos electrolitos, el ácido cítrico (CA) y el ácido poliaspártico (PASP) para remediar suelos contaminados con cromo, en el estudio determinaron que con la aplicación de CA se mejora la eficiencia en la eliminación tanto del cromo total como del cromo (VI), mientras que la aplicación solo de PASP únicamente eliminó el cromo hexavalente, ya que el cromo total se unió al carbono; mientras

que la aplicación de las dos sustancias hace que se reduzca de cromo (VI) a cromo (III).

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2017	Turín, Italia	Bianco, A., De Luca, D., Ginepro, M., & Peracaciolo, E.	Chemical vs bio-mediated reduction of hexavalent chromium. An in-vitro study for soil and deep waters remediation.	Reducción química

Aporte

Evaluaron y compararon la eficiencia del enfoque bio-mediado con la reducción química en suelos contaminados con cromo VI, para el primero utilizaron glucosa, trehalosa y β -ciclodextrina y para el segundo sulfito de sodio, metabisulfito de sodio y ácido ascórbico. Determinaron que ambos métodos lograron reducir el Cr (VI), sin embargo la glucosa y el ácido ascórbico arrojaron mejores resultados, y entre los dos el mejor fue el ácido ascórbico, debido a que aunque es más costoso, logró disminuir el contaminante en 24 horas en un 100%.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2018	Chengdu, China	Liu, B., Liu, Y., Wang, J., Wang, T., Wang, X., & Wang., Y.	In-situ remediation of hexavalent chromium contaminated groundwater and saturated soil using stabilized iron sulfide nanoparticles.	Nanotecnología

Aporte

Sintetizaron nanopartículas de sulfuro de hierro (FeS) y posteriormente fueron estabilizadas con carboximetil celulosa, luego las aplicaron para remediar suelos saturados con Cr (VI), lograron identificar que el pH y materia orgánica son variables que influyen en la movilización del cromo, también identificaron que el método fue efectivo ya que logró disminuir la lixiviación del cromo (VI) tanto en la superficie como a la profundidad a la que fue recolectada la muestra.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de
-----	-------------	-------	--------	---------

				metodología
2018	Alexandria, Egipto	Elkhatibb, E., Mesalemb, M., & Moharema, M.	Remediation of chromium and mercury polluted calcareous soils using nanoparticles: Sorption – desorption kinetics, speciation and fractionation.	Cinética de sorción-desorción

Aporte

Se realizaron experimentos de especiación y fraccionamiento. La aplicación de nanopartículas residuales demostraron que la enmienda con dicha tecnología aumentó significativamente la concentración de metales en la fracción residual, y disminuyó simultáneamente las formas más accesibles de Hg y Cr.

Año	País/Ciudad	Autor	Título	Tipo de metodología
2019	Tehran, Iran	Eyvazia, B., Jamshidi, A., & Khodadadi, A.	Immobilization of hexavalent chromium in contaminated soil using nano-magnetic MnFe ₂ O ₄ .	Nanotecnología

Aporte

Prepararon nanopartículas de MnFe₂O₄ de menos de 200 nm para inmovilizar el cromo (VI) de un suelo contaminado, determinaron que la relación de 1 nanopartícula cada 2 gramos de suelo logra disminuir la lixiviación del Cr (VI) por su inmovilización.

Fuente: Autores, 2019.

Para la selección de un artículo con temática química y biológica se plantearon como criterios de selección que el tiempo de implementación no superará los dos meses, ya que este era el periodo con el que se contaba para la culminación del proyecto, que la metodología planteada en el artículo logrará la reducción del 65% de la concentración de cromo, que los insumos utilizados fueran accesibles, ya que se debía contar con la disponibilidad de materiales y equipos del laboratorio de la Universidad El Bosque, que en general los procesos fueran novedosos, es decir que el rango de los artículos estuviera entre el 2016 y 2019, y específicamente para el proceso biológico que se hiciera uso de una planta nativa y la fenología de la misma. Luego de la selección de los estudios del proceso químico y biológico se diseñó la siguiente tabla de requerimientos de cada uno, con el fin de establecer los parámetros que estos cumplieran y sus ventajas.

Tabla 8. Requerimientos en un proceso químico y biológico para reducir cromo total.

Requerimientos	
Proceso químico	Proceso biológico
No necesita adiciones de otros procesos	Adaptabilidad a condiciones climáticas
No necesita grandes cantidades de suelo	Crecimiento de la planta de dos meses
Rápida implementación del método	No bioacumulación del metal en la planta
No alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo	
Reducción o inmovilización del cromo	
Tiempo máximo de implementación de dos meses	

Fuente: Autores, 2019.

- En los procesos biológicos se evidenció que se aplican distintas técnicas, una de éstas la bioremediación, en la que hacen uso de microorganismos (hongos y bacterias) para reducir o bioacumular el contaminante mediante condiciones de incubación específicas, dentro de las cuales se determinó que aunque es una técnica que reduce significativamente el contaminante, no cumple con el tiempo máximo de dos meses establecido en los requerimientos iniciales. La técnica denominada rizorremediación, consiste en hacer una simbiosis de las dos técnicas mencionadas anteriormente, ya que usualmente inoculan la raíz o las semillas de las plantas con un microorganismo, creando una relación biológica en la que se genera un beneficio mutuo entre las partes y se logra aumentar la capacidad en la reducción, eliminación o bioacumulación del contaminante, sin embargo, esta metodología no fue seleccionada ya que el procedimiento presenta cierta dificultad respecto a las pruebas de antagonismo y su verificación de efectividad en el suelo contaminado, como se menciona en el artículo de Valenzuela del 2014.

Teniendo en cuenta los criterios de selección, se procedió con la elección de un artículo con temática biológica realizado en Grecia, Piera por Economou, Gasparatos, Petridis, & Raptisa en 2018 en el cual se logró una reducción del 92% del contaminante con la siembra de lechuga (*Lactuca Sativa*) y la leonardita, el cual fue seleccionado ya que la planta nativa es capaz de crecer en diferentes pisos térmicos y en un término de 2 meses, además el uso de esta y la leonardita permiten que el contaminante se reduzca y no se bioacumule en el sistema vegetal, y por último este proceso no altera las propiedades fisicoquímicas del suelo, lo anterior se consideran los requerimientos del método como se evidencia en la *tabla 8*.

La lechuga (*Lactuca Sativa*) se considera una planta acumuladora que tiene la capacidad de asimilar el cromo e introducirlo a su sistema comenzando en la raíz (puesto que este es su primer contacto con el suelo), y luego transferirlo y concentrarlo en el tallo y las hojas como se indica en el modelo propuesto en la *Figura 17* (Alcoba, 2014), sin embargo como uno de los requerimientos es evitar la bioacumulación en la planta, se hace uso de la leonardita que es según Economou et al (2018) una forma oxidada de lignito, en donde esta actúa como ácido húmico permitiendo el aumento en el porcentaje de materia orgánica, además esta permite la generación del efecto quelato (Universidad de Pamplona, 1997), el cual consiste en reemplazar las moléculas de agua del metal para formar un anillo con el ion metálico, en donde el metal (cromo) queda rodeado de una molécula orgánica (agente quelante), generando un aislamiento con la matriz suelo y las propiedades que favorecen su precipitación como se aprecia en la *Figura 18* (Lucena, 2009), lo que a su vez beneficia la reducción del cromo total y genera una menor bioconcentración del mismo en la raíz de la planta. Cabe resaltar que este efecto quelato modifica algunas propiedades del ión metálico como el color, la solubilidad, o la reactividad química; y así mismo permite que dicho metal quede retenido por la materia orgánica, dejando así de estar disponible en el matriz suelo.

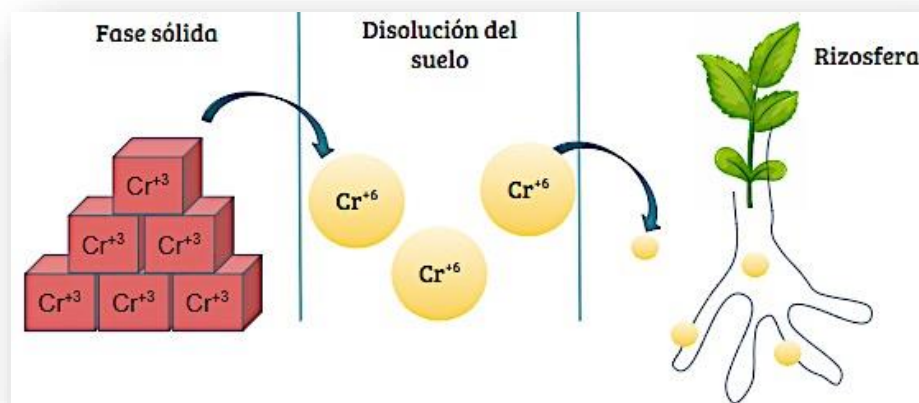


Ilustración 17. Mecanismo biológico de la leonardita. **Fuente:** Autores, 2019.

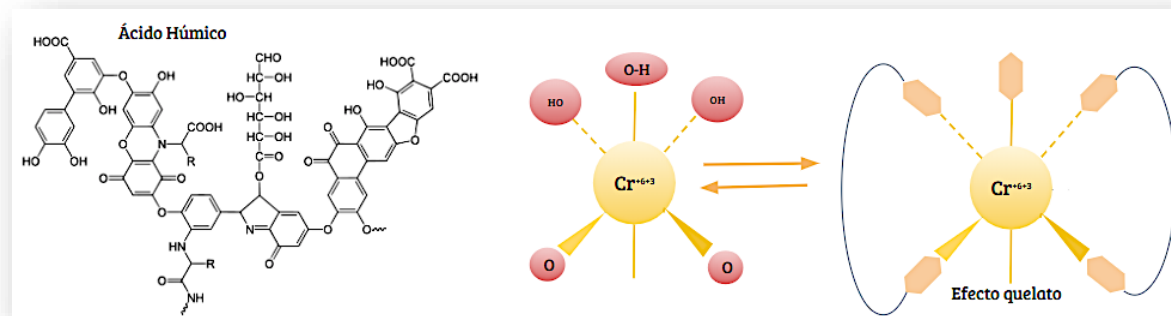


Ilustración 18. Mecanismo biológico de la leonardita. **Fuente:** Autores, 2019.

- En los procesos químicos se encontraron numerosas técnicas dentro de los que se destacan las de nanotecnología, utilización de sustancias químicas, cinética, adsorción y modificación, ya que hacen uso de metodologías novedosas para la eliminación, acumulación o reducción del cromo en los suelos. Así mismo, teniendo en cuenta los criterios de selección se realizó la elección de un estudio en Tehran, Iran realizado por Eyvazia, Jamshidi, & Khodadadi en 2019 en el que se prepararon nanopartículas de MnFe_2O_4 de menos de 200 nm para inmovilizar el cromo (VI) de un suelo contaminado, determinando que la relación de 1 nanopartícula por cada 2 gramos de suelo logra disminuir la lixiviación del Cr (VI) del 70,95% al 4,22% por su inmovilización; este artículo fue elegido porque su tiempo de implementación es de 1 mes y no requiere de procesos adicionales para su funcionamiento como lo puede ser la adición de compuestos químicos ajenos al proceso como se evidencia en la *Tabla 8*.

El proceso del estudio consiste en la conformación de nanopartículas de MnFe_2O_4 y el mecanismo químico de dichas nanopartículas se basa en la capacidad de formar una estructura electrónica con 6 enlaces entre el hierro y el manganeso, y además de ello pueden tener otro enlace coordinado a otro metal, que en este caso sería el cromo total. También este proceso permite conocer la sinergia entre los metales involucrados que conforman la nanopartícula para retener el cromo de forma física o química, y establecer así si el uso de una baja cantidad de nanopartículas es suficiente para retener el contaminante (Eyvazia, Jamshidi, & Khodadadi, 2019).

El hierro puede estar en una mezcla Fe^{+2} o Fe^{+3} debido a que este es altamente inestable en el ambiente, y es por ello que cuando se combina con el manganeso, este pierde dos electrones pasando de Mn^{+2} a Mn^{+4} . Al tener la mezcla Fe^{+2} o Fe^{+3} en las nanopartículas y al utilizar un agente oxidante como el hidróxido de sodio (NaOH) para formar los óxidos de los metales al final del proceso (hierro y manganeso) se beneficia la nube electrónica formada; sin embargo en este momento de la reacción el pH se encuentra alcalino por lo que se presenta la formación de hidróxidos y es por ello que se controla dicho factor, es decir que se debe estandarizar la solución para conformar los óxidos de los metales, lo cual es relevante ya que estos permiten que la reacción llegue a una estabilidad química, no se degraden y no generan modificaciones en la matriz suelo (Bolarin et al, 2007).

Finalmente se determina que las nanopartículas son un sólido compuesto por combinación de los dos metales que a su alrededor tiene oxígenos, obteniendo una nube electrónica con procesos de oxido-reducción bien sea por fisisorción (atracción netamente física) o quimiadsorción (atracción química que permite interacción o un enlace); además se sugiere por estudios previos dentro de las nanopartículas como se evidencia en la *Figura 19* se forman estructuras cristalinas que permiten retener el cromo dentro de la misma debido a que estas son muy polares y el cromo es deficiente de carga; cuando el cromo se adhiere como se explica en el diagrama de la *Figura 20*, este se aloja en los espacios de la partícula por fenómeno de adsorción, y entre entre más pequeña sea la nanopartícula el metal tendrá una mayor área superficial para ocupar (Bolarin et al, 2007).

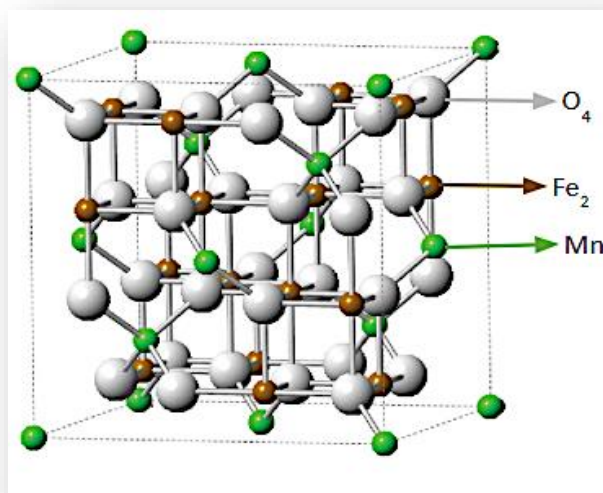


Ilustración 19. Estructura cristalina de las nanopartículas de MnFe_2O_4 .

Fuente: Autores, 2019 con base en Hong, Yang & Wu, 2011

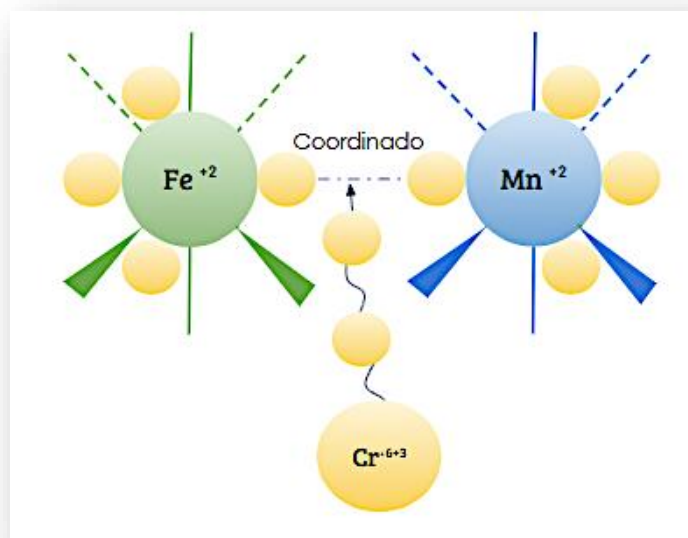


Ilustración 20. Diagrama del mecanismo químico, en el que el cromo se adhiere en los espacios vacíos de la estructura cristalina de las nanopartículas de MnFe_2O_4 . **Fuente:** Autores, 2019.

Objetivo 2:

El segundo objetivo planteado en el proyecto de grado se cumplió a cabalidad, ya que en la salida de campo (*Ver anexo 1*) se recolectaron seis muestras de suelo, en donde tres de ellas fueron tomadas en el barrio Floralia de Cali, las cuales cuentan con una cercanía considerable a las empresas metalmecánicas de la zona y dos muestras recolectadas en Juanchito en el límite con Calí, el cual tenía una cercanía con cultivos de caña de azúcar; por último la muestra número seis se denominó blanco ya que fue recolectada en un bosque que no ha sido mayormente intervenido por acciones antrópicas y es cercano al Ecoparque La Bandera.

Finalmente, las seis muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio Agrilab en el que se determinó la concentración de cromo total por medio de la metodología de espectrofotometría de absorción atómica en la que se utiliza la absorción de la luz (ley de Beer- Lambert) para medir la longitud de onda específica de cada átomo, y así cuantificar la concentración del metal con una sensibilidad de $\mu\text{g/L}$ (Molina, 2013). Para la codificación de resultados que se arrojan a continuación en la *Tabla 9*, se hizo uso de la letra F para las muestras 1, 2 y 3 recolectadas en la zona de Floralia y el uso de la letra J para las muestras 1 y 2 recolectadas en la zona de Juanchito:

Tabla 9. Resultados fisicoquímicos de las muestras.

Resultados fisicoquímicos							
Variable	Unidad	Farillon Floralia			Cultivos Juanchito		Blanco
		F1	F2	F3	J1	J2	
Cromo	(µg/kg)	35200	41400	31500	40400	41800	22200
pH	pH	6,9	7,46	6,24	7,55	7,75	5,23
Carbón orgánico	%	1,38	1,22	0,896	1,58	1,94	4,02
CIC	meq/100g	15	18,1	10,8	36,3	34,5	9,74
Materia Orgánica	%	2,38	2,1	1,54	2,72	3,34	6,93
Hierro	mg/kg	105	657	612	42	5,34	49,2
Manganeso	mg/kg	348	248	169	157	87	44,6
Textura	-	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
Arcilla	%	48	50	52	50	50	54
Arena	%	44	42	44	44	40	12
Humedad	%	27,7	26	25,7	26,2	27,7	28

Fuente: Autores, 2019.

La normativa que se tuvo en cuenta para el análisis de las 6 muestras son los rangos obtenidos por la EPA en 1996, que indica la concentración de cromo en los rangos normales y tóxicos frente a la salud humana y ecológica evidenciado en la *Tabla 10*, en el presente estudio se encontró que cada una de las muestras sobrepasan los rangos tóxicos establecidos, donde las muestras del punto dos de la zona de Juanchito y Floralia obtuvieron las más altas concentraciones y el blanco con la menor, como se observa en la *Figura 21*.

Tabla 10. Cantidad de cromo según la normatividad

Contenido de cromo (µg/kg)	
EPA 1996 (rango normal)	100 - 500
EPA 1996 (rango tóxico)	5000 - 30000

Fuente: Autores, 2019 con base en Mahecha et al (2015)

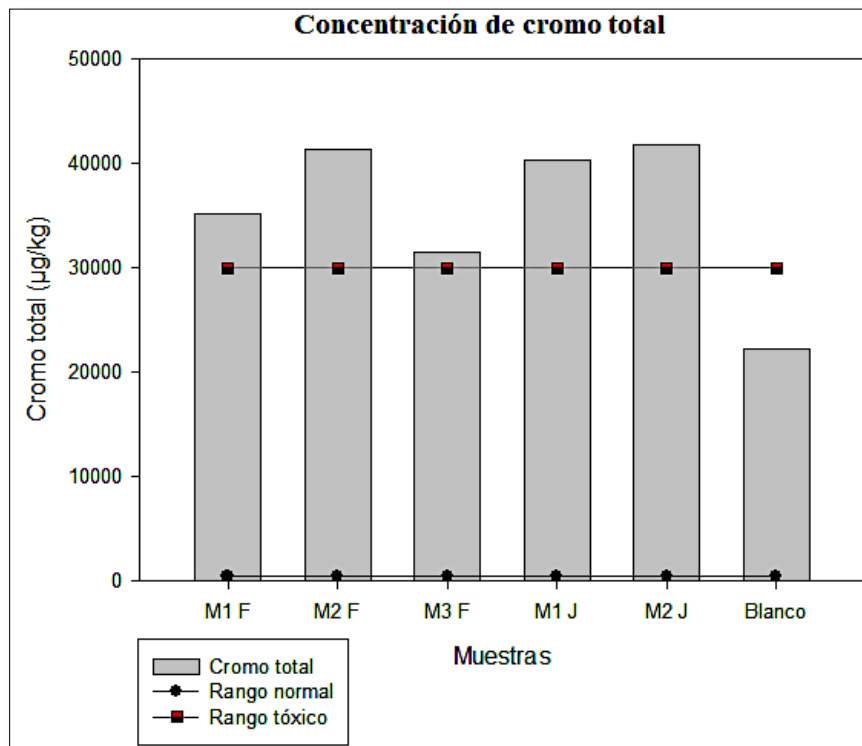


Ilustración 21. Gráfica de la concentración de cromo de las seis muestras relacionada con los rangos de la EPA.

Fuente: Autores, 2019 con base en Mahecha et, 2015

De acuerdo con la *Tabla 9* y la *Figura 22* de la de Soil Survey Center, la textura en las tres zonas de estudio fue arcillosa; así mismo se identificó para Floralia y Juanchito, aunque la arcilla ocupa el 45%, la fracción de arena es casi equivalente a la de arcilla; mientras que en la muestra del blanco la textura tiene un bajo porcentaje de arena.

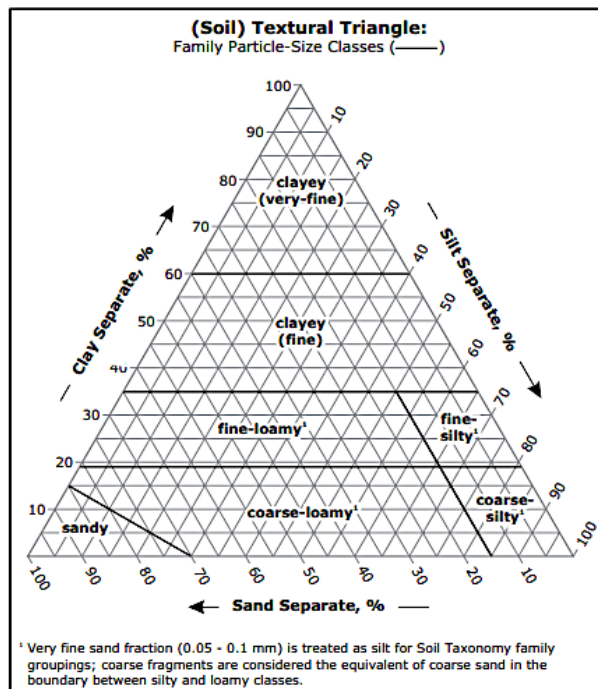


Ilustración 22. Triángulo textural.

Fuente: Soil Survey Center, 2012

También se observó dentro de las propiedades físicas en la *Tabla 9* que el alto contenido de humedad de las zonas estudiadas y del blanco sobrepasan los rangos altos propuestos por el libro del IGAC (2016) como se indica en la *Tabla 11* y la *Figuras 22* y *23*. Por lo descrito anteriormente acerca de la textura y humedad de los suelos analizados se evidencia que dichas propiedades permiten al suelo retener con mayor facilidad el cromo, y es por ello que se presenta su alta concentración.

Tabla 11. Rangos de porcentaje de humedad establecidos en el libro del IGAC (2016).

Propiedades físicas	Bajo	Medio	Alto
Humedad	5 - 15	15-25	25-35

Fuente: Autores, 2019 con base en IGAC, 2016

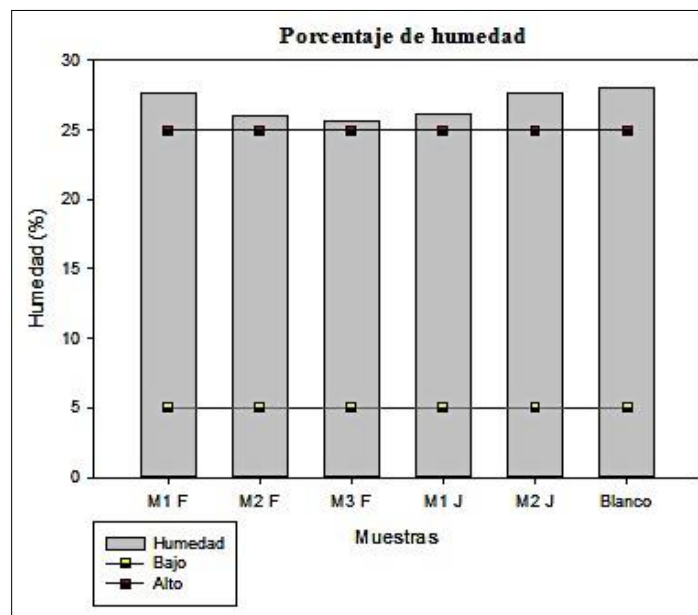


Ilustración 23. Gráfica del porcentaje de humedad de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.

Fuente: Autores, 2019

Después del análisis de las propiedades químicas y su comparación con los rangos propuestos en el libro del IGAC (2016) los cuales se muestran en la *Tabla 12*, se evidenció que los resultados de las propiedades químicas de las muestras recolectadas en estos tres puntos varían significativamente como se evidencia en la *Tabla 9*, ya que las muestras de Juanchito muestran que el manganeso se encuentra fuera de los valores óptimos debido a que está en altas concentraciones; en las muestras tomadas en Floralia se evidencia que el hierro y el manganeso se encuentran en concentraciones muy altas; y en cuanto a los elementos del blanco se observa que el hierro y manganeso se encuentran en niveles apropiados.

Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas de los suelos.

Propiedades químicas	Bajo	Medio	Alto
pH	6,1- 6,5	-	7,4-7,8
CIC	< 10	10-20	> 20
Carbono orgánico	1-1,5	1,5-2,5	2,5-6
Materia orgánica	< 2 -5	5-10	>10
Manganeso	<5-10	10-50	>50
Hierro	< 5 - 10	10 - 50	> 50

Fuente: Autores, 2019 con base en IGAC, 2016

También se determinó que aunque el resultado obtenido de materia orgánica, en las dos zonas de estudio fue de un nivel medio, y para carbono orgánico se obtuvieron un nivel bajo como se muestra en las *Tablas 9 y 12*, y en la *Figura 24*; lo que propicia a que se generen condiciones ideales para la alta retención de cromo en el suelo. Sin embargo aunque en la muestra del blanco se tuvo un óptimo porcentaje de materia orgánica, los niveles de carbono orgánico sobrepasan el rango alto.

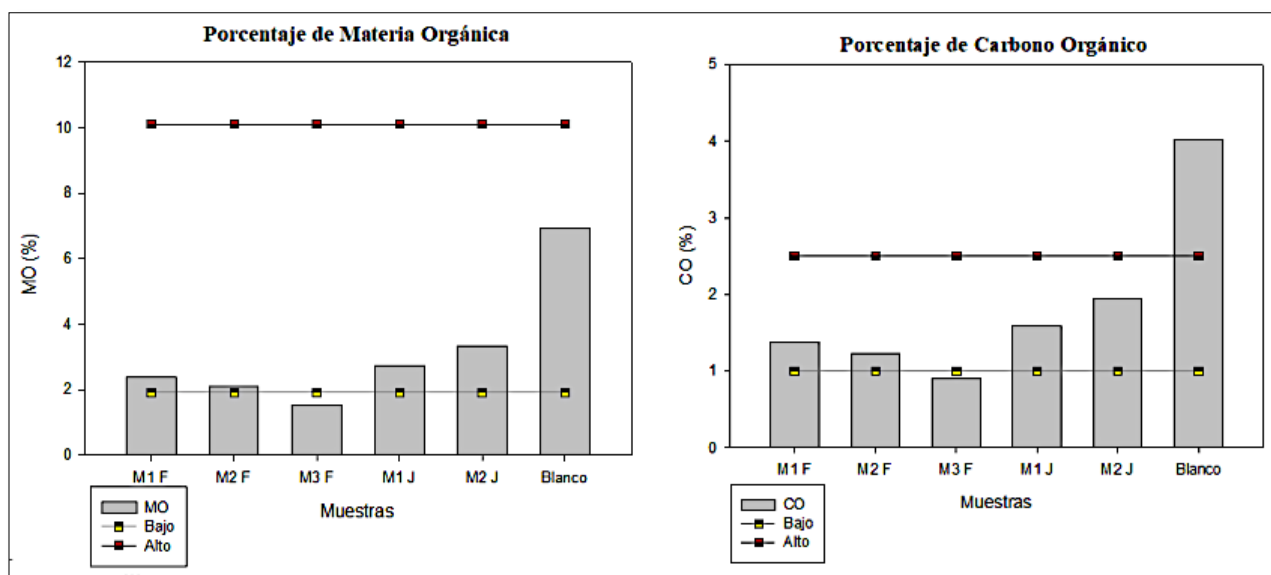


Ilustración 24. Gráfica del porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.

Fuente: Autores, 2019

Como se evidencia en la *tabla 9*, el pH de las zonas muestreadas se encuentra en un rango neutro, lo que indica que se encuentran en los rangos normales propuestos por el IGAC (2016) como se evidencia en la *Tabla 12* y la *Figura 25*. Sin embargo la muestra del blanco se encuentra por debajo de los niveles mínimos, ya que tiene un pH ácido.

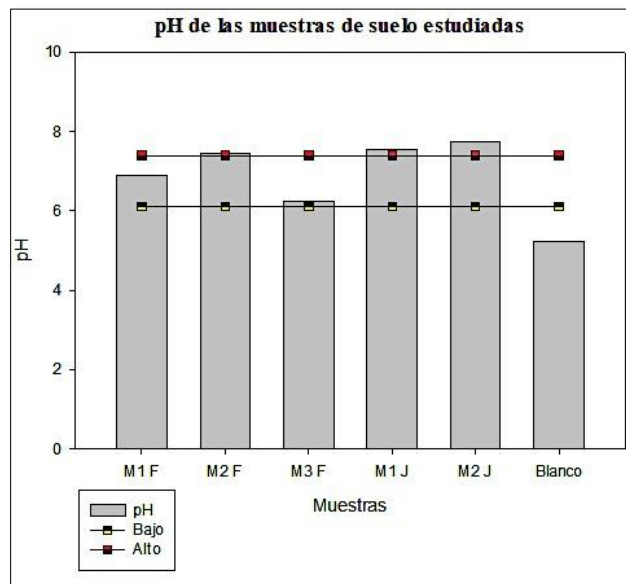


Ilustración 25. Gráfica del pH de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.

Fuente: Autores, 2019

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico según la *Tabla 9*, los resultados varían significativamente, ya que al compararlos con los rangos propuestos por el IGAC (2016), como se evidencia en la *Tabla 12* y *Figura 26*, el blanco se encuentra por debajo del nivel mínimo, la zona de floralia cuenta con un nivel óptimo y la zona de Juanchito sobrepasa los límites máximos.

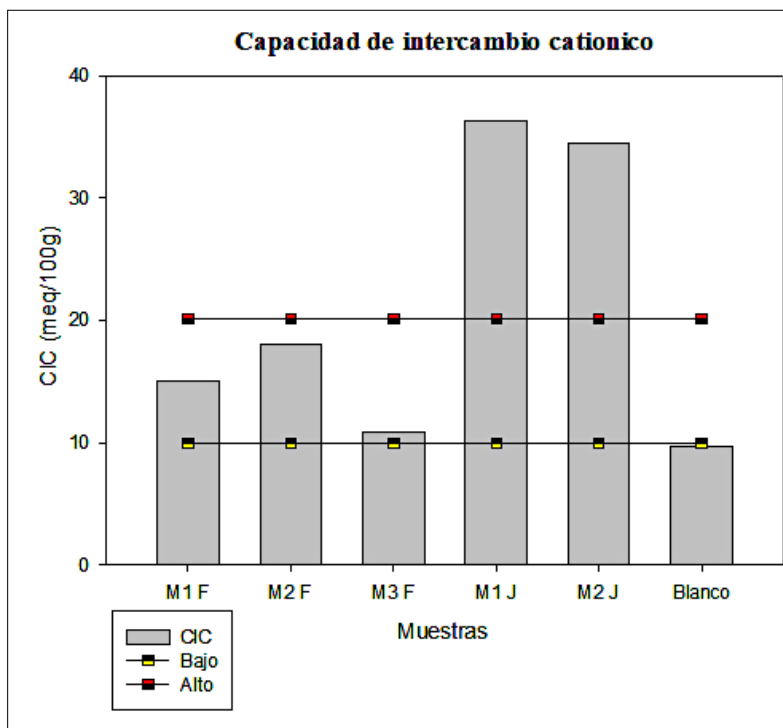


Ilustración 26. Gráfica de la CIC de las seis muestras relacionado con los rangos propuestos por el IGAC, 2016.

Fuente: Autores, 2019

Finalmente se evidenció que los resultados arrojados de las seis muestras tomadas en la zona de estudio presentan una estrecha correlación entre las propiedades fisicoquímicas establecidas según Murcia (2014) y la alta concentración de cromo total, ya que se evidenció la presencia de óxidos de hierro y manganeso, un pH de ácido a neutro, un alto porcentaje de humedad y arena, suelos con un nivel medio en materia orgánica, y un nivel bajo de carbono orgánico y capacidad de intercambio catiónico.

Objetivo 3:

El tercer objetivo planteado en el proyecto de grado se llevó a cabalidad, ya que se implementaron los procesos seleccionados y se lograron comparar determinando la eficiencia de cada uno de la siguiente manera:

→ Proceso biológico

Se procedió con la realización de un diseño experimental factorial tomando como fuente el documento de Nina (2014), el cual permitió conocer la cantidad de muestras a evaluar en el proceso, teniendo en cuenta el duplicado del ensayo de la lechuga regada con leonardita y el ensayo de la lechuga regada con agua, las cuales eran sembradas en el suelo de la zona correspondiente, como se observa en la *Tabla 13*. La realización de los montajes da como resultado 8 muestras en total, puesto que se obtienen cuatro muestras de suelo y cuatro muestras de material vegetal como se evidencia en la *Tabla 14*, por último, cabe resaltar que el proceso se llevó a cabo en las dos zonas de recolección escogidas (punto 2 de Juanchito y Floralia) por lo que se obtuvo un total de 16 muestras.

Tabla 13. Convenciones de los ensayos realizados

Convenciones Muestra	
A1	Lechuga
A2	Lechuga + Leonardita
B	Suelo

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 14. Diseño experimental proceso biológico

Diseño experimental por zona de estudio	
	B x2
A1 x2	4(A1B)
A2 x2	4(A2B)
TOTAL	8

Fuente: Autores, 2019.

El acondicionamiento de las 16 muestras que se evidencian en la *Figura 27 A*, se llevó a cabo con un domo plástico como se muestra en la *Figura 27 (C)*, ya que este al tener un material de plástico reforzado (biocomposito entre un plástico y fibra de vidrio) adquiere propiedades importantes para formar el efecto invernadero en las muestras, en donde la radiación era absorbida por las plantas, que a su vez se calientan, emitiendo radiación infrarroja, que no puede escapar; además de ello, se utilizó un bombillo incandescente como se muestra en la *Figura 27 (B)*, que permitió aumentar la temperatura de la zona y así mejorar las condiciones para llegar a un adecuado efecto invernadero.

La lechuga dentro de su fenología llega a su estado de maduración el día 65 (Bouzo et al, 2006), sin embargo al utilizar una plántula de 30 días el proceso biológico implementado en el proyecto finalizó cuando la planta llegó al día 35. Así mismo se determinó que la siembra de la lechuga y el suelo contaminado tuvo un adecuado resultado, ya que el crecimiento fue el esperado por la planta y se evidenció que se encontraba saludable y con una coloración idónea como se evidencia en la *figura 28 (A)*; además se observó que las lechugas regadas con leonardita eran un poco más grandes y verdes en comparación con las que fueron regadas con agua.



Ilustración 27. Implementación de proceso biológico (fitorremediación).

Fuente: Autores, 2019.

Los resultados obtenidos determinaron la concentración de cromo total en las muestras de suelo y de material vegetal, de las cuales se obtuvo un valor promedio (ver *Tablas 15 a 19*) para determinar el porcentaje de reducción de la concentración del metal en el suelo (ver *ecuación 1*) y el porcentaje de retención de la lechuga (ver *ecuación 2*) en los dos ensayos implementados.

$$\% \text{ reducción } Cr = \frac{(Cr_0 - \bar{C})}{Cr_0} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde Cr_0 es la concentración inicial de cromo analizada en el objetivo 2, y $\bar{C}$ es el promedio de la concentración de cromo obtenida después de realizar los ensayos A1 y A2. A continuación se evidencia la muestra de cálculo realizada en Floralia con el ensayo A1, este procedimiento se realizó con cada zona:

$$\% \text{ reducción } Cr = \frac{(41400 \mu g/kg - 32300 \mu g/kg)}{41400 \mu g/kg} * 100 = 21,981\%$$

Tabla 15. Concentración de cromo total en las muestras de suelo de la zona de Floralia.

Floralia contenido de cromo en muestras					
Concentración de Cr inicial F2	Ensayo	Muestra suelo 1 (µg/kg)	Muestra suelo 2 (µg/kg)	Promedio	Reducción (%)
41400	Lechuga + Agua (A1)	33300	31300	32300	21,981
	Lechuga + Leonardita (A2)	32700	49400	32700	21,014

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 16. Concentración de cromo total en las muestras de suelo de la zona de Juanchito.

Juanchito contenido de cromo en muestras de suelo					
Concentración de Cr inicial J2	Ensayo	Suelo 1 (µg/kg)	Suelo 2 (µg/kg)	Promedio	Reducción (%)
41800	Lechuga + Agua (A1)	47800	43700	45750	-9,4497%
	Lechuga + Leonardita (A2)	43400	40300	41850	-0,11960%

Fuente: Autores, 2019.

$$\% \text{ retención Cr en la lechuga} = \frac{\bar{C}}{Cr_0} * 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

En donde Cr_0 es la concentración inicial de cromo analizada en el objetivo 2, y $\bar{C}$ es el promedio de la concentración de cromo obtenida después de realizar los ensayos A1 y A2. A continuación se evidencia la muestra de cálculo realizada en Floralia con el ensayo A1, este procedimiento se realizó con cada zona:

$$\% \text{ retención Cr en la lechuga} = \frac{2335 \mu\text{g/kg}}{41400 \mu\text{g/kg}} * 100 = 5,6401\%$$

Tabla 17. Concentración de cromo total en las muestras de material vegetal de la zona de Floralia.

Floralia contenido de cromo en muestras de material vegetal					
Concentración de Cr inicial F2	Ensayo	Lechuga 1 (µg/kg)	Lechuga 2 (µg/kg)	Promedio	Retención (%)
41400	Lechuga + agua (A1)	2020	2650	2335	5,6401%
	Lechuga + Leonardita (A2)	3690	2830	3260	7,8744%

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 18. Concentración de cromo total en las muestras de material vegetal de la zona de Juanchito.

Juanchito contenido de cromo en muestras de material vegetal					
Concentración de Cr inicial J2	Ensayo	Lechuga 1 (µg/kg)	Lechuga 2 (µg/kg)	Promedio	Retención (%)
41800	Lechuga + Agua (A1)	3830	2720	3275	7,8349%
	Lechuga + Leonardita (A2)	2670	4620	2670	6,3875%

Fuente: Autores, 2019.

bioacumulación Cr en la lechuga = $\bar{C}$ – punto de referencia (Ecuación 3)

% *bioacumulación Cr en la lechuga* = $\frac{\text{bioacumulación}}{\text{punto de referencia}} * 100$ (Ecuación 4)

En donde Cr_0 es la concentración inicial de cromo analizada en el objetivo 2, y $\bar{C}$ es el promedio de la concentración de cromo obtenida después de realizar los ensayos A1 y A2. A continuación se evidencia la muestra de cálculo realizada en Juanchito con el ensayo A2, este procedimiento se realizó con cada zona:

% *bioacumulación Cr en la lechuga* = $2670\mu\text{g/kg} - 2490\mu\text{g/kg} = 180\mu\text{g/kg}$

% *bioacumulación Cr en la lechuga* = $\frac{180\mu\text{g/kg}}{41800\mu\text{g/kg}} = 7,23\%$

Tabla 19. Concentración de cromo total en las muestras de material vegetal de la zona de Juanchito.

Bioacumulación de cromo total en el material vegetal					
Concentración de Cr inicial (µg/kg)	Ensayo	Punto de referencia (µg/kg)	Promedio (µg/kg)	Bioacumulación (µg/kg)	Bioacumulación (%)
41400 Floralia	Lechuga + Agua (A1)	2490	2335	-155	-6,22%
	Lechuga + Leonardita (A2)		3260	770	30,9%
41800 Juanchito	Lechuga + Agua (A1)		3275	785	31,5%
	Lechuga + Leonardita (A2)		2670	180	7,23%

Los resultados obtenidos de la concentración de cromo total, en el suelo periten evidenciar que el mayor porcentaje de reducción se presentó tanto en el ensayo A1 como en el A2, en la zona de Floralia con un 21,981% y 21,014% respectivamente como se evidencia en la *Tabla 15*; sin embargo en la zona de Juanchito se presentó un aumento en la concentración de cromo total, tanto en el ensayo A1 como en el A2 con un valor de -9,4497% y -0,11960% respectivamente como se observa en la *Tabla 16*, no obstante se evidenció que el ensayo A2 no tuvo aumento ni reducción significativa en dicha zona; este aumento se pudo presentar por los fenómenos de fitoestabilización en el que el contaminante se alojaba en el suelo y fitoimmobilización en el que se genera un compuesto diferente que permite la inmovilización del cromo; sin embargo al no estudiar los métodos por separado no se puede asegurar cual de ellos se dio en el presente proyecto.

Además, los resultados de fitoacumulación demostraron que la lechuga retuvo un porcentaje del contaminante poco significativo, ya que según WEPAL (1993), que es un programa de evaluación para laboratorios analíticos en el que residen diferentes documentos que los laboratorios toman como punto de referencia según la medición que realicen, la concentración traza de cromo total en una lechuga es de aproximadamente 2490 µg/kg y como se evidencia en la *tabla 18*, la lechuga con mayor porcentaje de bioacumulación corresponde al ensayo A1 en la zona de Juanchito con un porcentaje de 31,5%, suceso opuesto en la zona de Floralia, ya que en el ensayo A1 la lechuga no bioacumulo el cromo total.

Los ensayos que contenían leonardita (A2) sugieren que el ácido húmico aumentará la concentración de materia orgánica, y con ello la capacidad de intercambio catiónico, y como esta propiedad permite que el suelo libere iones positivos y se generen condiciones de óxido reducción en el mismo (IGAC, 2016), posiblemente se genera a una mayor liberación de iones de cromo, lo cual explicaría el incremento en la concentración del metal en las muestras de Juanchito después del tratamiento. Además de ello, se sugiere que la leonardita no pudo cumplir a cabalidad con su función de agente quelante para inmovilizar el cromo, ya que al hacer uso de macetas de 8 cm de diámetro, el área de dispersión del ácido húmico pudo ser limitada, por lo que se infiere que este actuó en mayor proporción como fertilizante natural, permitiendo que la planta aumentara su capacidad de absorber elementos benéficos y por ende luciera más vigorosa y verdosa; y por ende este ácido húmico actuó en menor proporción como agente quelante. Lo anterior se ve representado solo en una de las variables estudiadas, ya que en el caso de Floralia su reducción fue eficiente únicamente en la matriz suelo (21,014%), mientras que en la planta se generó una bioacumulación (30,9%), caso contrario en Juanchito, ya que en esta zona se generó una mínima bioacumulación en la planta (7,23%), pero no se redujo la concentración en el suelo (-0,11960%).

El ensayo en el que se usó agua para el riego (A1) demostró que la lechuga funciona como planta acumuladora, ya que es capaz de asimilar el metal contaminante desde la raíz hasta las hojas, generando un aumento de la concentración del cromo en el material vegetal (31,5%), como se pudo evidenciar en la zona de Juanchito; por ende se establece que no podría ser consumido por otro ser vivo ya que se daría paso a la biomagnificación en la cadena trófica; sin embargo para que la biomasa no quede como residuo peligroso, se podría estudiar la posibilidad de utilizarla en la fitominería, con el fin de extraer nuevamente el metal pesado y reutilizarlo en los diferentes procesos de manufactura.

Finalmente cabe resaltar que para que la materia orgánica cumpla su función como agente reductor del metal pesado debe ampliarse el tiempo de evaluación, así como se evidenció en la revisión bibliográfica realizada, ya que los procesos de fitorremediación deben contar con un tiempo mínimo de 60 días para llevar a cabo su mecanismo de acción (Economou et al, 2018) y dado que el presente proyecto fue implementado durante 35 días, se infiere que al día 60 se hubiera continuado con la reducción de la concentración de cromo total en las zonas de estudio.

→ Proceso químico:

En el proceso químico también se llevó a cabo un diseño experimental factorial, en el que se tuvo en cuenta la variación de la concentración y del tiempo como se evidencia en la *Tabla 20* al igual que en la metodología expuesta en el estudio de Eyvazia et al (2019). Este experimento se llevó a cabo únicamente en la segunda muestra tomada tanto en la zona de Juanchito, como en la de Floralia y cada una de estas se realizó por duplicado; se obtuvo un total de 12 muestras por zona de muestreo como se evidencia en la *Tabla 21*.

Tabla 20. Convenciones de la variable tiempo y concentración

Convenciones de las variables			
Variable Tiempo (días)		Variable Concentración (g/L)	
A1	2	B1	0,5
A2	4	B2	1
A3	8	B3	2

Tabla 21. Diseño experimental proceso químico

Diseño experimental por punto de muestreo			
	A1 x2	A2 x2	A3 x2
B1 x2	4(A1B1)	4(A2B1)	4(A3B1)
B2 x2	4(A1B2)	4(A2B2)	4(A3B2)
B3 x2	4(A1B3)	4(A2B3)	4(A3B3)
TOTAL	12		

Fuente: Autores, 2019.



Ilustración 28. Implementación de proceso químico (nanopartículas). **Fuente:** Autores, 2019.

Al obtener las nanopartículas de ferrita de manganeso se procedió con el análisis de la morfología de las mismas, por medio de microscopía electrónica de barrido, con el fin de observar su tamaño, superficie y microestructura. En la *Figura 29* se muestra en detalle el fenómeno normal de agregación de las nanopartículas por la inestabilidad física de las mismas, ya que a temperatura ambiente estas buscan llegar a un equilibrio, y por ende se infiere que el tamaño del agregado es de $6 \times 4 \mu\text{m}$. En una magnificación mayor se observan agregaciones con formas esféricas y con un tamaño menor a 100 nanómetros, en donde en la *Figura 30 A* se detalla la morfología con ayuda de los electrones secundarios, mientras que en la *Figura 30 B* se observa que las nanopartículas tienen la misma composición, ya que no existe un cambio de color, con los electrones retrodispersados; también se determina que en términos de la *Figura 31* que cuenta con la mayor magnificación, se observa que el tamaño de las nanopartículas sintetizadas está entre 5 y 15 nm aproximadamente. Finalmente se determina que el método de la microscopía electrónica de barrido tiene una limitación en cuanto a la resolución y desviación de electrones, lo cual se determina por las características magnéticas de las nanopartículas.

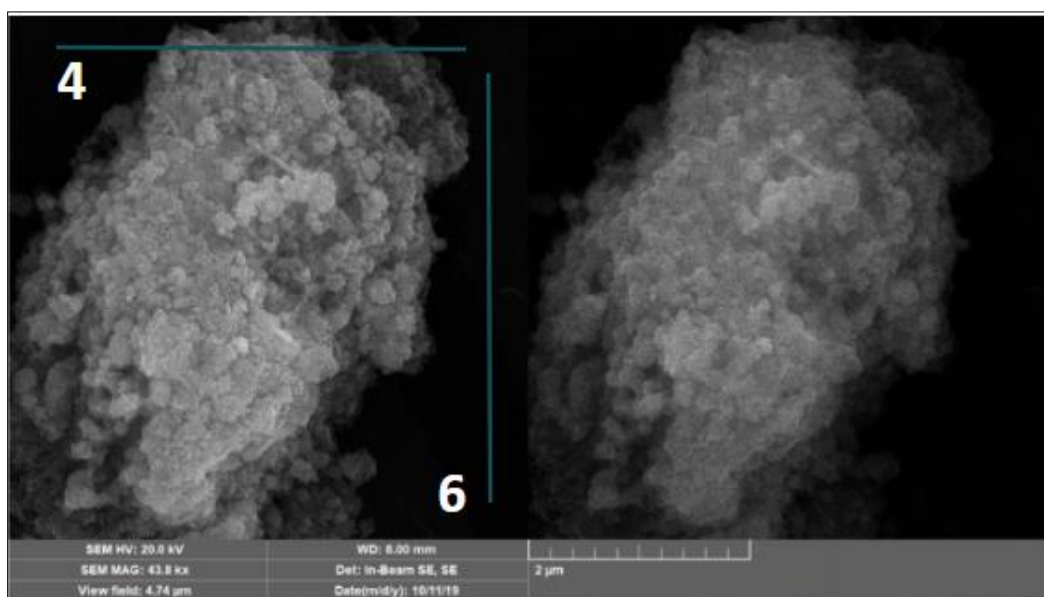


Ilustración 29. Micrografía de las nanopartículas con una magnificación de 43800 X, una intensidad del haz de 20,0 kV, y una escala de 2 μm . **Fuente:** Autores, 2019

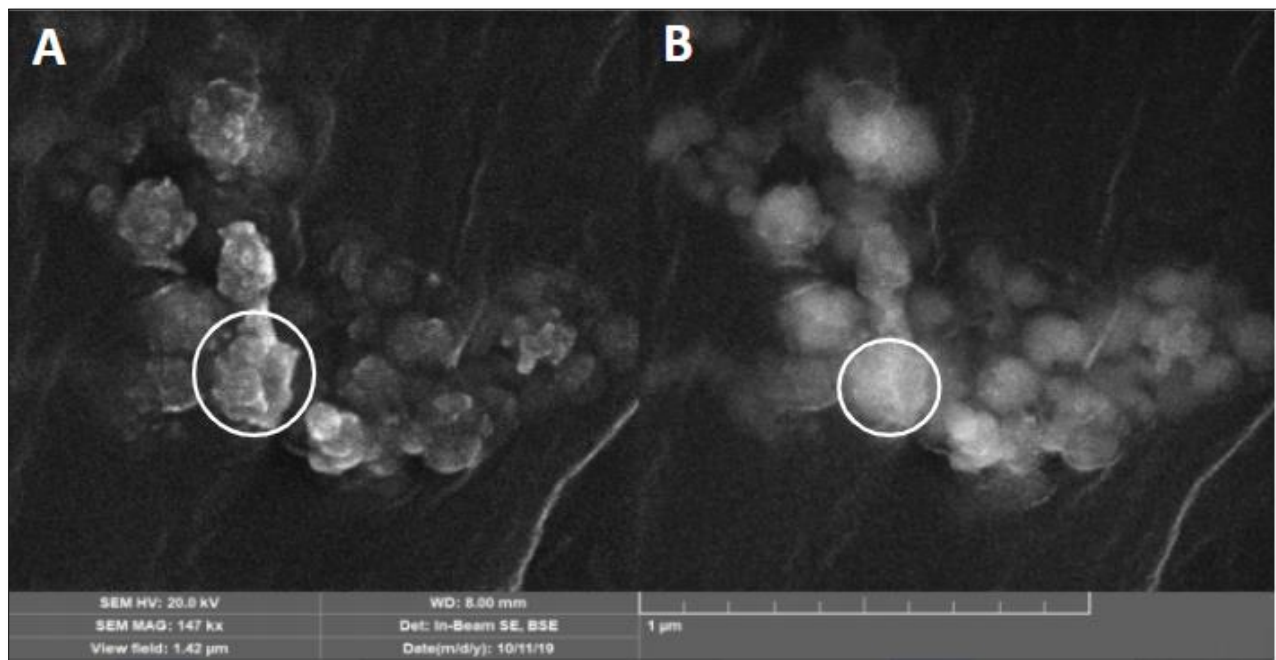


Ilustración 30. Micrografía de las nanopartículas con una magnificación de 147000 X, una intensidad del haz de 20,0 kV, y una escala de 1 μ m. **Fuente:** Autores, 2019

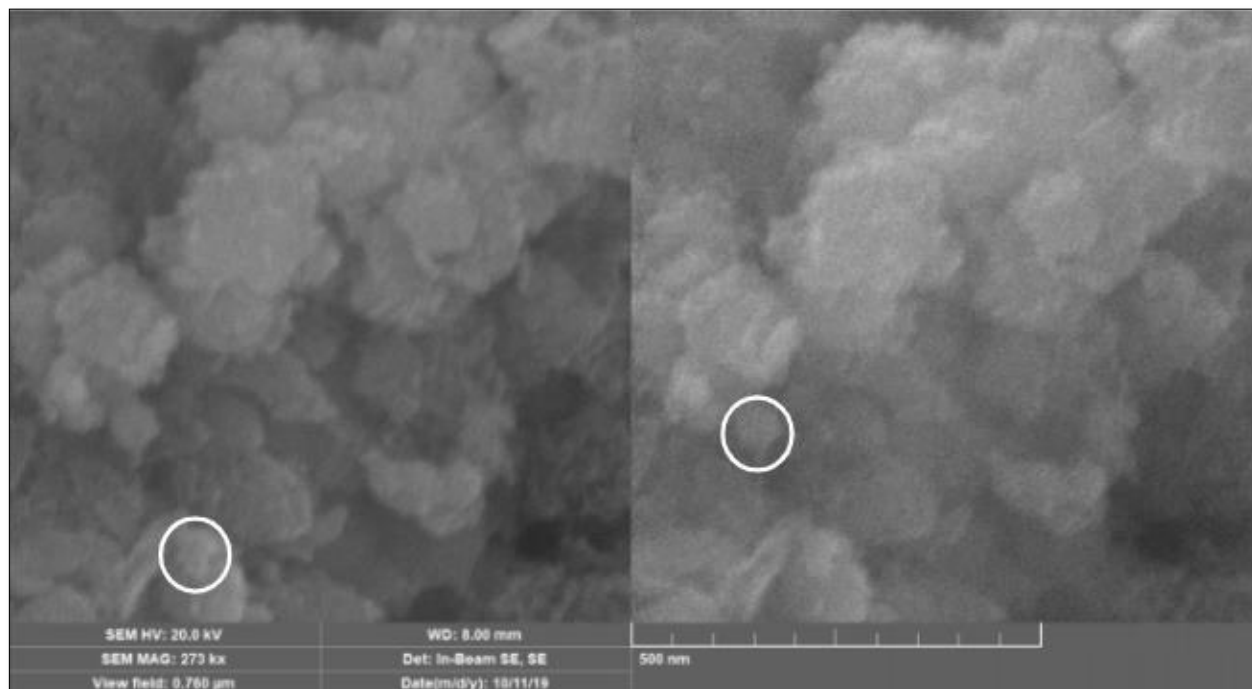


Ilustración 31. Micrografía de las nanopartículas con una magnificación de 273000 X, una intensidad del haz de 20,0 kV, y una escala de 500 nm. **Fuente:** Autores, 2019

Para la cuantificación del cromo se procedió con la centrifugación de la mezcla heterogénea de cada uno de los ensayos a 3000 rpm por 15 minutos y se tomaron 5 mL del sobrenadante para implementar el Kit de Cromo 1.14758.0001, luego se procedió con la lectura en el espectrofotómetro uv a una concentración de mmol/m^3 de la solución, por lo que se realizó la conversión a $\mu\text{g/kg}$ para conocer la concentración en el suelo (ver ecuación 5) y así obtener el porcentaje de reducción (ver ecuación 1) en cada uno de los ensayos. A continuación, se muestran los resultados arrojados:

$$[Cr^{total}]_{agua} = \frac{6,59 \text{ mmol}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ mol Cr}}{1000 \text{ mmol Cr}} * \frac{52 \text{ g Cr}}{1 \text{ mol Cr}} * \frac{1 \times 10^6 \mu\text{g Cr}}{1 \text{ g Cr}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1 \times 10^6 \text{ ml}} * 5,00 \text{ ml} = \frac{1,71 \text{ mmol}}{5 \text{ ml}}$$

$$[Cr^{total}]_{agua} = \frac{1,71 \text{ mmol}}{5 \text{ ml}} * 50 \text{ ml} = 17,13 \mu\text{g Cr}$$

$$[Cr^{total}]_{agua} = \frac{1,71 \text{ mmol}}{1 \text{ g suelo}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 17134 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}$$

$$[Cr^{total}]_{suelo} = \text{Concentración de Cr inicial} - [Cr^{total}]_{agua} \text{ (Ecuación 5)}$$

$$[Cr^{total}]_{suelo} = 48400 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} - 17134 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}} = 24266 \frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}$$

$$\% \text{ reducción A3B1}_j = \frac{(41800 \mu\text{g/kg} - 242920 \mu\text{g/kg})}{41800 \mu\text{g/kg}} * 100 = 41,885\% \text{ (Ecuación 1)}$$

Tabla 22. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Juanchito al día ocho

Resultados al día 8 en la zona de Juanchito					
Concentración Nanopartículas (g/L)	Concentración cromo total (mmol/m^3)	Promedio (mmol/m^3)	Concentración cromo total en solución ($\mu\text{g/Kg}$)	Concentración cromo total en suelo ($\mu\text{g/Kg}$)	Reducción (%)
0,5	6,59	11,2	29107	12693	69,634
	15,8				
1	11,7	9,68	25155	16645	60,179
	7,65				
2	10,1	13,4	34710	7090	83,038
	16,6				

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 23. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Floralia al día ocho

Resultados al día 8 en la zona de Floralia					
Concentración Nanopartículas (g/L)	Concentración cromo total (mmol/m ³)	Promedio (mmol/m ³)	Concentración cromo total en solución (µg/Kg)	Concentración cromo total en suelo (µg/Kg)	Reducción (%)
0,5	15,5	12,3	31889	9511	77,027
	9,03				
1	9,28	8,56	22256	19144	53,758
	7,84				
2	14,5	13,8	35750	5650	86,353
	13				

Fuente: Autores, 2019.

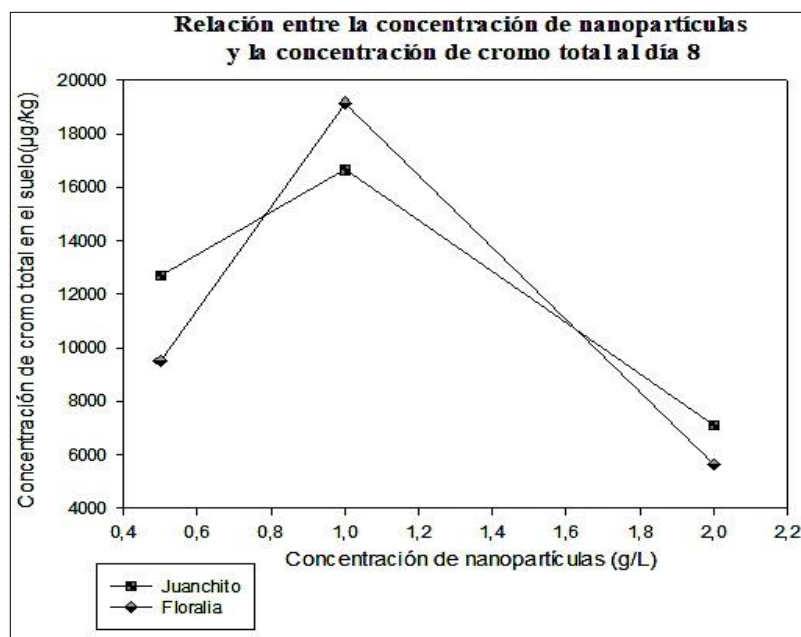


Ilustración 32. Gráfica de relación entre la concentración de nanopartículas y la concentración de cromo total al día 8.

Fuente: Autores, 2019

Tabla 24. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Juanchito al día cuatro

Resultados al día 4 en la zona de Juanchito					
Concentración Nanopartículas (g/L)	Concentración cromo total (mmol/m ³)	Promedio (mmol/m ³)	Concentración cromo total en solución (µg/Kg)	Concentración cromo total en suelo (µg/Kg)	Reducción (%)
0,5	11,3	11,6	30160	11640	72,153
	11,9				
1	12,4	12,9	33540	8260	80,239
	13,4				
2	7,45	8,43	21918	19882	52,435
	9,41				

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 25. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Floralia al día cuatro

Resultados al día 4 en la zona de Floralia					
Concentración Nanopartículas (g/L)	Concentración cromo total (mmol/m ³)	Promedio (mmol/m ³)	Concentración cromo total en solución (µg/Kg)	Concentración cromo total en suelo (µg/Kg)	Reducción (%)
0,5	10,7	11,3	29250	12150	70,652
	11,8				
1	15,6	11,7	30355	11045	73,321
	7,75				
2	5,12	6,78	17628	23772	42,580
	8,44				

Fuente: Autores, 2019.

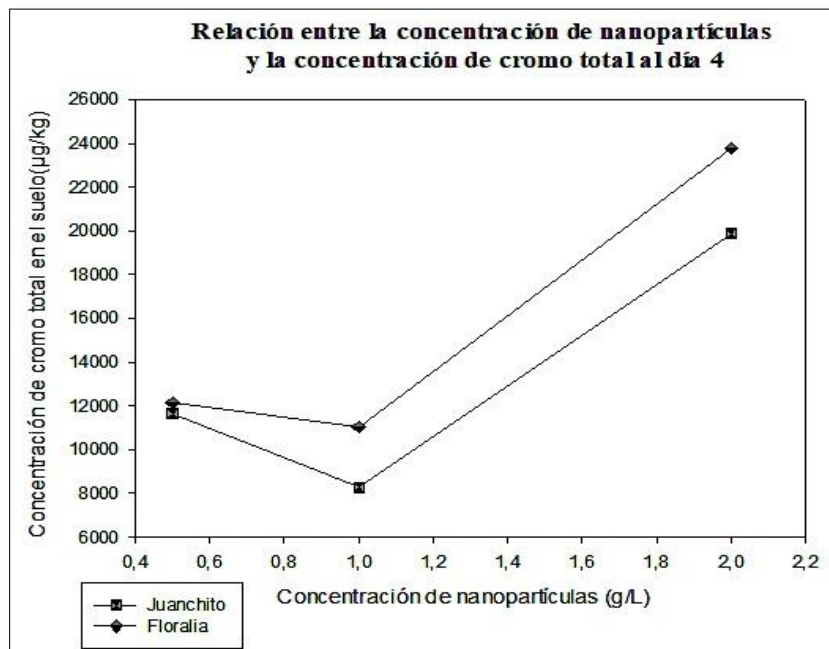


Ilustración 33. Gráfica de relación entre la concentración de nanopartículas y la concentración de cromo total al día 4.

Fuente: Autores, 2019

Tabla 26. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Juanchito al día dos

Resultados al día 2 en la zona de Juanchito					
Concentración Nanopartículas (g/L)	Concentración cromo total (mmol/m ³)	Promedio (mmol/m ³)	Concentración cromo total en solución (µg/Kg)	Concentración cromo total en suelo (µg/Kg)	Reducción (%)
0,5	10,5	9,73	25298	16502	60,522
	8,96				
1	8,30	7,95	20670	21130	49,448
	7,60				
2	6,4	7,51	19513	22287	46,682
	8,61				

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 27. Resultados de la concentración de cromo total en las muestras suelo de la zona de Floralia al día dos

Resultados al día 2 en la zona de Floralia					
Concentración Nanopartículas (g/L)	Concentración cromo total (mmol/m ³)	Promedio (mmol/m ³)	Concentración cromo total en solución (µg/Kg)	Concentración cromo total en suelo (µg/Kg)	Reducción (%)
0,5	10,7	9,45	24570	16830	59,348
	8,2				
1	4,45	5,33	13858	27542	33,473
	6,21				
2	6,51	7,19	18681	22719	45,123
	7,86				

Fuente: Autores, 2019.

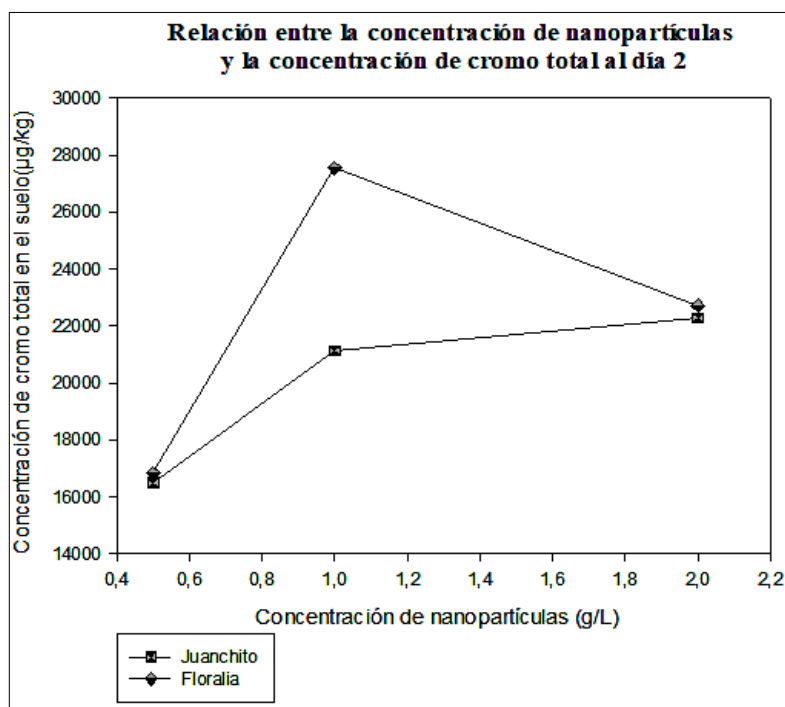


Ilustración 34. Gráfica de relación entre la concentración de nanopartículas y la concentración de cromo total al día 2.

Fuente: Autores, 2019

Se observa una tendencia directamente proporcional entre la concentración de las nanopartículas y el tiempo (ver figura 35 y 36), puesto que a mayor cantidad de días, se requiere una mayor concentración de nanopartículas, para así obtener una mayor concentración de cromo en solución acuosa y por ende lograr una reducción significativa del cromo total en el suelo, es decir una reducción de más del 55 %. Esto se pudo evidenciar, ya que en ambas zonas de estudio la eficiencia en la reducción del metal varió de concentración con el paso de los días, puesto que en el día 8 se obtuvo una mejor eficiencia con 2g/L de concentración de nanopartículas, en el día 4 con 1 g/L y en el día 2 con 0,5 g/L.

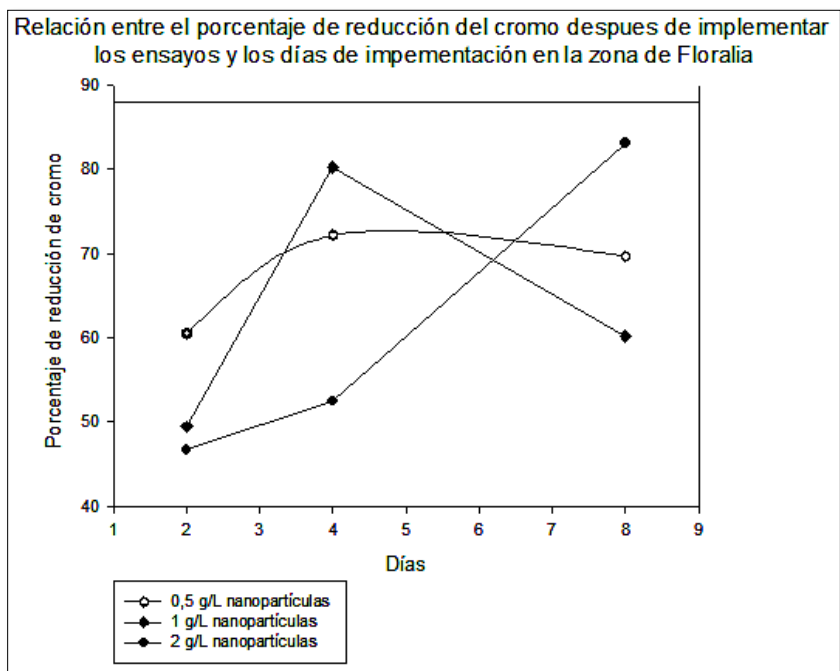


Ilustración 35. Gráfica de relación entre el porcentaje de reducción de cromo y lo días de implementación en Floralia.

Fuente: Autores, 2019

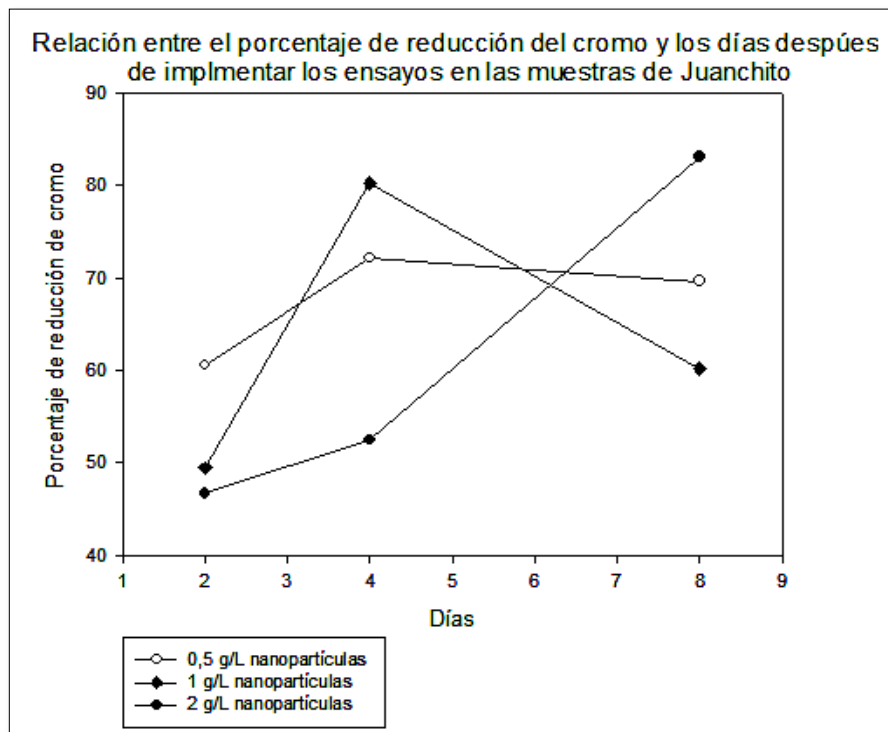


Ilustración 36. Gráfica de relación entre el porcentaje de reducción de cromo y lo días de implementación en Juanchito.

Fuente: Autores, 2019

Así mismo, se determinó que el mayor porcentaje de reducción del cromo total se dio en el ensayo que se mantuvo 8 días en agitación constante, con una concentración de 2 g/L de nanopartículas de Fe_2MnO_4 en ambas zonas, siendo en la zona de Juanchito de 83,038% (ver tabla 26) y en la de Floralia de 86,353% (ver tabla 27), lo cual concuerda con los resultados analizados en el artículo seleccionado (Eyvazia, Jamshidi, & Khodadadi, 2019) para llevar a cabo el proceso químico.

Se puede observar que la implementación del método al día ocho arroja una tendencia en la que la concentración del cromo en el suelo comienza a disminuir a partir de la concentración de 1 g/L de nanopartículas, mientras que el método para el día cuatro arroja una tendencia contraria, ya que hay un aumento en la concentración de suelo, y por último se observa que el ensayo a dos días tiene una diferencia significativa entre las zonas ya que luego de la concentración de 1 g/L de nanopartículas, la zona de Floralia tiene una disminución constante en su concentración de cromo en el suelo; mientras que Juanchito tiene un mínimo aumento en la misma, lo cual se pudo presentar por errores sistemáticos en el tratamiento de la muestra.

Finalmente se determina que el éxito de la inmovilización del cromo de la metodología utilizada puede ser atribuido a la formación del fuerte enlace entre el hierro, manganeso, oxígeno y cromo; además del diámetro obtenido en la síntesis de las nanopartículas, ya que al tener un menor diámetro, tienen una mayor área superficial para que se adhiera el cromo, siendo estas entre 5 y 15 nm las del presente proyecto.

→ **Determinación de la eficiencia:**

Para determinar la eficiencia del proceso químico y biológico elegido se tomaron en cuenta diferentes variables que fueron relevantes durante la implementación de cada uno de los métodos, las cuales fueron organizadas por orden de importancia a continuación:

1. Promedio del porcentaje de reducción de la concentración de cromo total en el suelo en cada zona estudiada.
2. Cumplimiento de los rangos permitidos por la EPA
3. Tiempo de implementación del método

Tabla 28. Valores para evaluar la eficiencia con cada parámetro establecido

Niveles de determinación de la eficiencia	
Alto	10
Medio	5
Bajo	1

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 29. Rangos de evaluación de la eficiencia.

Rangos de evaluación			
Criterio	Bajo	Medio	Alto
Promedio del porcentaje de reducción de la concentración de cromo total en el suelo en cada zona estudiada (%)	0-30	31-60	61-90
Cumplimiento de los rangos permitidos por la EPA ($\mu\text{g/kg}$)	>5.000	501-4.999	0-500
Tiempo de implementación del método (semanas)	1-4	5-8	>8

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 30. Comparación de la eficiencia en el proceso químico y biológico

Criterio	Método Biológico	Puntaje	Método Químico	Puntaje
Capacidad para reducir concentraciones de cromo total en el suelo en Foralia (%)	21,4975	1	60,1816	5

Capacidad para reducir concentraciones de cromo total en el suelo en Juanchito (%)	-4,7846	1	63,8144	10
Concentración de cromo dentro de los niveles permitidos por la EPA Floralia($\mu\text{g/kg}$)	32.500	1	16.485	1
Concentración de cromo dentro de los niveles permitidos por la EPA Juanchito($\mu\text{g/kg}$)	43.800	1	15.125	1
Tiempo de implementación del método (semanas)	5	5	1	10
Puntaje total	9		27	

Fuente: Autores, 2019.

Se determinó que el método con mayor eficiencia para reducir la concentración de cromo total en muestras de suelo es el método químico, ya que tuvo un mayor porcentaje de reducción en la concentración de cromo total en un menor tiempo de implementación; sin embargo se observó que ninguno de los dos métodos logró valores de concentración de cromo ideales para cumplir con los parámetros emitidos por la EPA, ya que esta indica que el rango normal debe estar entre los 100 y 500 $\mu\text{g/kg}$ (Mahecha et, 2015). Así mismo, el análisis de los datos permite determinar que la hipótesis planteada anteriormente fue acertada, ya que aunque se hace uso de una mayor cantidad de materiales, reactivos y equipos esta es mucho más eficiente, obteniendo una puntuación de 40 (*ver tabla 31*).

Finalmente se determinó para el proceso biológico que aunque la leonardita disminuye la disponibilidad de Cr para la lechuga, este sistema reduce el Cr (VI) a Cr (III), manteniendo una concentración similar a la inicial, puesto que la suma del Cr (IV) y cromo (III) representa el cromo total; mientras que en el proceso químico las nanopartículas reducen la concentración del cromo total en la matriz suelo.

13. Conclusiones

- Se encontró una relación entre las propiedades fisicoquímicas evaluadas en las zonas muestreadas y las altas concentraciones de cromo en las mismas (mayor de 32500 $\mu\text{g/kg}$), ya que los bajos contenidos de materia orgánica (menor de 3,34) y de carbono orgánico (menor de 1,94), el alto porcentaje de arena (mayor de 44), y la alta presencia de manganeso (mayor de 87 mg/Kg), con respecto al Blanco, generan condiciones favorables para la retención del cromo en el suelo.
- Se identificó que la lechuga (*Lactuca Sativa*) es una planta acumuladora que permite la reducción del cromo total en el suelo, y aumenta su potencial con el uso de la leonardita a una concentración de 50 $\text{cm}^3/20\text{L}$ de agua.
- El uso de la leonardita disminuye en mayor proporción la concentración de cromo total en el suelo Floralia: 51,938 y Juanchito: 7,1093% en comparación con el ensayo, en el que se utilizó agua para el riego en Floralia:15,756%; Juanchito: 22,076%).
- Se desarrolló el método químico, con el uso de las nanopartículas de ferrita de manganeso, en el laboratorio de la Universidad El Bosque, se obtuvo el mayor porcentaje de reducción de la

concentración de cromo en el día ocho, con una concentración de 2 g/L de nanopartículas, siendo en Floralia de 86,353% y en Juanchito de 83,038%

- Dados los criterios establecidos para la evaluación de la eficiencia, se obtuvo que el método químico presentó tres veces más eficiencia (27) que el método biológico (9).

15. Recomendaciones:

- El presente estudio evaluó que el cromo es un elemento multivalente y por ende se sugiere realizar un análisis de especiación para determinar el estado de oxidación que predomina al evaluar este tipo de metodologías.
- Evaluar la reducción del cromo total en muestras de agua de la cuenca Valle del Cauca del río Cauca, con el fin de comparar los datos y la concentración del metal pesado en el recurso suelo y agua.
- Determinar las técnicas químicas y biológicas más eficientes para reducir el contaminante del cuerpo de agua.
- Evaluar el método de las nanopartículas de ferrita de manganeso a diferentes valores de pH, por la variación de la funcionalidad del hierro y el manganeso.
- El proceso biológico puede ser evaluado en un periodo de tiempo más prolongado, ya que se infiere que la leonardita podría mejorar su eficiencia como agente quelante y por ende aumentaría el porcentaje de reducción de cromo total en el suelo.

15. Referencias Bibliográficas

- Acosta, I., Cárdenas, J., Martínez, V., & Rivera, E. (2011). Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de *Paecilomyces* sp Resistente a Cromato. *Revista Información Tecnológica*, 22.
- Acosta, I., Cárdenas, J., & Martínez, V. (2015). Remoción de Cromo (VI) por una Cepa de *Paecilomyces* sp resistente a cromato. *Revista Información Tecnológica*, 26.
- Alcaldía de Santiago de Cali (2016). Decreto extraordinario 0203. Objetivos y funciones. Recuperado el 17 de febrero de 2019 de: http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/110108/objetivos_funciones_dagma/
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). Cali progresa contigo. Recuperado el 21 de octubre de 2018 de: <http://www.cali.gov.co/>
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). Demografía de Cali. Recuperado el 5 de noviembre de 2018 de: http://www.cali.gov.co/informatica/publicaciones/106107/demografia_de_cali/
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA). Recuperado el 21 de octubre de 2018 de: <http://www.cali.gov.co/dagma/>
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). Geografía de Cali. Recuperado el 5 de noviembre de 2018. http://www.cali.gov.co/informatica/publicaciones/106104/geografia_de_cali/

- Alcoba, P. (2014). Transferencia de elementos traza suelo-plantas en suelos con influencia salina. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid, España.
- Ali, M., Ali, N., Aqeel, A., Amna., Asad, M., Hayat, K., Hussain, A., Jan, F., Javed, H., Manghwar, H., & Tariq, M. (2019). Individual and combinatorial application of *Kocuria rhizophila* and citric acid on phytoextraction of multi-metal contaminated soils by *Glycine max L.* Elsevier. 159, 23-33.
- Ahemad, M. (2015). Enhancing phytoremediation of chromium-stressed soils through plant-growth-promoting bacteria. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 13, 51-58.
- Amabilis, L. (2016). Remoción de mercurio por *Phragmites australis* empleada como barrera biológica en humedales artificiales inoculados con cepas tolerantes a metales pesados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32.
- Anzola, A. (2014). Desarrollo de nuevas tecnologías de separación basadas en líquidos iónicos para la recuperación de metales pesados de efluentes acuosos. España: Universidad Politécnica de Cartagena .
- Arboleda, C., Hoyos, D., & Manco J. (2017). Zeolitas LTA y FAU obtenidas a partir de cenizas volantes y su aplicación en remoción de Cromo. Universidad Nacional de Colombia.
- Artica, J. (2018). Bioacumulación y Biomagnificación. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
- Artunduaga, O. (2008). Tratamientos para la remoción de cromo (VI) presente en aguas residuales. *Revistas Sena*, 66-73.
- Asri, M., Bahafid, W., El Ghachtouli, M., Kouchou, A., Sayel, H., Tahri, N., & Tirry, N. (2018). Screening of plant growth promoting traits in heavy metals resistant bacteria: Prospects in phytoremediation. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 16, 613-619
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). División de Toxicología y Ciencias de la Salud. Resumen de salud pública el cromo. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf
- Bartolomé, C., Cortés, A., Rodríguez, F., & Sánchez, S. (2018). Mecanismos de resistencia a Metales tóxicos (CD) bajo variaciones abióticas en Microalgas. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 21, 40 - 51.
- Beltrán, M., Gómez, A. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio, cromo, y mercurio. Mecanismos bioquímicos e ingeniería. *Revista facultad de ciencias básicas de la Universidad Militar Nueva Granada*. 12, 172 - 197

- Benítez, T. (2014). ESTUDIO DE MODIFICACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DE BIOMASA (Citrus sinensis Y Musa paradisiaca) PARA LA ADSORCIÓN DE METALES PESADOS EN SOLUCIÓN. Ibídem
- Bhargavi, E., Bhunia, B., Devi, I., Nath, O., Raj, K., Sardar, U. (2018). Advances in exopolysaccharides based bioremediation of heavy metals in soil and water: A critical review. Elsevier, 199, 353 - 364.
- Bianco, A., De Luca, D., Ginepro, M., & Peracaciolo, E. (2017). Chemical vs bio-mediated reduction of hexavalent chromium. An in-vitro study for soil and deep waters remediation. Elsevier. 312, 17-23.
- Bolarín, A., García, G., Gordillo, A., Mendez, M., Prieto, F., & Sánchez, F. (2007). Síntesis y caracterización de ferritas de manganeso por vía hidroquímica. Revista Latinoamericana de metalurgia y materiales. 27, 95-105
- Bonilla, H. & Lora, R. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. Revista U.D.C.A Act. & Div. Cient. 13, 61-70
- Bonilla, C., Castillo, L., & García, A. (1991). Adsorción de cadmio, cromo y mercurio en suelos del valle del cauca a varios valores de pH. Universidad Nacional de Colombia
- Bouzo, C., Defilips, C., Jiménez, A., & Pariani, S. (2006). Respuesta al riego de lechuga (*Lactuca Sativa*) cultivada en invernadero. Universidad Nacional de Luján
- Calao, C.; & Marrugo, J. (2015). Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de La Mojana, Colombia, 2013. Revista del Instituto Nacional de Salud, 35, 139-150.
- Chávez, A. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 41-51.
- Chen, M. (2015). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, petroleum, pesticides, chlorophenols and heavy metals by composting: Applications, microbes and future research needs. Elsevier, 33, 745-755.
- Chinchilla, M., Mata, R., & Alvarado, A. (2011). Andisoles, inceptisoles y entisoles de la subcuenca del río Pirrís, Región de los Santos, Talamanca, Costa Rica. Agron. Costarricense, 35.
- Ciencia y sociedad. (2010). Risorremediación. Universidad de Granada. Recuperado de: https://cienciaysociedad.fundaciondescubre.es/files/2012/03/cienciaysociedad_0015.pdf

- Ciencias Naturales. (2016). Procesos biológicos. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/unespaciobiologico/contenido/procesos-biologicos>
- Covarrubias, S. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Instituto Politécnico Nacional, 40 - 45.
- Covarrubias, S., & Peña, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 33, 7-21.
- Correa, F., & Silva, S. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Medellín: Universidad de Medellín.
- Cruz, M. (2007). La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- DANE. (2018). Gobierno distrital de Colombia. Estimaciones y Proyecciones de Población y Densidad Cali. Recuperado el 5 de noviembre de 2018: <https://www.datos.gov.co/Estadisticas-Nacionales/Estimaciones-y-Proyecciones-de-Poblacion-y-Densidad/yhfs-jsey/data>
- DANE. (2019). Estadísticas por tema: Industria. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria>
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Sandoval, O., & Villagómez, J. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Revista Tropical and subtropical agroecosystems*. 14, 597- 612
- Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (2000). Plan de ordenamiento territorial. Recuperado el 5 de noviembre de 2018 de: http://idesc.cali.gov.co/download/pot_2000/pot_2000_documento_resumen.pdf
- Desance, I., & Trejo, J. (2004). Recuperación de Cromo proveniente de efluentes industriales y su tratamiento con biomasa. *Universidad Autónoma Metropolitana, México*.
- Deyad, P. (2016). Comparative performance evaluation of multi-metal resistant fungal strains for simultaneous removal of multiple hazardous metals. *Elsevier*, 318, 679 - 685.
- DhalaH, B., DascB, N., Pandey, D., & ThatoibN, N. (2013). Chemical and microbial remediation of hexavalent chromium from contaminated soil and mining/metallurgical solid waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 250 -251, 272-291.
- Díaz, C. (2013). Retención de metales pesados sobre un material arcilloso de base paligorskita. España: Universidad Pública de Navarra.

- Dixit, R. (2015). Bioremediation of Heavy Metals from Soil and Aquatic Environment: An Overview of Principles and Criteria of Fundamental Processes. *Sustentabilty*.
- Dupont, L., Guillon, E. (2003). Removal of Hexavalent Chromium with a Lignocellulosic Substrate Extracted from Wheat Bran. *ACS publications. Environmental Science & Technology*. 18, 4235–4241
- Economou, M., Gasparatos, D., Petridisc, A., & Raptisa, Stavros. (2018). Chromium uptake by lettuce as affected by the application of organic matter and Cr(VI) irrigation water: Implications to the land use and water management. *Elsevier*. 210, 597-606.
- El país. (2014). Contaminación del río Cali. Recuperado el 5 noviembre de 2018 de: <https://www.elpais.com.co/especiales/rio-cali/>
- Elkhatibb, E., Mesalemb, M., & Moharema, M. (2018). Remediation of chromium and mercury polluted calcareous soils using nanoparticles: Sorption –desorption kinetics, speciation and fractionation. *Elsevier*. 321, 73-80
- Espinoza, G., & Mera, G. (2015). Alternativas ambientales para la remoción de cromo hexavalente en residuos líquidos de los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño. *Universidad de Manizales*.
- Eyvazia, B., Jamshidi, A., & Khodadadi, A. (2019). Immobilization of hexavalent chromium in contaminated soil using nano-magnetic MnFe₂O₄. *Elsevier*. 365, 813-819
- FAO. (2019). Portal de suelos de la FAO. Definiciones clave. ¿Qué es el suelo?. Recuperado el 18 de febrero de 2019 de: <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Fernández, H. (2013). Contaminación por metales pesados. Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo. Recuperado de: http://www.infoagro.com/abonos/contaminacion_suelos_metales_pesados.htm
- Fontalvo, A., & Marrugo, J. (2017). Metales pesados en sedimentos de la Cuenca Baja del río Magdalena, Colombia. *Revista Unicordoba*
- Fu, R., Gu, Y., Wen, D., Xia, X., & Zhang, W. (2017). Electrokinetic remediation of chromium (Cr)-contaminated soil with citric acid (CA) and polyaspartic acid (PASP) as electrolytes. *Elsevier*. 316, 601-608.
- Google maps. (2018). Ubicación de Cali. Recuperado el 5 de noviembre de 2018 de: <https://www.google.com/maps/place/Cali,+Valle+del+Cauca/@3.395397,-76.6657533,11z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e30a6f0cc4bb3f1:0x1f0fb5e952ae6168!8m2!3d3.4516467!4d-76.5319854>
- Google maps. (2019). Distancia de industria metalúrgica a Río Cali. Recuperado el 16 de noviembre de 2018 de: <https://www.google.com/maps/place/Metalmecanica+Lucerna/@3.4611458,->

76.5236267,17z/data=!4m5!3m4!1s0x8e30a6413f694aa3:0xb0e506656cdecef2!8m2!3d3.4595448!4d-76.5211161

Guerinoni, G. (2013). Organización Panamericana de la Salud. Calidad del agua y salud pública. Recuperado de: <http://www.paho.org/blogs/etras/?p=1105>

Gutiérrez, S. (2008). Parcial Producción más Limpia. Análisis de Erin Brockovich. . Cali: Universidad ICESI.

ICONTEC. (2001). NTC 3888. Gestión Ambiental, Calidad del Suelo Extracción de Elementos Traza Solubles en Agua Regia. Norma Técnica Colombiana.

ICONTEC. (2003). NTC 3934. Calidad del Suelo; Determinación de Cadmio, Cromo, Cobalto, Cobre, Plomo, Manganese, Níquel, y Zinc en Extractos de Suelo con Agua Regia. Métodos de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama y Horno de Grafito. Norma Técnica Colombiana.

IDEAM. (2014). Participación ciudadana. Glosario. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario#B>

IGAC. (2016). Suelos y Tierras de Colombia. IGAC, 114-130

IGAC. (2019). Datos Abiertos Subdirección de Agrología. Recuperado el 29 de febrero de 2019 de: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

IUPAC. (2006). Gold book. Alphabetical index. Recuperado el 17 de septiembre de 2018 de: <https://goldbook.iupac.org/html/C/C00975.html>

Joshi, S., & Kalita, D. (2017). Study on bioremediation of Lead by exopolysaccharide producing metallophilic bacterium isolated from extreme habitat. Elsevier, 16, 48 - 57.

Kumar, V. (2015). Bioadsorbents for remediation of heavy metals: Current status and their future prospects. Environmental Engineering Research, 1 - 18.

Laboratorio Kudam. (2004). Legislación sobre metales pesados en suelos, lodos y sustratos. Alicante, España.

Liu, B., Liu, Y., Wang, J., Wang, T., Wang, X., & Wang, Y. (2018). In-situ remediation of hexavalent chromium contaminated groundwater and saturated soil using stabilized iron sulfide nanoparticles. Elsevier. 231, 679-686.

Londoño, L., Londoño, P., & Muñoz, G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 14, 145-153.

Long, X., Miró, M., & Harald, B. (2005). On-line dynamic extraction and automated determination of readily bioavailable hexavalent chromium in solid substrates using

- micro-sequential injection bead-injection lab-on-valve hyphenated with electrothermal atomic absorption spectrometry. Royal society of chemistry. 131, 132-140
- Lozada, J. (2012). Presencia de metales pesados en tejidos de peces. Colombia: Universidad de Nariño.
- Lucena, J. (2009). El empleo de complejantes y quelatos en la fertilización de micronutrientes. Revista Ceres. 56, 527-535
- Mahecha, J., Torres., M., & Trujillo, J. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. Universidad de los Llanos, 19, 118-122.
- Mahecha, J., Torres., M., & Trujillo, J. (2017). Análisis de estudios en metales pesados en zonas agrícolas de Colombia. Universidad de los Llanos, 21, 83-93.
- Maldonado, A., Sánchez, C. (2016). Biorremediación de lodos de fractura hidráulica. Universidad Autónoma de Tlaxcala, México.
- Martín, M. (2008). Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. España: Universidad de Granada.
- Martinez & Casallas (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia. Universidad EAN. Recuperado de: <http://editorial.universidadean.edu.co/accesoabierto/contaminacion-y-remediacion-de-suelos-en-colombia.pdf>
- Merdoud, O., Djamal, E. (2008). Electroremediation of an industrial area contaminated by chromium. Journal of Environmental Science and Health. 43, 866-870.
- Millán, M. d. (2016). Eliminación de herbicidas y metales pesados en aguas mediante el uso de hidróxidos dobles laminares. España: Universidad de Córdoba.
- Ministerio de Agricultura. (2014). Principales cultivos del Valle del Cauca en 2014. Siembra de cultivos. Recuperado de: <http://www.agronet.gov.co/Documents/Valle%20del%20Cauca.pdf>
- Ministerio de Ambiente. (2018). Resolución 0883 de 2018. Por el cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas.
- Ministerio de Educación. (2011). Río Cauca no pasa examen de Universidad. Recuperado de: <https://www.mineducacion.gov.co/observatorio/1722/article-276999.html>
- Ministerio de minas y energía. (2003). Decreto 2191 de 2003. Por el cual se adopta el Glosario Técnico Minero.

- Molina, N., Aguilar, P., & Cordovez, C. (2010). Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. *Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular*. 8, 77 - 88.
- Molina, C. (2013). Validación de las técnicas para determinación de molibdeno y cromo en agua residual, tratada, cruda y de níquel en agua residual mediante espectrometría de absorción atómica por llama directa para el laboratorio de análisis de aguas y alimentos utp. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Montes, L. (2014). Especialización de concentración de metales pesados cromo, zinc y plomo en el complejo industrial fabrillame y propuesta de remediación de suelos. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas Espe
- Mora, A., & Bravo, E. (2016). Aislamiento de microorganismos electrogénicos con potencial para reducir cromo hexavalente. Universidad Nacional de Colombia, 27 - 36.
- Murcia, F. (2014). Caracterización del contenido de cromo, su disponibilidad y sus interacciones con las propiedades del suelo para evaluar el potencial uso de la fitoextracción. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Navarro, S. (2013). Química agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. España: Mundiprensa. PP 27.
- Navarro, M., & Ramírez, M. (2015). Análisis de metales pesados en suelos irrigados con agua del río Guatiquía. *Revista Ciencia en Desarrollo*, 6, 167-175.
- NIH. (2015). Compuestos de cromo hexavalente. Recuperado de: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/cromo>
- Nina, F. (2014). Ejemplo de diseños experimentales. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- NTC 3656. (1994). Gestión Ambiental. Suelo. Toma de muestras de suelo para determinar contaminación. Recuperado el 21 de octubre de 2018 de: <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC3656.pdf>
- Office of Environmental Health Hazard Assessment. (2016). Efectos del Cromo Hexavalente Sobre la Salud. Recuperado de: <https://oehha.ca.gov/media/downloads/faqs/sphexchromiumairfact111616.pdf>
- ONU. (2019). Objetivos de desarrollo sostenible. Recuperado el 14 de octubre de 2019 de: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Orroño, D. (2002). Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género *Pelargonium*: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

- Páez, L. (2015). UPME, UPTC. Informe Río Cauca, Departamento Valle del Cauca. Recuperado el 13 de noviembre de 2018 de: <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/.../Rio%20Cauca%20Informe%20Tecnico.pdf> ...
- Pérez, G. (2015). Documentos de trabajo sobre economía regional. Río Cauca, la geografía económica de su área de influencia. Recuperado el 16 de noviembre de 2018 de: http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_finanzas/pdf/dtser_225.pdf
- Phytosudoe. (2008). Significado y tipo de fitorremediación. Recuperado de: <http://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>
- Plaza, J. (2012). Remoción de metales pesados empleando algas marinas. La Plata: Universidad Nacional de la Plata.
- Procolombia. (2015). Industria Metalmecánica. Colombia. Recuperado de: <http://www.procolombia.co/compradores/es/explore-oportunidades/industria-metalmecanica>
- Ramírez, M., Riveros, H., Campos, J., & Cervantes, C. (2009). Reducción bacteriana de cromo hexavalente: mecanismos y aplicaciones. *Medigraphic, Literatura Biomédica*, 73-79.
- Reyes, E., Cerino, F., & Suarez, M. (2006). Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa. Argentina: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Rojas, A. (2012). Fundamentos de procesos químicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Rosales, C. (2014). Estudio de la remoción de Cr (VI) presente en soluciones acuosas empleando un silicato natural y modificado. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Sánchez, A. (2013). Contaminación del suelo y agua. Recuperado de: http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- Sánchez, R. (2014). Determinación de la contaminación por metales pesados (plomo, cromo, cadmio y mercurio) en aguas del río cauca, en la zona urbana de la ciudad de cali y evaluación de la mutagenicidad utilizando el test de ames. Universidad del Valle.
- Sawada, A., Mori, K., Tanaka, S., Fukushima, M., & Tatsumi, k. . (2004). Removal of Cr(VI) from contaminated soil by electrokinetic remediation. *Elsevier*. 24, 483-490
- Soil Survey Staff. (1975). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436.

- Soil Survey Staff (2000). Soil Quality Test Kit Guide. NRCS-USDA, United States Department of Agriculture. P. 1.
- Soil Survey Center (2012). Field Book for Describing and Sampling Soils. National Soil Survey Center Natural Resources Conservation Service U.S. Department of Agriculture Versión 3.0. P. 220.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to soil taxonomy. U.S. Department of Agriculture. Edición 12. P. 83-263
- Téllez, J., Carvajal, R., Gaitán, A. (2004). Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. Revista Universidad Nacional, Fac. Medicina. 52, 50 - 61.
- Tesouro Ambiental para Colombia. (2019). Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Centro de referencia y documentación. Recuperado el 17 de septiembre de 2018 de:
http://www.invemar.org.co/redcostera1/invemar/docs/tesauro_ambiental/naveg.htm
- UNAM. (2016). ¿Qué son las nanopartículas?. Recuperado el 14 de octubre de 2019 de:
<http://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/la-unam-te-explica-que-son-las-nanoparticulas/>
- Universidad El Bosque. (2018). Acerca del pregrado en Ingeniería Ambiental. Recuperado el 08 de septiembre de 2018 en: <http://www.uelbosque.edu.co/ingenieria/carrera/ingenieria-ambiental>
- Universidad Pamplona. (1997). Quelatos. Walko S.A. Recuperado el 7 de septiembre de 2019 de:
http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIG/home_4/mod_virtuales/modulo2/6.pdf
- Valenzuela, K. (2014). Evaluación de la capacidad antagónica de bacterias promotoras de crecimiento vegetal frente a tres aislamientos de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) W.C. Snyder & H.N. Hansen: Universidad Católica de Manizales.
- Veobides-Amador, Helen, Guridi-Izquierdo, Fernando, & Vázquez-Padrón, Vladimir. (2018). Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales*, 39(4), 102-109.
- Vilchez, R. (2005). Eliminación de metales pesados en aguas subterráneas mediante sistemas de lechos sumergidos: Estudio microbiológico de las biopelículas. Granada: Universidad de Granada.
- Vullo, D. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. Revista Química Viva, 93-103.

WEPAL. (1993). Wageningen evaluating programs for analytical laboratories. International Plant-Analytical Exchange - Reference material IPE sample 776. Recuperado el 09 de octubre de 2019 de: <http://www.wepal.nl/website/downloads/RefMatIPE.htm>

Zu, Y. (2016). Environmental Remediation and Application of Nanoscale Zero-Valent Iron and Its Composites for the Removal of Heavy Metal Ions: A Review. *Environmental Science & Technology*, 7290–7304.

16. Anexos:

1. Fotografías tomadas en campo



Ilustración 37. Río Cauca, límite entre Calí y Juanchito. **Fuente:** Autores, 2019.

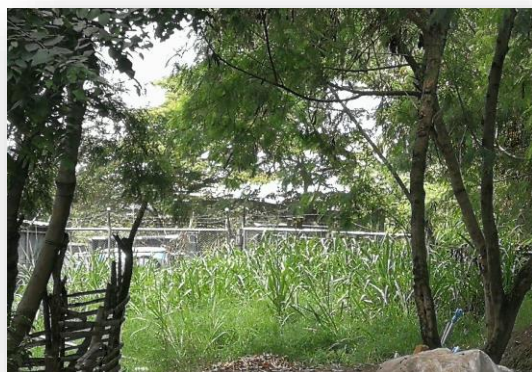


Ilustración 38. Cultivos de caña de azúcar en Juanchito en la orilla del río Cauca. **Fuente:** Autores, 2019.



Ilustración 39. Tubería que desemboca en el río Cauca, barrio Floralia. **Fuente:** Autores, 2019.



Ilustración 40. Río Cauca, barrio Floralia. **Fuente:** Autores, 2019.



Ilustración 41. Recolección de muestras, barrio Floralia. **Fuente:** Autores, 2019

2. Resultados de los parámetros fisicoquímicos de las seis muestras recolectadas y analizadas por el laboratorio Agrilab.

Tabla 31. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de los tres puntos de muestreo en Floralia.

Propiedades fisicoquímicas - Farillon Floralia					
Variable	Expresión / Sigla	Unidad	Resultado M1	Resultado M2	Resultado M3
Conductividad eléctrica	CE	dS/m	0,46	0,61	0,43
Nitrógeno total	N Total	%	0,115	0,102	0,075
Saturación de magnesio	Sat Mg	%	21,1	15,2	23,2
Saturación de sodio	Sat Na	%	1,5	1,54	2,25
Saturación de aluminio	Sat Al	%	N/A	N/A	N/A
Saturación de potasio	Sat K	%	2,5	1,90	2,42
Saturación de calcio	Sat Ca	%	74,7	81,2	72,0
Relación calcio / magnesio	Ca/Mg	Adimensional	3,53	5,35	3,10
Relación calcio / potasio	Ca/K	Adimensional	29,6	42,9	29,8
Relación magnesio / potasio	Mg/K	Adimensional	8,36	8,02	9,62
Relación (Ca+ Mg)/K	(Ca+ Mg)/K	Adimensional	37,9	50,9	39,4
Densidad aparente	d. a.	g/cm ³	1,17	1,37	1,42
Limo	tex	%	8	8	4

Cobre	Cu	mg/kg	18,1	16,2	11,0
Zinc	Zn	mg/kg	9,92	17,7	6,72
Boro	B	mg/kg	0,469	0,265	0,490
Fósforo	P	mg/kg	30,2	41,8	30,5
Azufre	S	mg/kg	46,2	70,0	53,2
Potasio intercambiable	K	mg/kg meq/100g	148 0,379	134,0 0,343	102 0,261
Calcio intercambiable	Ca	mg/kg meq/100g	2250 11,2	2950 14,7	1560 7,78
Magnesio intercambiable	Mg	mg/kg meq/100g	385 3,17	335 2,75	305 2,51
Sodio intercambiable	Na	mg/kg meq/100g	50,0 0,217	64,0 0,278	56,0 0,243
Acidez intercambiable	Ac. inter	mg/kg meq/100g	N/A N/A	N/A N/A	N/A N/A

Fuente: (Autores, 2019).

Tabla 32. Resultados de las propiedades fisicoquímicas de los dos puntos de muestreo en Juanchito.

Propiedades fisicoquímicas - Juanchito cultivos				
Variable	Expresión / Sigla	Unidad	Resultado M1	Resultado M2
Conductividad eléctrica	CE	dS/m	0,5	0,5
Nitrógeno total	N Total	%	0,1	0,2
Saturación de magnesio	Sat Mg	%	11,9	12,1
Saturación de sodio	Sat Na	%	1,5	0,9
Saturación de aluminio	Sat Al	%	N/A	N/A
Saturación de potasio	Sat K	%	2,7	3,6
Saturación de calcio	Sat Ca	%	83,7	83,5
Relación calcio / magnesio	Ca/Mg	Adimensional	7,0	6,9
Relación calcio / potasio	Ca/K	Adimensional	30,6	23,4
Relación magnesio / potasio	Mg/K	Adimensional	4,3	3,4
Relación (Ca+ Mg)/K	(Ca+ Mg)/K	Adimensional	34,9	26,8
Limo	tex	%	6,00	10,0
Densidad aparente	d. a.	g/cm ³	1,34	1,3
Cobre	Cu	mg/kg	6,4	2,1
Zinc	Zn	mg/kg	25,1	21,0
Boro	B	mg/kg	0,7	1,0
Fósforo	P	mg/kg	57,1	187,0

Azufre	S	mg/kg	60,0	54,1	
Potasio intercambiable	K	mg/kg meq/100g	389	480	1,230
Calcio intercambiable	Ca	mg/kg meq/100g	6100	5780	28,8
Magnesio intercambiable	Mg	mg/kg meq/100g	525	510	4,19
Sodio intercambiable	Na	mg/kg meq/100g	128	74,0	0,322
Acidez intercambiable	Ac. inter	mg/kg meq/100g	N/A	N/A	N/A

Fuente: (Autores, 2019).

Tabla 33. Resultados de las propiedades fisicoquímicas del blanco en ecoparque La Bandera

Propiedades fisicoquímicas - Blanco			
Variable	Expresión / Sigla	Unidad	Resultado
Conductividad eléctrica	CE	dS/m	0,31
Nitrógeno total	N Total	%	0,335
Saturación de magnesio	Sat Mg	%	16,6
Saturación de sodio	Sat Na	%	1,88
Saturación de aluminio	Sat Al	%	2,66
Saturación de potasio	Sat K	%	6,83
Saturación de calcio	Sat Ca	%	72
Relación calcio / magnesio	Ca/Mg	Adimensional	4,33
Relación calcio / potasio	Ca/K	Adimensional	10,5
Relación magnesio / potasio	Mg/K	Adimensional	2,44
Relación (Ca+ Mg)/K	(Ca+ Mg)/K	Adimensional	13
Densidad aparente	d. a.	g/cm ³	1,02
Limo	tex	%	34
Cobre	Cu	mg/kg	7,11
Zinc	Zn	mg/kg	10,6
Boro	B	mg/kg	0,245
Fósforo	P	mg/kg	39,6
Azufre	S	mg/kg	27,6
Potasio intercambiable	K	mg/kg meq/100g	260
Calcio intercambiable	Ca	mg/kg meq/100g	1400

Magnesio intercambiable	Mg	mg/kg	meq/100g	197
Sodio intercambiable	Na	mg/kg	meq/100g	42
Acidez intercambiable	Ac. inter	mg/kg	meq/100g	23,3

Fuente: (Autores, 2019).

3. Fotografías tomadas en la realización del método biológico.



Ilustración 42. Implementación del método. **Fuente:** Autores, 2019



Ilustración 43. Preparación de la leonardita. **Fuente:** Autores, 2019



Ilustración 44. Adecuación de las condiciones. **Fuente:** Autores, 2019

4. Fotografías tomadas en la realización del método químico.



Ilustración 45. Preparación de las soluciones base. **Fuente:** Autores, 2019

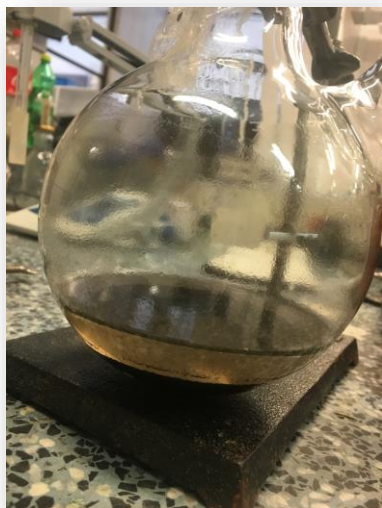


Ilustración 46. Calentamiento de la solución. **Fuente:** Autores, 2019

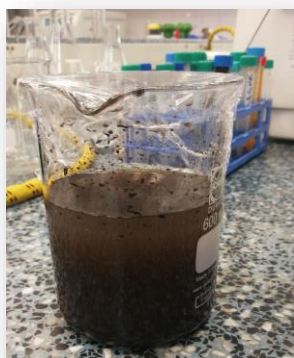


Ilustración 47. Proceso de lavados. **Fuente:** Autores, 2019



Ilustración 48. Proceso de secado. **Fuente:** Autores, 2019



Ilustración 49. Proceso en el sonicador después de realizar los montajes. **Fuente:** Autores, 2019

20. Glosario de términos:

- **Biorremediación:** La biorremediación es una técnica de descontaminación muy utilizada actualmente. Se basa en el uso de diferentes organismos (plantas, levaduras, hongos, bacterias, etc.) para neutralizar sustancias tóxicas, bien sea transformándose en sustancias de carácter menos tóxico o bien convirtiéndolo en inocuas para el medio ambiente y la salud humana. Este tipo de tratamiento puede ser muy efectivo en la eliminación de compuestos orgánicos tóxicos y biodegradables en suelos y aguas residuales. (Cruz, 2007).

- **Comunidad:** Conjunto de especies diferentes (animales o vegetales) que conviven y se encuentran en equilibrio biológico en un hábitat (medio ecológico) común (IDEAM, 2014).
- **Cuenca:** Es una unidad de territorio donde las aguas fluyen naturalmente en un sistema interconectado y en la cual interactúan uno o varios elementos biofísicos, socioeconómicos y culturales. (IDEAM, 2014).
- **Eficiencia:** Es una definición que vincula la relación entre el uso racional de los recursos o medios y los logros o metas conseguidas con el mismo, además de la capacidad de alcanzar un objetivo fijado con anterioridad en el menor tiempo posible lo que supone una optimización.
- **Industria:** actividad cuya finalidad es transformar materias primas en productos de consumo final o intermedio. La gran mayoría de actividades industriales se engloban dentro del sector secundario en el que implica siempre un proceso productivo, que emplea una cantidad determinada de trabajo y capital. (DANE, 2019)
- **Metales pesados:** Elementos metálicos que tienen un peso molecular relativamente alto, por ejemplo, plomo, plata, mercurio, cadmio, cobalto, cobre, hierro, molibdeno, níquel, zinc, tóxicos para la mayoría de los seres vivos, son biorefractarios y bioacumulativos por lo que están comúnmente asociados con problemas de contaminación y toxicidad. Están presentes también en los combustibles fósiles y por tanto son contaminantes de la atmósfera por los procesos de combustión industrial. (Tesauro Ambiental para Colombia, s.f)
- **Minería aluvial:** Actividades y operaciones mineras adelantadas en riberas o cauces de los ríos; también se emplean métodos de minería aluvial para la extracción de minerales y materiales en terrazas aluviales. (Ministerio de minas y energía, 2003)
- **Rizorremediación:** Es la combinación de plantas y microorganismos para la eliminación de contaminantes, proceso cooperativo en el cual las plantas suministran nutrientes a los microorganismos beneficiosos que permiten una reproducción más acelerada y los microorganismos protegen la planta y elimina los contaminantes del suelo. (Ciencia y sociedad, 2010).