

**EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS
DE PLATA EN SUELO DE PALMA DE ACEITE, MEDIANTE LA
COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN**

ADRIANA MARCELA MÁRQUEZ ALVARADO

Id. 000200972

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019

**EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS
DE PLATA EN SUELO DE PALMA DE ACEITE, MEDIANTE LA
COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN**

ADRIANA MARCELA MÁRQUEZ ALVARADO

Id. 000200972

Anteproyecto como prerrequisito para la aprobación de proyecto de grado, para optar por el
título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Directora
PhD. Sandra Natalia Correa Torres
Profesora Facultad de Ingeniería Ambiental
Universidad Pontificia Bolivariana

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2019**

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado principalmente a Dios, quien ha sido mi fuerza y fortaleza, mi luz y mi esperanza durante el trayecto de mi carrera, también por permitirme culminar esta etapa de mi vida.

A mi madre que ha estado todos los días apoyándome y aconsejándome y porque su amor es infinito e incondicional.

A mis hermanas por darme la oportunidad y el apoyo económico para lograr esta meta.

A mi sobrina que ha sido como una hermana para mí porque es una gran confidente, pues me escucho miles de veces cuando sentí que me rendía y porque siempre ha confiado en mí... gracias Tuli te amo.

A unos seres que han llenado mi alma y mi corazón de amor y alegría, mis caninas Bella, Jazmín, Milú y Luna, todos los días son las que me llenan de energía y vida.

Agradecimientos

Agradezco y doy toda la gloria a Dios porque ha sido el impulso de todos los días trabajar por este proyecto, porque cuando he sentido caer siempre ha puesto Ángeles en mi camino para darme aliento.

A mi Mami Chavela gracias porque ha estado siempre a mi lado, por todos los esfuerzos que hace por mí, porque este logro también es de ella, gracias por los consejos y regaños me han servido demasiado y gracias por estar tan pendiente de mis perritas de colaborar tanto con ellas.

Gracias Enlly y Evila pues ustedes me marcaron el camino para iniciar una carrera profesional y me han dado el apoyo económico y en algunas ocasiones el apoyo moral que todos necesitamos en algún momento.

A Evelyn porque cuando necesite apoyo moral siempre estuvo para escucharme y darme el abrazo que siempre me reconforto.

A Claudia y a Karen, mis compañeras de estudio y planes que nunca salían, por ser un apoyo constante y tenerme paciencia.

A Liván porque desde que comenzó nuestra amistad siempre me ha sacado las mejores sonrisas y en los momentos tristes siempre ha sido un apoyo incondicional, es un hombre demasiado especial, además tenemos una copia que nunca se olvida y recuerdos con JP.

A Humberto F. has sido un gran compañero gracias por siempre ser un respaldo y ver por mí desde que me conoces, amo las rodadas siempre me sacaban de la rutina y eran una experiencia única...siempre lo he dicho eres grande para mí...

A Samuel y Yalenka que fueron mis compañeros de trabajo de grado y de laboratorio porque siempre nos apoyábamos y trabajamos en equipo para obtener el mejor resultado y solucionar los inconvenientes a la brevedad posible.

Al personal de laboratorio que siempre estuvo dispuesto a ayudar y ser un soporte para nuestros experimentos, en especial a Naidú que todos los días se mantuvo al pendiente de lo que requeríamos en el laboratorio.

A mi directora Sandra Correa por su entrega, paciencia, comprensión, dedicación y por compartir su conocimiento y experiencia.

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	12
2.	JUSTIFICACIÓN	14
3.	OBJETIVOS.....	17
3.1	Objetivo General	17
3.2	Objetivos específicos	17
4.	MARCO TEÓRICO.....	18
4.1	Nanotecnología	18
4.1.1	Nanopartículas	18
4.2	Nanorremediación	25
4.3	Técnicas de descontaminación de suelos.....	28
4.4	Suelo	36
4.4.1	Propiedades físicas del suelo	38
4.4.2	Propiedades químicas del suelo	41
5.	METODOLOGÍA	44
5.1	Identificación de las características fisicoquímicas del suelo de palma de aceite para la aplicación de nanopartículas de plata.	45
5.1.1	Caracterización del suelo de palma de aceite y el suelo contaminado con AgNPs....	46
5.1.2	Síntesis de las nanopartículas de plata	46
5.1.3	Magnetización y caracterización de las nanopartículas de plata	48
5.2	Determinación de la eficiencia de remoción de nanopartículas de plata	49
5.3	Determinación del porcentaje de retención de nanopartículas de plata en el suelo de palma de aceite.....	53
5.3.1	Aplicación de la técnica de lavado a presión (flushing) para el análisis del porcentaje de retención de AgNP's	54
5.3.2	Cálculo del porcentaje de retención de AgNPs en el suelo	56
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
6.1	Identificación de las características fisicoquímicas del suelo de palma de aceite para la aplicación de nanopartículas de plata.	58
6.1.1	Caracterización del suelo de palma de aceite y el suelo con aplicación de AgNPs....	59
6.1.2	Síntesis de las nanopartículas de plata	65
6.1.3	Magnetización y caracterización de las nanopartículas de plata	66
6.2	Determinación de la eficiencia de remoción de nanopartículas de plata aplicadas en un suelo de palma de aceite mediante el pretratamiento con electrorremediación	66

6.2.1	Determinación de la distancia de electrodos.....	67
6.2.2	Determinación de los electrodos y voltajes	68
6.2.3	Determinación de la remoción de nanopartículas de plata después de electrorremediación	70
6.3	Determinación del porcentaje de retención de nanopartículas de plata en el suelo de palma de aceite, a través del post-tratamiento con la técnica de lavado a presión.....	71
6.3.1	Aplicación de la técnica de lavado a presión (flushing) para el análisis del porcentaje de retención de AgNP's	71
6.3.2	Cálculo del porcentaje de retención de AgNPs en el suelo	72
7.	CONCLUSIONES	74
8.	RECOMENDACIONES	76
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nutrientes del suelo.	43
Tabla 2. Procedimientos fisicoquímicos para caracterización del suelo	46
Tabla 3. Variables evaluadas para la técnica electroremediación	51
Tabla 4. Textura muestra de suelo proveniente de cultivo de palma	59
Tabla 5. Textura suelo después de electroremediación	60
Tabla 6. Resultados pH del suelo antes y después de electroremediación	61
Tabla 7. CE antes y después de tratar el suelo.....	63
Tabla 8. Humedad gravimétrica	64
Tabla 9. CIC antes y después de tratar el suelo	64
Tabla 10. Comparación % Remoción por distancias entre electrodos.....	68
Tabla 11. <i>Combinación de electrodos Cobre-bronce</i>	68
Tabla 12. <i>Combinación de electrodos Hierro-Cobre</i>	69
Tabla 13. <i>Combinación de electrodos Hierro-Bronce</i>	69
Tabla 14. Comparación de las condiciones óptimas por combinación de electrodos	70
Tabla 15. <i>Comparación de la concentración óptima de AgNPs</i>	70
Tabla 16. Resultados de absorción atómica con el post-tratamiento lavado a presión (flushing)	72
Tabla 17. Comparación efectividad de técnicas.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Microscopio Electrónico de Barrido – SEM.....	22
Figura 2. Equipo de espectroscopia de absorción atómica.....	25
Figura 3. Algunos contaminantes tratados con NPs.	28
Figura 4. Esquema básico del proceso de electrorremediación.....	31
Figura 5. Esquema que muestra un perfil del suelo y los distintos horizontes que los conforman.....	37
Figura 6. Clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro en el suelo	39
Figura 7. Diagrama de textura	39
Figura 8. Ubicación Geográfica	44
Figura 9. Fases metodológicas.....	45
Figura 10. Esquema experimental de la síntesis por química verde	47
Figura 11. Prototipo de electrorremediación	51
Figura 12. Esquema de recolección de muestra.....	53
Figura 13. Montaje de lavado a presión (Flushing)	55
Figura 14. Recipientes del suelo (Flushing).....	56
Figura 15. Determinación de nanopartículas de plata con espectrofotometría UV-visible.....	65
Figura 16. Microscopia Electrónica de Barrido de AgNP's a 250.000X	66

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN SUELO DE PALMA DE ACEITE, MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN

AUTOR(ES): ADRIANA MARCELA MÁRQUEZ ALVARADO

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Sandra Natalia Correa Torres

RESUMEN

El presente proyecto de grado se estudió la combinación de las técnicas de electrorremediación y lavado a presión (flushing) para evaluar el porcentaje de retención de nanopartículas de plata, aplicadas a un suelo proveniente de cultivos de palma africana. Las nanopartículas de plata fueron sintetizadas a partir del extracto vegetal que se obtuvo de las hojas de la palma africana y nitrato de plata. La caracterización de estas fue realizada por medio de la Espectrofotometría Ultravioleta Visible y por Microscopía Electrónica de Barrido (siglas en inglés SEM). La espectroscopia UV-VIS definió que el proceso de síntesis formó nanopartículas de plata, estas presentan una longitud de onda de 445 nm y una absorbancia de 0,594, pues el rango de la longitud de onda para la formación de nanopartículas de plata está entre 400 – 450 nm. Para el montaje experimental de la electrorremediación se emplearon recipientes de acrílico con capacidad para 2 kg de suelo, al cual se le aplicó 200 y 300 ppm de nanopartículas y se estudiaron variables como: tipo de electrodos (hierro, cobre y bronce), voltajes (60, 70 y 80 V), distancias (5, 10 y 15 cm) y la concentración entre 200 ppm y 300 ppm que menor porcentaje de retención reporte. Para el lavado a presión (flushing) se utilizaron recipientes de plástico y mangueras conectadas para realizar la inyección de agua a presión y que así fluya a través del suelo. El flujo fue constante controlado se empleó presión de 30 psi y se analizó el suelo del recipiente. El porcentaje de retención obtenido por la electrorremediación fue 43,73% aplicando una concentración de 200 ppm y para el flushing se obtuvo un 17,44% de retención total de las AgNP's, confirmando de esta manera que las técnicas fueron eficientes para la recuperación de las AgNP's

PALABRAS CLAVE:

Electrorremediación, flushing, nanopartículas, plata, suelo

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF THE PERCENTAGE OF RETENTION OF SILVER NANOPARTICLES IN OIL PALM SOIL, USING A COMBINATION OF DECONTAMINATION TECHNIQUES

AUTHOR(S): ADRIANA MARCELA MÁRQUEZ ALVARADO

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Sandra Natalia Correa Torres

ABSTRACT

The present degree project studied the combination of electroremediation and flushing techniques to evaluate the retention percentage of silver nanoparticles applied to soil from African palm crops. The silver nanoparticles were synthesized from the vegetable extract obtained from African palm leaves and silver nitrate. These were characterized by Visible Ultraviolet Spectrophotometry and Scanning Electron Microscopy (SEM). The UV-VIS spectroscopy defined that the synthesis process formed silver nanoparticles, these present a wavelength of 445 nm and an absorbance of 0.594, since the wavelength range for the formation of silver nanoparticles is between 400 - 450 nm. For the experimental assembly of the electroremediation, acrylic containers with capacity for 2 kg of soil were used, to which 200 and 300 ppm of nanoparticles were applied and variables such as: type of electrodes (iron, copper and bronze), voltages (60, 70 and 80 V), distances (5, 10 and 15 cm) and the concentration between 200 ppm and 300 ppm were studied, with a lower percentage of retention reported. For flushing, plastic containers and connected hoses were used to inject pressurized water that flows through the soil. The controlled constant flow was used pressure of 30 psi and the floor of the container was analyzed. The percentage of retention obtained by electroremediation was 43.73% applying a concentration of 200 ppm and for flushing 17.44% of total retention of the AgNP's was obtained, confirming in this way that the techniques were efficient for the recovery of the AgNP's.

KEYWORDS:

Electroremediation, flushing, nanoparticles, silver, soil

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace algunas décadas el ser humano ha mostrado gran preocupación por el cuidado de su entorno y medio ambiente. Por esta razón ha desarrollado métodos y procesos para tratar de combatir y contrarrestar los daños que ocasiona la contaminación a los diferentes núcleos del medio ambiente como el agua, el aire, la fauna, la flora y al no menos importante pero que generalmente se pasa por alto, el suelo. La contaminación del suelo es el principal foco de contaminación de nuestra cadena alimenticia y de todas las especies que habitan el planeta.

El suelo se define como un recurso finito, esto indica que los daños, pérdidas y degradación que sufra el suelo no es recuperable en el transcurso de la humanidad. Los alimentos que consumimos se ven directamente afectados cuando el suelo se encuentra contaminado, además del agua, aire, nuestra salud y en general todos los organismos que habitan en el mundo. Se estima que el 95% de los alimentos de consumo se producen directa o indirectamente en el suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018).

La contaminación del suelo se ha pronunciado más en la última década, pues se ve afectado por diferentes contaminantes por la actividad que desarrolla el ser humano, pues introduce sustancias tóxicas tales como desechos de industrias, efluentes domésticos, compuestos orgánicos volátiles, fertilizantes en la superficie

terrestre, plaguicidas y entre otros. Con este tipo de problemáticas se ha implementado la nanotecnología y con ella el uso de las nanopartículas de plata (Salumina, 2018). La aplicación de las nanopartículas de plata (AgNP's) también genera contaminación del suelo y para ellos existen técnicas de descontaminación tales como la electrorremediación, la aplicación de la técnica ha reportado valores altos de recuperación y como es de esperarse los porcentajes de retención tienden a ser bajos pues la mayoría de nanopartículas de plata son recuperadas. Además, para eliminar los residuos de AgNP's se complementa con la técnica de lavado a presión (flushing) que logra recuperar la mayor cantidad del residuo que se queda en el suelo.

En este proyecto de grado se llevó a cabo la evaluación del porcentaje de retención de las nanopartículas de plata por medio de la combinación de las técnicas de electrorremediación y lavado a presión (flushing).

2. JUSTIFICACIÓN

Desde hace algún tiempo las nanopartículas (NPs) se han utilizado en variedad de productos como alimentos, bebidas, dispositivos electrónicos, artículos de belleza, infantiles, limpieza y demás. El empleo de nanopartículas de plata al entrar en contacto con el suelo puede llegar a generar cambios tanto positivos como negativos, es decir, las AgNP's al entrar en contacto en la misma.

De esta manera se evidencia que el empleo de estas se familiariza mucho con el sector industrial y por supuesto con la producción de este tipo de materiales, pero aún no se tiene conocimiento sobre cuál es su destino cuando han dejado de cumplir su función. (Gálvez Pérez et al., 2015).

Las nanopartículas de plata al ser introducidas en el medio ambiente interactúan con el agua, el suelo y el aire. Generalmente esta interacción cambia las propiedades superficiales de las partículas y no solo de ellas sino también en la matriz que se introduzcan pueden generar cambios físicos, químicos o estructurales. La partícula puede verse afectada porque puede dar lugar a la agregación de partículas o a cambios en la carga de las mismas y a otras propiedades superficiales. Los efectos generados se han estudiado en ecosistemas acuáticos y suelos y dejan ver claramente la importancia de entender las nanopartículas y entorno ambiental como un complejo que requiere consideración en totalidad con el fin de comprender el comportamiento de las partículas en el ambiente (Gálvez Pérez et al., 2015)

Existen algunas rutas para el destino final de las NPs, pudiendo ser residuos líquidos, plantas de tratamientos de agua residual, suelo, entre otros. En particular se estudiará la eficacia de la técnica de electrorremediación en un suelo contaminado con nanopartículas de plata AgNPs con el fin de evaluar el porcentaje de retención de la misma en el suelo de palma de aceite, pues algunos estudios han demostrado que la toxicidad de las AgNPs aumenta con el tiempo y que sus recubrimientos influyen sobre su toxicidad en invertebrados subterráneos. Dado que las nanopartículas tienen gran variedad de aplicaciones, la exposición humana a estas se presenta por medio de los alimentos, el aire y por contacto, esto indica que las vías de exposición son oral, respiratoria y dérmica que son las más relevantes. Por la vía oral se suministran gran cantidad de materiales y estos tienen contacto con el tracto gastrointestinal que posee un área superficial total de hasta 200 m² para el intercambio de nutrientes. En cuanto a la vía respiratoria se considera que es la principal vía de entrada para las partículas ambientales. La acción de inhalar estas partículas ultrafinas se asocia con efectos pulmonares y cardiovasculares adversos. Y por la vía dérmica la explotación de las nanopartículas de plata dentro de los textiles y apósitos para las heridas que permite el contacto entre las AgNP's y la piel (Ávalos, 2013).

Evaluar la retención de nanopartículas de plata aplicadas en un suelo proveniente de un cultivo de palma de aceite, mediante la combinación de dos técnicas de descontaminación de suelos como electrorremediación y lavado a presión (flushing). La retención se realizará a escala de laboratorio para así contribuir con el mejoramiento y recuperación del ambiente. Con el fin de comprobar

si el total de las nanopartículas de plata fueron recuperadas se aplicará la técnica de lavado a presión. Y así evaluar el porcentaje de retención que queda en el suelo después de aplicar la última técnica para verificar la eficiencia de la combinación de las mismas.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar la remoción de nanopartículas de plata aplicada en un suelo proveniente de un cultivo de palma de aceite, mediante la combinación de las técnicas de electrorremediación-lavado a presión, a escala de laboratorio.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características fisicoquímicas del suelo de palma de aceite para la aplicación de nanopartículas de plata.
- Determinar la eficiencia de recuperación de nanopartículas de plata aplicadas en un suelo de palma de aceite mediante el pretratamiento con electrorremediación.
- Determinar el porcentaje de retención de nanopartículas de plata en el suelo de palma de aceite, a través del post-tratamiento con la técnica de lavado a presión.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Nanotecnología

La nanotecnología –término antepuesto por el sufijo nano, que proviene del griego y significa diminuto– consiste en manipular materiales a niveles atómicos y moleculares para crear nuevas estructuras moleculares conocidas como “nanomateriales”, las cuales poseen características únicas y nuevas diferentes a las de los materiales originales de los que se derivan. Estos materiales pertenecen a varias clases que varían entre sí en numerosas características básicas como la persistencia, reactividad y comportamiento en los sistemas biológicos, a tal punto que se hace imposible formular generalizaciones sobre sus propiedades (Molins, 2008).

4.1.1 Nanopartículas

Una nanopartícula es una partícula con por lo menos una dimensión menor de 100 nm. Dependiendo de su composición se pueden clasificar en carbonosas, metálicas, cerámicas y poliméricas. Las nanopartículas metálicas exhiben unas excelentes propiedades físicas, químicas y biológicas, que son intrínsecas a su tamaño nanométrico. Entre ellas encontramos quantum dots (puntos cuánticos o transistores de un solo electrón) o nanopartículas de metales nobles como oro, plata o de metales reactivos como el dióxido de titanio, entre otras (Naranjo, 2015).

El uso de metales elementales o de valencia cero en forma de nanoescala, como el hierro, níquel y paladio, ha mostrado resultados alentadores hacia los sitios contaminados con diversos tipos de sustancias tóxicas, principalmente para estabilizar los metales de transición, tales como cromo y arsénico y deshalogenación de contaminantes orgánicos persistentes compuestos. Debido a su pequeño tamaño (por lo general menos de 100 nm), área de superficie alta y las características químicas únicas, las nanopartículas se han estudiado ampliamente y se están aplicando cada vez con mayor frecuencia (Cecchin, Reddy, Thomé, Tessaro, & Schnaid, 2016).

Las fuentes de nanopartículas (NPs) pueden ser clasificadas como naturales o derivadas de actividades antropogénicas intencionales o accidentales. En teoría, las NPs pueden ser producidas a partir de casi cualquier producto químico, sin embargo, la mayoría de las NPs que están actualmente en uso hoy en día, han sido fabricadas a partir de metales de transición, silicio, carbono y óxidos de metal (Poveda, 2015).

4.1.1.1 Nanopartículas de plata (AgNPs)

Desde hace tiempo la plata ha sido utilizada en varias aplicaciones, una de las más destacadas la desinfección del agua. En el siglo XVII se conoce como un producto medicinal con variedad de propósitos y finalizando el siglo XIX surge la solución de nitrato de plata para emplearse como gotas oculares en los recién

nacidos. Existen indicadores de que las nanopartículas (NP) de plata AgNPs están presentes desde siempre en la naturaleza y que su producción deliberada se práctica desde hace más de 100 años, siendo uno de los nanomateriales más utilizados. La primera obtención de AgNPs data de 1889, cuando M.C Lea informa sobre la síntesis de plata coloidal estabilizada con citrato, procedimiento por el cual el tamaño de las partículas obtenidas es de 7 a 9 nm. En 1902 se describe la estabilización de AgNPs utilizando proteínas y en 1953 Moudry patenta un producto con AgNPs de 2 a 20 nm estabilizadas en gelatina (Cardoso, 2016). Las nanopartículas son consideradas aquellas que tienen un tamaño entre 1 y 100nm en al menos una dimensión (escala: 10⁹m). Acorde a la disminución del tamaño, el radio entre el área y el volumen se incrementa de forma muy importante, esto lleva a modificaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas.

Existen diferentes rutas de síntesis de NP que conducen a tamaños variables, morfología y estabilidad. Los métodos se pueden clasificar en tres categorías: síntesis física, química y biológica.

Generalmente los métodos de producción de NP se clasifican como:

- Top-down (técnicas descendentes: se va reduciendo el tamaño de las partículas).
- Bottom-up (técnicas ascendentes: a partir de átomos individuales, se van formando ensambles) (Cardoso, 2016)

Las nanopartículas de plata llegan al suelo por medio de diferentes agentes y vías, pues gran variedad de productos que se emplean para su fertilización y nutrición de este, algunos de los estos productos llegan a contener nanopartículas de plata, por lo que fácilmente llegan a contaminar el suelo. Las condiciones de esta matriz son variables y complejas, esto indica que genera dificultad para realizar predicciones genéricas sobre el destino final de la plata en el medio ambiente. La biodisponibilidad de AgNP's en el suelo depende directamente tanto de partícula como de las propiedades del suelo (Cardoso, 2016)

Existen varias técnicas para caracterizar las nanopartículas algunas de estas nos suministran el tamaño, morfología, diámetro, entre otras.

4.1.1.2 Técnicas de caracterización de nanopartículas metálicas

Existe variedad de técnicas para caracterizar las nanopartículas algunas de estas permiten identificar el tamaño, diámetro, morfología, determinar en qué longitud de onda se encuentra la nanopartícula y entre otras características que nos sirven como base para identificar el tipo nanopartícula o partícula que se empleará para las aplicaciones requeridas.

a) Microscopia de barrido electrónico – SEM (Scanning Electron Microscopy)

El microscopio electrónico de barrido – SEM, es uno de los mejores métodos adaptados al estudio de la morfología de las superficies. a diferencia como un

microscopio óptico que utiliza fotones del espectro visible, la imagen que arroja el SEM se genera por la interacción de un haz de electrones, los cuales barren un área determinada sobre la superficie de la muestra. (Sergio, 2016)

En la figura 1 se aprecia el microscopio de barrido electrónico, que cuenta con alta resolución (100.000x), la gran profundidad de campo que resuelve una imagen tridimensional de la muestra y la facilidad de la preparación de las muestras.

Figura 1. *Microscopio Electrónico de Barrido – SEM*



Fuente: (Hernández E, 2017)

El SEM puede estar equipado de diversos detectores, entre los que se encuentran: un detector de electrones retrodispersado que permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie (BEI) y un detector de energía dispersiva (EDS) que permite detectar los rayos X generados por la muestra

y realizar un análisis de distribución de elementos en superficie (Electron microprobe analysis) (Sergio, 2016)

b) Espectroscopia de absorción atómica

La espectroscopia de absorción atómica (A.A) lleva a cabo un proceso que sucede cuando los átomos de un elemento en estado fundamental absorben energía radiante a una longitud de onda específica. La cantidad de radiación que es absorbida aumenta al hacerlo el número de átomos del elemento presente en el campo óptico, empleándose con fines analíticos cuantitativos.

La técnica A.A. permite la determinación de aproximadamente 70 elementos en cantidades bajas como 10^{-14} g con gran selectividad, una minuciosa manipulación y un tamaño mínimo de muestra. La técnica principalmente se usó para la determinación de elementos metálicos, a pesar de que se han desarrollado otros métodos que permiten cuantificar gran variedad de aniones y compuestos orgánicos. En el proceso las muestras se vaporizan y se convierten en átomos libres, el proceso es conocido como atomización (usualmente se obtiene por llama). Sobre el vapor atómico generado se hace incidir la radiación electromagnética que se absorbe parcialmente por el analito (González Pérez, n.d.)

El espectrofotómetro de absorción atómica (figura 2) está conformado por las siguientes partes:

- La fuente de radiación que emite una línea específica correspondiente a la necesaria para efectuar una transición en los átomos del elemento analizado.
- El nebulizador, que, por aspiración de la muestra líquida, forma pequeñas gotas para una atomización más eficiente.
- El quemador, el cual por efecto de la temperatura alcanzada en la combustión y por la misma reacción que esta genera, hace que se favorezca la formación de átomos a partir de los componentes en solución.
- El sistema óptico que separa la radiación de longitud de onda de interés, de todas las demás radiaciones que entran a dicho sistema.
- Un detector o transductor, que sea capaz de transformar, en relación proporcional, las señales de intensidad de radiación electromagnética, en señales eléctricas o intensidad de corriente.
- Un amplificador o sistema electrónico, que amplifica la señal eléctrica producida, para que en el siguiente paso pueda ser procesada con circuitos y sistemas electrónicos comunes.

Figura 2. *Equipo de espectroscopia de absorción atómica.*



Fuente: Autor

4.2 Nanorremediación

La nanotecnología también es útil como una tecnología ambiental y se maneja bajo el nombre de nanorremediación. Ésta se usa para proteger al ambiente, ya sea a través de la prevención, el tratamiento o la limpieza de sitios con desechos peligrosos (Karn, Kuiken, & Otto, 2009). Estos autores concluyeron que la nanorremediación in situ tiene diferentes ventajas: reduce el costo general y el tiempo de la limpieza de sitios contaminados; puede ser utilizada a gran escala; elimina la necesidad de tratamiento y disposición de suelo contaminado, reduce las concentraciones de los contaminantes casi a cero. Sin embargo, para prevenir algún impacto adverso ambiental se necesitan estudios profundos que evalúen el efecto de la nanorremediación a nivel ecosistema (Carrillo González, 2009).

Los métodos de nanorremediación utilizan nanomateriales reactivos para la transformación y desintoxicación de contaminantes. Estos nanomateriales tienen

propiedades que favorecen la reducción química y la catálisis para mitigar los contaminantes. Las propiedades de los nanomateriales permiten que puedan utilizarse in situ. Por ejemplo, las NPs pueden introducirse en espacios muy pequeños y distribuirse más rápidamente, que las partículas de mayor tamaño. Aunque no pueden moverse muy lejos del punto de inyección (Tratnyek & Johnson, 2006)

La mayoría de las aplicaciones ambientales de la nanotecnología consideran tres categorías:

- Productos sustentables ambientalmente benignos (química verde o prevención de la contaminación)
- Remediación de materiales contaminados con sustancias peligrosas
- Sensores para agentes ambientales.

En estas tres categorías además de emplear sustancias químicas o materiales no biológicos, también se utilizan agentes microbianos y materiales biológicos, que se envuelven en la nanotecnología suave. La nanotecnología va encaminada al desarrollo de mejores métodos para la detección y descontaminación de agentes biológicos dañinos (Tratnyek & Johnson, 2006). Gran variedad de metales se ha ensayado para la remediación, algunos de ellos son: zeolitas, óxidos metálicos, metales nobles (plata, paladio y cobre), dióxido de titanio,

fibras de carbono y nanotubos, y enzimas. No obstante, el más usado es el hierro valencia zero (nZVI de sus siglas en ingles zero-valent-iron Fe0) (Karn et al., 2009).

Con el fin de que la nanorremediación sea exitosa, es necesario realizar una apropiada caracterización de los sitios de muestreo, por ejemplo, la localización del lugar, propiedades geoquímicas (fuerza iónica, pH, oxígeno disuelto, concentración de nitratos, nitritos y sulfatos), las condiciones geológicas (porosidad, profundidad del manto freático y la composición de la matriz del suelo), también la concentración y el tipo de contaminantes. Las variables mencionadas anteriormente son las que definirán si las NPs tienen la capacidad de infiltrarse a la zona a remediar y las condiciones son adecuadas para la transformación de los contaminantes.

En el entorno ambiental las NPs tienen gran variedad de usos y aplicaciones, pero la aplicación de estas genera riesgos y consecuencias. Se emplean en la mitigación del efecto del contaminante o en el tratamiento de aguas y suelos. Algunas de sus aplicaciones son la remoción de contaminantes en el agua por catálisis, oxidación, reducción y adsorción.

Existen una gran cantidad de ejemplos de la aplicación y uso de las nanopartículas para la transformación de compuestos orgánicos derramados en el suelo o cuerpos de agua. En la figura 3 se puede apreciar algunos de los contaminantes.

Figura 3. Algunos contaminantes tratados con NPs.

Sitio	Localización	Contaminante	Tipo de nanopartícula	Duración
Procesamiento de Al	Alabama	PCE, TCE y PCB	Carboximetil celulosa	29 de inyección
BP- Prudhoe Bay Unit	Alaska	TCA Diesel	Pd-nZVI	40.5 h
Slovakia-Browfield	Slovakia	TCE-DCE	nZVI	
NJ Former Chemicals storage facilities	Winslow Township, NU	PCE TCE DCE	nZVI	3 meses
Edison industrial	Edison, NJ	TCA,TCE, DCA, DCE cloroetano	nZVI	13 meses
Quebec Valcariter Garrison	Quebec, Canada	TCE, DCE, VC	nZVI, Catálisis con Pb	12 meses
Ringwood residential	Ringwood, NJ	Tetracloroetano, etilxilftalato, benzoantraceno	Catálisis con Ca-metales nobles	2 días
Taiwan-solvent manufacturing plant	Kachsiung, Taiwan	1,1,2,2,TeCA 1,1,1 TCA TCE, Cr	Pd-nZVI	6 meses

Fuente: (Carrillo González, 2009).

4.3 Técnicas de descontaminación de suelos.

La importancia del suelo se basa en que es un elemento natural dinámico y vivo. El suelo constituye la capa superficial de la corteza terrestre siendo uno de los recursos naturales más importantes con el que contamos, pues es el substrato que sustenta la vida del planeta. El suelo al poseer el poder de amortiguación o desactivación natural de la contaminación, filtra, almacena, degrada, neutraliza e inmoviliza sustancias orgánicas e inorgánicas tóxicas, impidiendo que lleguen a las aguas subterráneas y al aire o que penetren la cadena alimenticia. Se considera que el suelo es un elemento frágil, además un recurso natural no renovable pues la velocidad de formación y regeneración es lenta mientras que por el contrario los procesos que contribuyen a sus degradación, deterioro y destrucción suelen ser mucho más rápidos (Ortiz Bernad, Sanz García, Dorado Valiño, & Villar Fernández,

2007). Las técnicas de descontaminación que se exponen a continuación tienen un objetivo común y principal que es, no dañar más allá el suelo de lo que este se encuentra afectado.

4.3.1.1 Electrorremediación

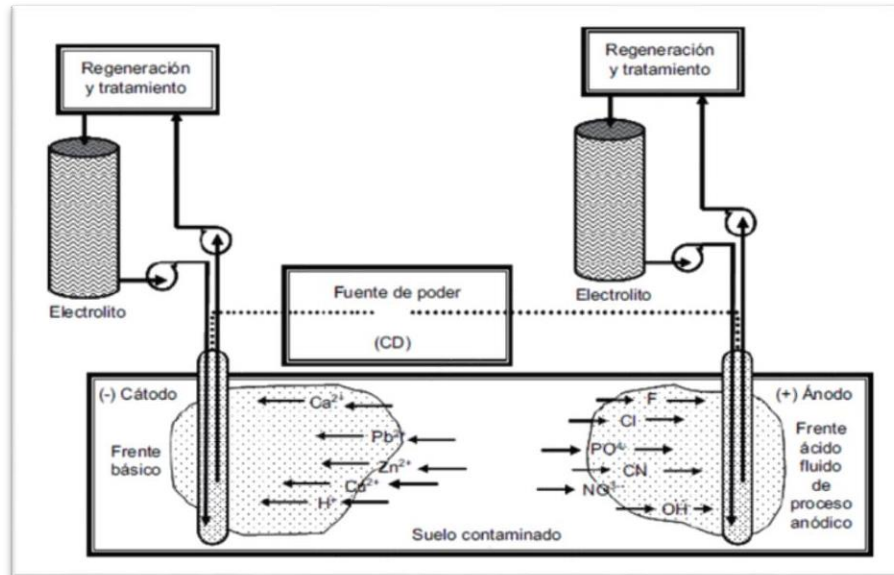
La electrorremediación es una técnica que consiste en la descontaminación del suelo, especialmente de metales pesados y otros compuestos iónicos de suelos o lodos provenientes de un tratamiento previo, contaminado con dichas especies. esta técnica implica la aplicación de un campo eléctrico continuo entre dos electrodos fijos en el suelo, durante cierto tiempo. Al aplicar el campo eléctrico se consiguen diversos factores como el grado de humedad del terreno, acidez y entre otras, además movilizar las especies cargadas hacia los electrodos correspondientes (ánodo o cátodo).

La técnica de electrorremediación resulta útil en zonas donde se disponga de energía eléctrica a bajo costo, también puede adaptarse un sistema de energías alternativas (energía solar/eólica, almacenándose en acumuladores) permitiendo el funcionamiento de una forma más o menos autónoma y de bajo costo (Jaramillo, 2002). Una de las principales aplicaciones de la técnica ha sido en suelos contaminados con metales, con el fin de remover Cr, Cd, Hg, Pb, Mn, Zn y As (De la Rosa-Perez, Teutli-León, & Ramírez-Islas, 2007)

En variados estudios de investigación la aplicación de la técnica electrorremediación ha permitido alcanzar eficiencias en la recuperación, cercana al 100%, especialmente si la contaminación ha sido producto de un solo metal. En cuanto a las aplicaciones en campo, los resultados son variables dependiendo del tipo de suelo, contaminante y la técnica (De la Rosa-Perez et al., 2007). Algunos de los mecanismos de remoción por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, y electroforesis. Los dos primeros mecanismos son los que ejercen mayor influencia sobre el transporte de la sustancia problema.

El proceso que ocurre dentro de la electrorremediación es la Electromigración. La electrorremediación es un fenómeno donde los iones en solución y los coloides que tiene carga eléctrica se mueven a través del campo eléctrico con velocidad proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico y la movilidad del ion o partícula. En la figura 4, se presenta un esquema de la técnica de electrorremediación, en el cual las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico. El frente ácido se forma en el ánodo y migra hacia el cátodo.

Figura 4. Esquema básico del proceso de electroremediación



Fuente: (De la Rosa-Perez et al., 2007)

I. Factores que influyen en el proceso de electroremediación

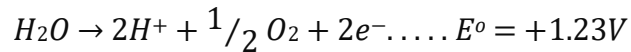
La electroremediación es una técnica que parece simple, sin embargo, hay varios factores fisicoquímicos que influyen en el transporte de contaminantes, esto ayuda a que la remediación del suelo sea totalmente efectiva. Los factores que tienen mayor influencia en la técnica de electroremediación se explican a continuación.

a) Determinación de pH en el suelo

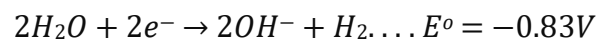
Los cambios de pH promueven reacciones de los metales con otras sustancias que están en el suelo de forma natural, este regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electroremediación. La hidrólisis del agua produce

disociación que genera iones hidrógeno (H⁺) en el ánodo e iones hidroxilo (-OH) en el cátodo, liberando oxígeno e hidrógeno respectivamente. (Ec. 1 y 2)

Ecuación 1. *Reacción de hidrólisis que genera iones de Hidrógeno en el ánodo*



Ecuación 2. *Reacción de hidrólisis que genera iones de hidroxilo en el cátodo.*



En el caso de haber metales adsorbidos, estos se solubilizan por el frente ácido y transportados hacia el cátodo. Cuando no se hace lavado en los pozos, el frente alcalino penetrará a una menor velocidad a la del frente ácido y cuando ambos frentes se choquen genera una zona en donde el pH cambia bruscamente (zona de transición), resultando así una frontera con un marcado cambio de pH (de 2 a 13 en menos de 0,5cm), en esta zona los contaminantes se acumulan debido a que frecuentemente precipitan como hidróxidos metálicos.

Después de un tiempo se observa que el suelo se acidifica, excepto la región cercana al cátodo. Pero se presentan algunas excepciones, por ejemplo, el suelo es demasiado alcalino, cuando hay presencia de sustancias amortiguadoras (fosfatos, carbonatos y cuando los electrodos son de material reactivo (electrodos de hierro)). Para que la recuperación sea exitosa, esta depende de mantener el

contaminante inorgánico en solución evitando al máximo los cambios súbditos de pH; en el caso de contaminantes orgánicos (ácidos, fenoles y otros) las condiciones óptimas de remoción son donde el pH logra desplazar el equilibrio de disociación de la sustancia hacia la forma disociada (De la Rosa-Perez et al., 2007)

b) Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica varía dependiendo del tipo de suelo que se trabaje, la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato se mide mediante la conductividad eléctrica. La CE es la medida de un material que tiene la capacidad de conducir la corriente eléctrica, el valor es mayor cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Lo anterior quiere decir que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales. (Barbaro, Karlanian, & Mata, 2005). Para determinar la CE del suelo es necesario colocarlo en una suspensión acuosa y medir con un multiparámetro. La medida obtenida es siemens, ya que es el inverso de la resistencia a la conducción por centímetro de material. En electrorremediación los cambios de pH en el suelo alteran la conductividad global del medio por cual generan perfiles de voltaje (De la Rosa-Perez et al., 2007)

c) Contenido de agua

El movimiento del electrolito por electroósmosis es función del contenido de agua; por lo que el grado de saturación del suelo es de vital importancia, pues permite llevar a cabo el proceso electrocinético. La distribución discontinua de

humedad en el suelo contaminado se puede observar durante la electrorremediación, pues el electrolito que se desplaza hacia uno de los electrodos incrementa la humedad en este y la disminuye en el contrario. La disminución se relaciona con el desarrollo de poros de presión negativos, variaciones de pH y por la fuerza del campo, lo que se refleja en las tasas de flujo electroosmótico irregulares. Por ello es de gran importancia mantener la humedad ideal del suelo suministrando electrolitos a la misma tasa electroosmótica a que se drena el sistema (De la Rosa-Perez et al., 2007)

d) Naturaleza y química del suelo

La electrorremediación a escala de laboratorio ha sido exitosa con suelos de granulometría muy fina y baja permeabilidad. Se aplica en suelos arenosos siempre y cuando haya un horizonte permeable debajo del suelo contaminado, esto evitará que el electrolito llegue a estratos más profundos. En la cinética de remoción del contaminante influyen ciertas características del suelo, algunas de ellas como intercambio catiónico, capacidad de adsorción y amortiguamiento de pH; en suelos que presentan limos y arcillas, poseen mayor superficie de contacto, por lo que metales y sustancias iónicas pueden adsorber con simplicidad en sus superficies, esto dificulta la remoción. En general las arcillas poseen carga superficial negativa y retiene por atracción iónica la mayor cantidad de contaminantes metálicos (De la Rosa-Perez et al., 2007)

4.3.1.2 Técnica de lavado Flushing

La técnica de lavado flushing, es un tratamiento in situ que consiste en inundar los suelos contaminados con una solución que transporte las sustancias problema a determinada zona y que se localice donde puedan ser eliminados. De esta manera las sustancias problema son extraídas del suelo y se hacen pasar por agua u otras soluciones acuosas mediante un sistema de inyección o infiltración (Ortiz Bernad et al., 2007).

El tipo de soluciones que se necesitan para el tratamiento depende de la sustancia problema que se encuentra en el suelo. Las soluciones de enjuague generalmente son algunos de los siguientes líquidos:

- I. Agua (sola)
- II. Agua con aditivos, como ácidos (pH bajo), bases (pH alto) o agentes tensoactivos (como detergentes)

El agua se emplea para tratar contaminantes que se disuelven fácilmente en el agua. La solución ácida es una mezcla de agua y ácido, por ejemplo, ácido nítrico o ácido clorhídrico, este tipo de soluciones se usan para extraer metales y contaminantes orgánicos, como los que se hallan en el reciclaje o en procesos de cromado industrial.

Una solución básica es una mezcla de agua y una base, como hidróxido de sodio. Las soluciones básicas se emplean para tratar fenoles y algunos metales. Un agente tensoactivo puede ser un detergente o un emulsor. Los emulsores facilitan la mezcla de sustancias que normalmente no se mezclan, como aceite y agua, por esto las soluciones tensoactivas son eficaces para retirar contaminantes oleosos (EPA, 1996)

4.4 Suelo

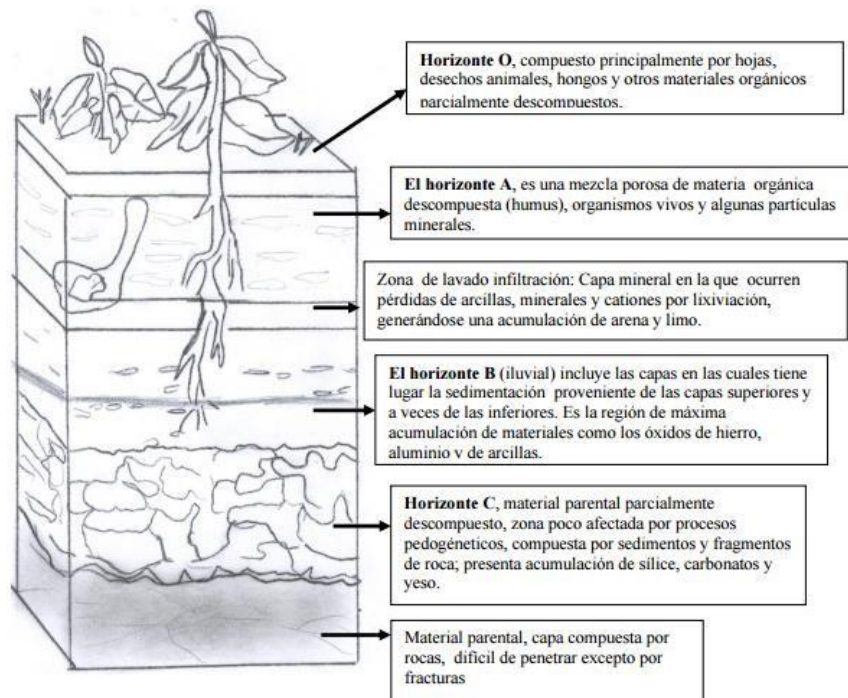
Según la FAO, el suelo se define como el medio natural para crecimiento de plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas.

El suelo está constituido por capas llamada horizontes, el arreglo de los horizontes en el suelo se denomina perfil edáfico. Los horizontes se definen como una capa de suelo aproximadamente paralelo a la superficie, con características producidas por los procesos de formación, la textura, el espesor, el color, la

naturaleza química y la sucesión de los diferentes horizontes que caracterizan el suelo y determinan su calidad (Huerta Cantera, 2010)

Los niveles que resultan de los procesos de formación de un suelo se clasifican en seis grupos u horizontes principales O, A, E, B, C, R, (Figura 5). La mayoría de los suelos desarrollados poseen al menos horizontes A, B, C, otros suelos no tan desarrollados carecen de estos horizontes (Huerta Cantera, 2010).

Figura 5. Esquema que muestra un perfil del suelo y los distintos horizontes que los conforman.



Fuente: (Huerta Cantera, 2010)

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo son muy importantes porque éstas permiten dar un diagnóstico de cómo se encuentra el suelo. Aunque

las propiedades del suelo pueden analizarse de manera aislada todas ellas están relacionada entre sí. Por ejemplo, las condiciones para el anclaje y la penetración de raíces que proporciona el suelo a la planta, se relaciona con el espacio poroso, que éste a su vez determinan otras propiedades como el drenaje y la aireación. Así mismo la degradación de una sola propiedad del suelo puede afectar a otras más, lo que conlleva a una degradación del suelo que al final se revierte en afectaciones a los rendimientos de los cultivos (López & Estrada, 2015)

4.4.1 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas permiten observar o medir sin alterar químicamente la composición del suelo y se relacionan con el movimiento del aire, calor, agua, raíces y nutrientes; entre ellas se encuentran la profundidad, textura, estructura, densidad aparente, densidad real, humedad, porosidad, color y temperatura.

De la profundidad del suelo se puede inferir el volumen del suelo que las raíces de las plantas tienen para anclarse y para obtener agua y nutrientes y está limitada por la presencia de roca continua dura (López & Estrada, 2015).

La textura del suelo se define como la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo. Las partículas de un suelo se clasifican en elementos gruesos (tamaño de diámetro superior de 2mm) y elementos finos (tamaño inferior a 2mm). Estos son los más utilizados para definir la textura de un suelo. Las siguientes son

las clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro (Gisbert, Ibañez, & Moreno, 2010). En la figura 6 se aprecia las clases de partículas presentes en el suelo.

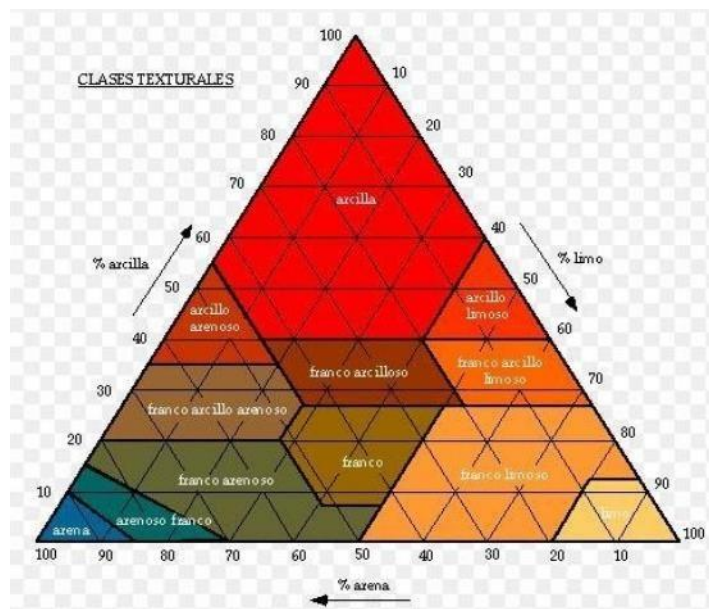
Figura 6. Clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro en el suelo

• Arena muy gruesa:	$2 \text{ mm} > \varnothing > 1 \text{ mm}$
• Arena gruesa:	$1 \text{ mm} > \varnothing > 0.5 \text{ mm}$
• Arena media	$0.5 \text{ mm} > \varnothing > 0.25 \text{ mm}$
• Arena fina	$0.25 \text{ mm} > \varnothing > 0.10 \text{ mm}$
• Arena muy fina	$0.10 \text{ mm} > \varnothing > 0.05 \text{ mm}$
• Limo	$0.05 \text{ mm} > \varnothing > 0.002 \text{ mm}$
• Arcilla	$\varnothing < 0.002 \text{ mm}$

Fuente: (Gisbert et al., 2010)

En la figura 7 se muestra el diagrama textural, que es una herramienta para obtener las clases texturales en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla.

Figura 7. Diagrama de textura



Fuente: (Rucks, 2004)

El triángulo se divide en una serie de áreas que corresponden a las diversas clases texturales, que representan grupos de texturas con aptitudes o propiedades análogas. Las clases suelen asociarse en cuatro grupos principales que corresponden a las texturas arcillosas, limosas, arenosas y francas o equilibradas; según exista un componente dominante o una proporción adecuada de todos ellos (Gisbert et al., 2010).

La humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua que posea el suelo y es una de sus características más específicas y está determinada, principalmente por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte que se le haga natural (lluvia) o artificial (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración (Jaramillo, 2002).

La porosidad del suelo es el espacio poroso del que pueden distinguirse macroporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de gravedad, y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, constituyendo así, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces. Los segundos son los que retienen agua, parte de la cual es disponible para las plantas. La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de macroporos y microporos. Las características del espacio poroso, dependen de la textura y la estructura del suelo (Jaramillo, 2002)

4.4.2 Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo son las que pueden observarse o medirse a partir de cambios químicos que ocurren en el suelo. Estas describen el comportamiento de los elementos, sustancias y componentes que integran el suelo. En este grupo de propiedades se encuentra el pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y elementos nutritivos

El pH en el suelo determina el grado de absorción de los iones H^+ por las partículas de suelo e indica si el suelo es alcalino o ácido. Esta propiedad es el indicador principal en la disponibilidad, movilidad, solubilidad y absorción de nutrientes para las plantas. El valor de pH en el suelo oscila entre 3,5 (muy ácido) a 9,5 (muy alcalino).

La capacidad de intercambio catiónico es un proceso reversible, estequiométrico y rápido mediante el cual la fase sólida retira y retiene algunos iones de la solución del suelo, al tiempo que le entrega cantidades equivalentes de otros, para establecer un nuevo equilibrio entre las dos fases. La cantidad de iones que pueden adsorber los coloides del suelo dependen de la cantidad de carga superficial que ellos y la fuerza con que son retenidos depende de la densidad de carga del coloide (Jaramillo, 2002).

La materia orgánica (MO) del suelo procede de los residuos vegetales y animales, puede ser en forma de desechos durante su ciclo de vida o sus tejidos después de muertos. La materia orgánica se encuentra en diferentes grados de descomposición y se distinguen dos fracciones, una lábil que resulta más rápida de digerir para los microorganismos, y por lo tanto tiene un plazo de permanencia más corto en el suelo, y la fracción recalcitrante o humus, es más estable, pues está compuesta de compuestos químicos complejo (ácidos húmicos, fúlvicos y huminas), por lo que su permanencia en el suelo es por un periodo más largo que el de la fracción lábil.

Los nutrientes del suelo al ser sustancias químicas permiten a las plantas su desarrollo y crecimiento. Cuando los nutrientes no logran ser los suficientes propicia que la planta no se desarrolle como debe, si no que sea propensa a enfermedades o a ataques de insectos (López & Estrada, 2015).

En la tabla 1 se presentan los macro y micronutrientes que deben estar presentes en un suelo.

Tabla 1. *Nutrientes del suelo.*

MACRONUTRIENTES	MICRONUTRIENTES
Carbono (C)	Hierro (Fe)
Hidrógeno (H)	Manganeso (Mn)
Oxígeno (O)	Boro (B)
Nitrógeno (N)	Molibdeno (Mo)
Fósforo (P)	Cobre (Cu)
Potasio (K)	Zinc (Zn)
Calcio (Ca)	Cloro (Cl)
Magnesio (Mg)	
Azufre (S)	

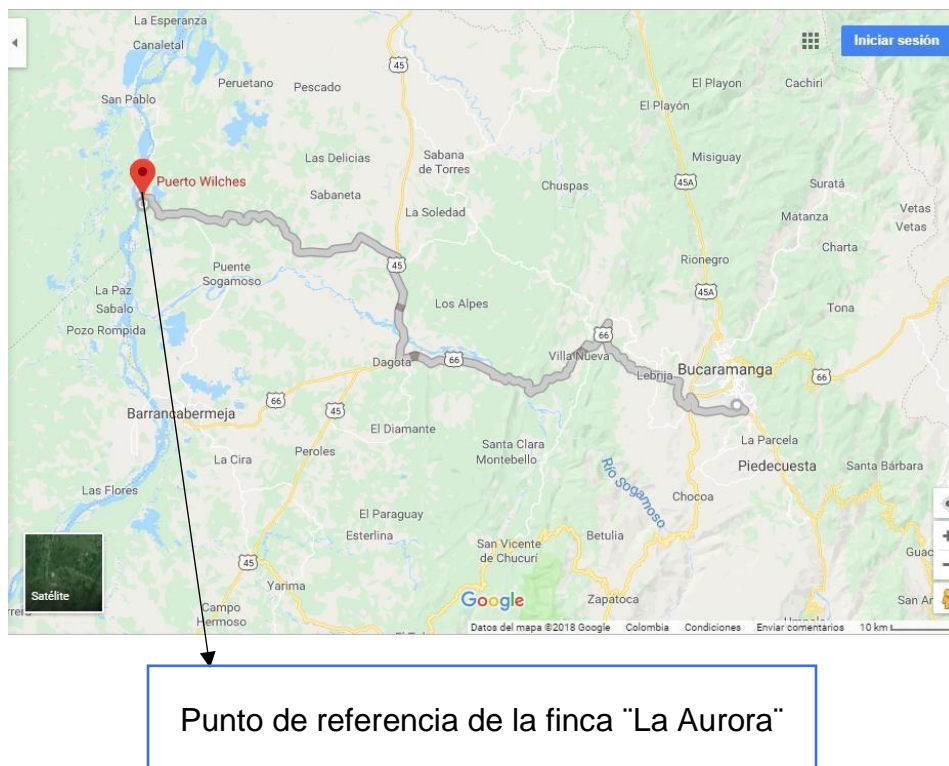
Fuente: Autor

5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se llevó a cabo una metodología donde se evaluó el porcentaje de retención de nanopartículas de plata en el suelo de palma de aceite, por medio de la técnica de electroremediación y flushing.

Las muestras de suelo se tomaron de la finca la Aurora (la cual es productora de aceite de palma africana), ubicada a $7^{\circ} 27' 679''$ N, $-73^{\circ} 667' 18''$ W en el municipio de Puerto Wilches, Santander. En la figura 8 se observa la ubicación de la finca.

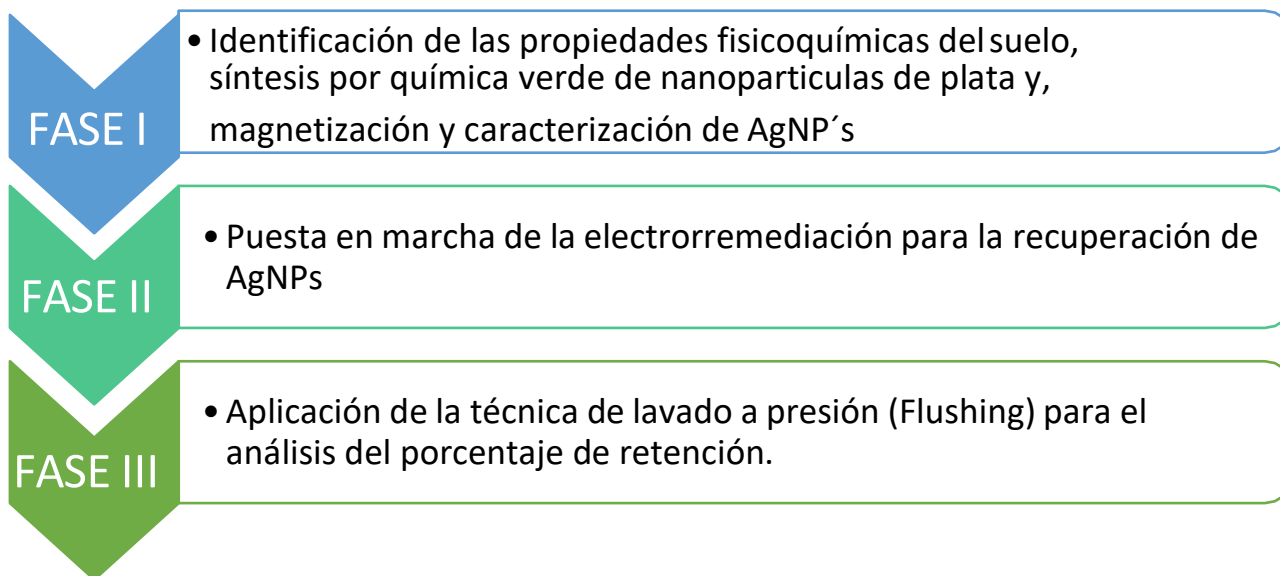
Figura 8. Ubicación Geográfica



Fuente: Google Maps

La figura 9 representa las fases que se siguieron para la metodología.

Figura 9. Fases metodológicas



Fuente: Autor

5.1 Identificación de las características fisicoquímicas del suelo de palma de aceite para la aplicación de nanopartículas de plata.

A partir de las muestras de suelo tomadas en la finca "La Aurora" del cultivo de palma de aceite, se caracterizó antes y después de aplicar las diferentes concentraciones de AgNPs. El muestreo que se realizó fue aleatorio simple por palma y en cada una se ubicaron los puntos cardinales y allí se tomaron muestras por triplicado. Luego se procedió a secar y tamizar las muestras para la determinación de las propiedades fisicoquímicas del suelo tales como: pH, conductividad, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y textura, que son vitales en el proceso de recuperación de las AgNPs.

Posteriormente se tomó una muestra como blanco y a las demás se les aplicó las distintas concentraciones de AgNPs (100, 200, 300, 400 y 500 ppm), los resultados obtenidos se compararon con el blanco para el respectivo análisis del cambio de las propiedades fisicoquímicas del suelo.

5.1.1 Caracterización del suelo de palma de aceite y el suelo con la sustancia problema AgNPs.

En la tabla 2 se presentan los procedimientos utilizados para cada uno de los parámetros fisicoquímicos analizados en suelo.

Tabla 2. *Procedimientos fisicoquímicos para caracterización del suelo*

Parámetro	Procedimiento
Textura	Método de Bouyoucos ASTM-152H
pH	Medición con potenciómetro en cloruro de potasio (KCl) y agua destilada – NTC 5264
Conductividad eléctrica	Conductímetro - NTC 5596
Humedad Gravimétrica	Humedad gravimétrica 48 horas después de inundado el suelo
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Cantidad de cationes en miliequivalentes por 100 gramos (meq/100g) de suelo secado al horno a 105°C - NTC 5268

Fuente: Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos, Universidad Pontificia Bolivariana 2009, Laboratorio de Análisis Químico de Agua Residuales, UPB

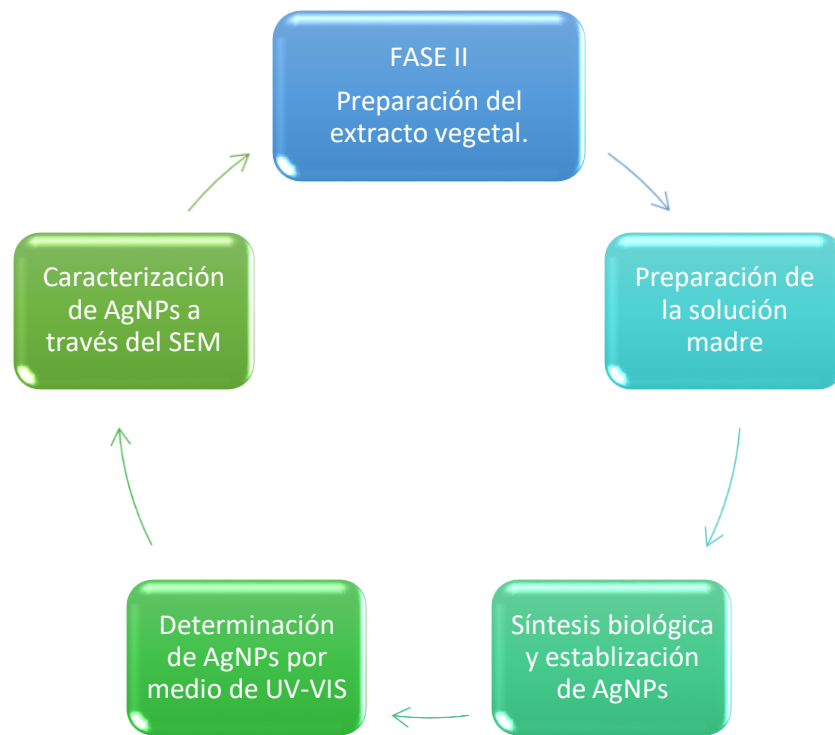
5.1.2 Síntesis de las nanopartículas de plata

La síntesis de nanopartículas de plata se llevó a cabo por química verde a partir de extractos de hojas de palma, esta alternativa de síntesis presenta varias

ventajas, tales como bajos costos y no genera residuos peligrosos, respecto a los métodos convencionales.

En la figura 10 se aprecia el proceso aplicado para síntesis y caracterización de las AgNPs.

Figura 10. Esquema experimental de la síntesis por química verde



Fuente: Autor

a) Preparación del extracto vegetal

El extracto vegetal se preparó calentando 1000 mL de agua destilada a 96°C, se pesaron 100 g de hoja de palma y se adicionó al recipiente estando el agua a

96°C, luego de adicionarlas, se bajó el recipiente de la plancha de calentamiento y se dejó bajar la temperatura hasta 60°C. Después se filtró el extracto, este filtrado se llevó de nuevo a calentar hasta que evaporó llegando a 200 mL, luego se esperó que el extracto se enfriara al ambiente para ser refrigerado.

b) Preparación o síntesis de nanopartículas de plata

Para la obtención de las nanopartículas se hizo por medio de la técnica de coprecipitación, se agregó en un beaker 10 mL de solución (1,7 g de AgNO_3 + 100 mL H_2O destilada), 90 mL de agua destilada y 10 mL del extracto vegetal (gota a gota) mientras se agitó durante 1 hora. Posteriormente, lo obtenido se llevó a la centrifuga durante 10 min a 4000 rpm. El sobrenadante se retiró y se le adicionó 5 mL de agua destilada y se llevó nuevamente a la centrífuga. Este proceso se repitió nuevamente alternando lavados con etanol, agua destilada y etanol.

5.1.3 Magnetización y caracterización de las nanopartículas de plata

a) Caracterización de las nanopartículas

Para la caracterización, se realizó por UV-VIS y por SEM. Donde las NPS sintetizadas se llevaron al ultrasonido para dispersar las nanopartículas y, posteriormente se pasó por el espectrofotómetro UV-VIS para comprobar que se obtuvieron las nanopartículas en la longitud de onda reportada en la literatura entre

los 350 y 500 nm. Luego se llevó al microscopio de barrido electrónico (SEM) para determinar la distribución de tamaño y morfología de estas.

b) Magnetización de NPs

La magnetización de AgNPs se realizó mediante una solución de 0,7 g de magnetita con 20 mL de Dimetil Sulfoxido (DMSO), luego se almacenó en un shaker por 19 h a 120 rpm. Cumplido el tiempo, la suspensión se llevó al ultrasonido por lapso de 2 h, al terminar se agregó 3 mL de tetra-etil-orto-silicato (TEOS) para colocarlo de nuevo en el shaker un tiempo de 48 h. Seguidamente se llevó la mezcla a la centrifuga, se hicieron 3 lavados (etanol, agua destilada, etanol), se colocaron en la centrifuga por 10 min a 4000 rpm, enseguida se llevó al horno a 40°C hasta evaporar el etanol. La ceniza que se obtuvo se le agregó 70,5 mL de DMSO y se pasó al ultrasonido por una hora y media, para agregar 0,3 g de AgNPs y almacenar en un shaker por 12 h. Por último, se centrifugó y se realizaron 3 lavados (etanol, agua destilada, etanol) por 10 min a 4000rpm y se secaron a 40°C en el horno hasta evaporar el etanol.

5.2 Determinación de la eficiencia de recuperación de nanopartículas de plata

En esta fase se estableció el prototipo del montaje, se determinó la distancia, los electrodos, voltajes y la concentración de AgNPs magnetizadas óptimas para el desarrollo del proyecto.

Para el prototipo del montaje de la técnica electrorremediación de AgNPs se emplearon reactores de acrílico cuyas dimensiones fueron 20 cm x 10 cm x 10 cm, con capacidad de almacenamiento de 2 Kg de suelo por cada reactor. Al suelo se le aplicaron concentraciones de 100, 200, 300, 400 y 500 ppm de AgNPs magnetizadas.

La técnica de aplicación fue por aspersión, las AgNPs fueron diluidas en 25 mL de agua destilada. La aspersión se hizo en la primera capa del suelo y se dejó actuando por 24 h, en este lapso las AgNPs fueron atraídas por los electrodos de bronce, hierro y cobre (los electrodos trabajaron en parejas y se hicieron combinaciones entre ellos).

Los electrodos tenían una dimensión de 8 cm x 15 cm, y un espesor de 6mm, además se suministraron diferentes voltajes (60, 70 y 80 V) durante 7 h, con el fin de obtener el voltaje que tuviera mayor eficiencia de remoción. Los electrolitos que se utilizaron fueron agua destilada y ácido acético al 5% para saturar el suelo a su límite de retención. En la tabla 3 se presenta las variables evaluadas en el proceso de la técnica de electrorremediación con sus respectivas cantidades utilizadas.

Tabla 3. Variables evaluadas para la técnica electroremediación

VARIABLES	CANTIDADES
Concentración nanopartículas (ppm)	100
Voltaje (V)	60
	70
	80
Distancia (cm)	5
	10
	15
Electrodos	Hierro - cobre
	Cobre - bronce
	Hierro - bronce
Electrolitos	Agua destilada
	Ácido acético al 5%

Fuente: Autor

En la figura 11 se observa el montaje que se realizó para la aplicación de la electroremediación. En el prototipo se utiliza una bomba peristáltica para pasar los electrolitos al suelo y así se humedezca con estos. En los reactores se encuentran los electrodos y las pinzas que pasan la corriente desde la fuente de poder.

Figura 11. Prototipo de electroremediación



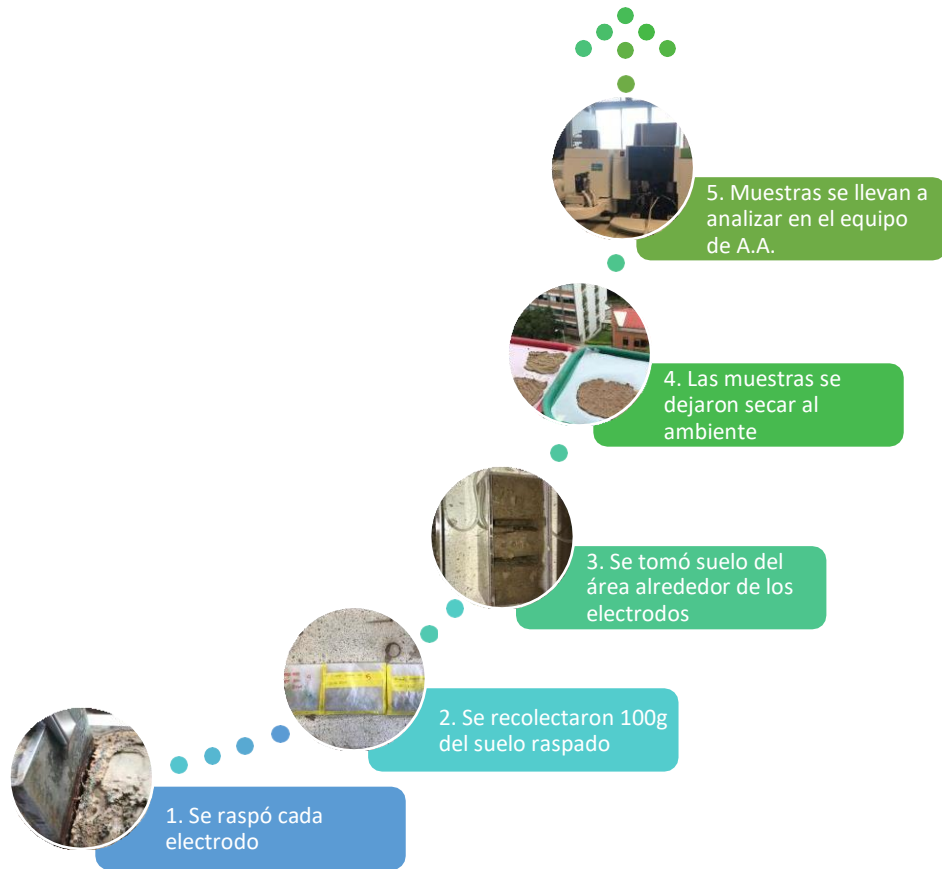
Fuente: Autor

A partir de las variables evaluadas, se realizó un primer experimento, utilizando la combinación de electrodos Hierro – bronce y aplicando un voltaje de 70V para una concentración de 100 ppm de AgNPs. Los electrodos se situaron a distancias de 5, 10 y 15 cm, con el fin de determinar la distancia ideal. En cuanto a la determinación de los electrodos y voltajes, se tuvo en cuenta los resultados previos de la distancia, así se pudo evaluar la mejor combinación de electrodos (hierro-cobre, cobre-bronce y hierro-bronce) para voltajes de 60, 70 y 80 V.

Con los resultados de distancia, voltaje y combinación de electrodos óptimos, se trabajaron concentraciones de 200 y 300 ppm de AgNPs por triplicado cada una, para realizar el respectivo análisis de retención de AgNPs en el suelo.

La figura 12 representa un esquema en el que se aprecia el paso a paso de cómo se tomó cada muestra para determinar la eficiencia de remoción al finalizar cada experimento de la electroremediación.

Figura 12. Esquema de recolección de muestra.



Fuente: Autor

5.3 Determinación del porcentaje de retención de nanopartículas de plata en el suelo de palma de aceite.

En esta fase se aplicó la técnica de flushing y se calculó el porcentaje de remoción de las nanopartículas y el de retención presente en el suelo.

5.3.1 Aplicación de la técnica de lavado a presión (flushing) para el análisis del porcentaje de retención de AgNP's

Después de aplicar la técnica de electroremediación, las muestras se llevaron a absorción atómica para determinar el % de retención de nanopartículas en el suelo.

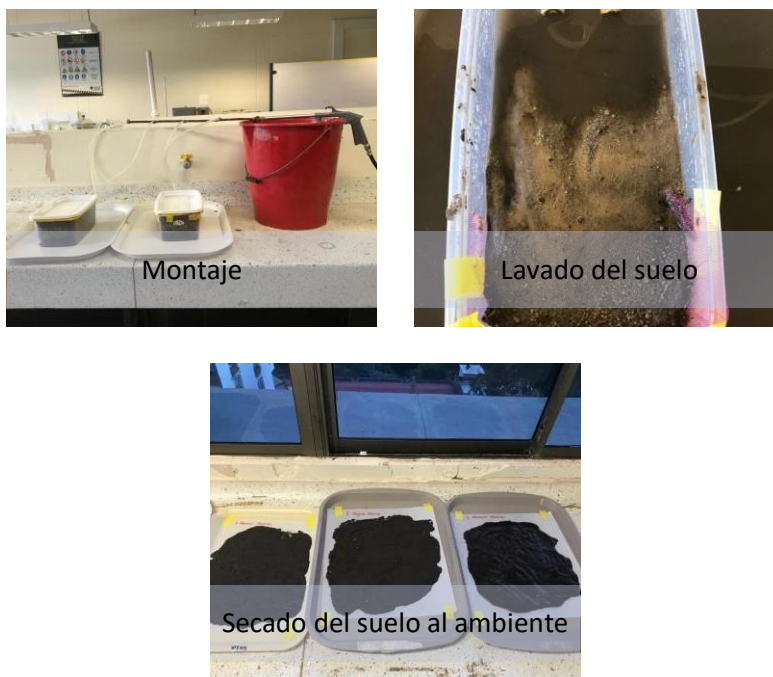
Posteriormente, al suelo se le aplicó la técnica de lavado a presión (flushing), que consistió en colocar el suelo en un recipiente plástico, cuyas dimensiones eran de 20 x 10 x 10 cm, allí se conectó un compresor que suministraba un flujo controlado de agua a una presión de 30psi (que de acuerdo con, Bohóquez, (2018) a esta presión se logra una mayor estabilidad en el flujo de agua), manteniendo un caudal de 4,62 mL/s, para un lavado con un volumen 1,5 L. Después se recolectó una muestra de suelo, la cual fue analizada por medio de absorción atómica en el laboratorio de estudios ambientales (LEA) de la UPB.

Para determinar el porcentaje de retención de AgNPs en el suelo se hizo por medio de una a espectroscopía de absorción atómica.

Una vez realizado el flushing, las muestras se dejaron secando 3 días a temperatura ambiente. Para el procedimiento de digestión, se pesaron 0,25 g de suelo seco, se agregaron 10 mL de HNO₃ y 5 mL de HCl y se llevó a calentamiento constante a 95°C hasta que hubo presencia de vapores blancos.

Después que la muestra se encontraba a temperatura ambiente, se adicionó 2 mL de agua acidulada y se dejó evaporar hasta obtener un volumen de 5 mL. La muestra se enfrió y se llevó a la bomba de vacío para filtrar el suelo. El filtrado se llevó a un balón de 100 mL que se aforó con agua destilada, para luego ser llevadas a Espectroscopía de Absorción Atómica. En la figura 13 se puede apreciar el montaje a escala de laboratorio de la técnica de lavado a presión (Flushing) y en la figura 14 se observa los recipientes empleados para contener el suelo con las AgNP's y realizar la aplicación de la técnica, se colocó tul para evitar la pérdida de suelo.

Figura 13. Montaje de lavado a presión (Flushing)



Fuente: Autor

Figura 14. Recipientes del suelo (Flushing)



Fuente: Autor

5.3.2 Cálculo del porcentaje de retención de AgNPs en el suelo

Para la determinación de porcentaje de retención de AgNPs se debe conocer la cantidad inicial de las AgNPs que se adiciona al suelo y el resultado de espectroscopia de absorción atómica que arroja el dato para realizar el cálculo del porcentaje de recuperación (% Recup), y de esta manera se realiza el porcentaje de retención de la siguiente manera:

$$\% \text{ Recup.} = \frac{X_{NP's} - X_{2NP's}}{X_{NP's}} \times 100$$

Donde:

X_{NP's}: concentración inicial de AgNPs aplicada al suelo

X_{2NP's}: concentración de AgNPs arrojada por absorción atómica

A partir de este, se obtiene el % de retención

$$\% \text{ Retención} = 1 - \% \text{ Recup.}$$

De esta manera obtenemos el porcentaje de retención de AgNPs en el suelo, si el porcentaje de retención es mínimo indica buena recuperación y eficiencia en el sistema.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la presente sección se dan a conocer los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas al suelo de palma de aceite antes y después de la aplicación de las nanopartículas de plata con el proceso de la combinación de las técnicas de descontaminación de suelos.

También se presentan los resultados de síntesis biológica, la identificación de nanopartículas de plata a través del espectrofotómetro ultravioleta visible y la caracterización por medio del microscopio de barrido electrónico.

Para evidenciar la efectividad de la combinación de las técnicas de descontaminación se analizaron por medio de absorción atómica.

6.1 Identificación de las características fisicoquímicas del suelo de palma de aceite para la aplicación de nanopartículas de plata.

En esta sección se encuentran los resultados de las pruebas fisicoquímicas analizadas al suelo. Entre estas se encuentran pH, conductividad eléctrica y CIC. Las pruebas fisicoquímicas se realizaron para una muestra antes de aplicar la biorremediación y luego de aplicada.

6.1.1 Caracterización del suelo de palma de aceite y el suelo con aplicación de la sustancia problema AgNPs.

Se presentan los resultados de la caracterización para los diferentes parámetros fisicoquímicos del suelo como textura, pH, conductividad eléctrica, entre otras.

a) Textura suelo de cultivo de palma

Al calcular el porcentaje de arenas, arcillas y limo, presentes en el suelo, se obtuvieron los resultados que se observan en las tablas 4 y 5:

Tabla 4. Textura muestra de suelo proveniente de cultivo de palma

Muestra	%Arena	%Arcilla	%Limo
A	84,08	13,03	2,89
B	84,17	13,01	2,82
C	83,36	12,58	3,06
Promedio	83,87	13,21	2,92

Fuente: Autor

En la tabla 4, se evidencia un porcentaje promedio de arena de 83,87%, arcilla 13,21% y limo 2,92%, los datos son llevados al triangulo de clase textural para determinar que es un suelo franco arenoso, lo cual se considera una textura ideal ya que es una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla; esto refleja el equilibrio entre permeabilidad del agua, nutrientes y buena retención de agua (López & Estrada, 2015). Cabe aclarar que el suelo no es compacto por su

predominancia de arenas.

Tabla 5. *Textura suelo después de electroremediación*

Muestra	%Arena	%Arcilla	%Limo
A	86,97	10,64	2,39
B	87,72	10,1	2,18
C	86,92	10,53	2,55
Promedio	87,20	10,42	2,37

Fuente: Autor

De acuerdo con el cuadro de textura, la muestra después de aplicado el tratamiento (tabla 5) tiene una textura moderadamente gruesa, lo que indica que es un suelo franco arenoso, debido que predominan más las arenas (87,20%), en comparación con las arcillas (10,42%) y limo (2,37%). La característica de un suelo franco arenoso es que tiene buena infiltración y aireación, existe un equilibrio entre permeabilidad del agua, nutrientes y retención de agua. Quiroga, (2016) afirma que la adición de nanopartículas al suelo conlleva a cambios significativos en la clase textural del suelo, lo que se demuestra en este trabajo, ya que como se observa en la tabla anterior, hubo un aumento en el porcentaje de arenas presente en el suelo.

b) pH del suelo

Para clasificar el suelo se tiene en cuenta el pH obtenido en KCl ya que el pH medido en agua es más variable que aquel que se mide en soluciones, razón por la cual se ha recomendado el mecanismo de hacer la suspensión de suelo en soluciones para estabilizar los valores de pH del suelo (Jaramillo, 2002).

En la tabla 6 se encuentran los resultados obtenidos de pH. En promedio, se obtuvo que el pH en agua fue de 4,24 y para en KCl, fue de 3,79 para el suelo sin tratar, lo que indica que es un suelo extremadamente ácido. Estos resultados indican que en el suelo predominan las formas de aluminio intercambiable del Al^{+3} , apreciable contenido y solubilidad de iones como H_3O^+ y de Mn^{2+} y altas probabilidades de que se presenten toxicidades con ellos; deficiencias de nitrógeno; contenido de bases intercambiables, contenido de molibdeno bajo, disponibilidad de fósforo puede ser muy baja, y otras condiciones restringentes para las plantas (Muskus, A., Quintero, C., 2009).

Tabla 6. Resultados pH del suelo antes y después de electroremediación

Muestra	Suelo inicial			Suelo después de electroremediación		
	ΔpH	H ₂ O	KCl	ΔpH	H ₂ O	KCl
A	-0,42	4,21	3,79	-0,24	5,33	5,09
B	-0,44	4,23	3,79	-0,18	5,25	5,07
C	-0,47	4,27	3,8	-0,18	5,24	5,06
Promedio	-0,44	4,24	3,79	-0,20	5,27	5,07

Fuente: Autor

Al aplicar la técnica de electroremediación, el pH del suelo aumentó un poco, obteniéndose un pH en agua de 5,27 y en KCl de 5,07, lo que indica que es un suelo fuertemente ácido y moderadamente ácido, respectivamente. De acuerdo con el manual de laboratorio de suelos, es un suelo mineral con formas de aluminio intercambiable $Al(OH)^{+2}$ y Al^{3+} ; no es significativo el contenido de H_3O^+ . El incremento en el pH se debe a que para el análisis después de electroremediación, se tomó una muestra compuesta entre el suelo donde se encontraba cada

electrolito. El pH del ácido acético es de 4,8, mientras que el agua destilada tiende a ser neutra con un pH de 7,2. Al combinarse estos dos pH, causa un incremento en el pH final de la muestra. Wan et al., (2019) concluyó que, con el aumento del tiempo de la remediación, el OH^- producido por la reacción de hidrólisis aumenta el valor de pH del electrolito del cátodo, y finalmente tiende a ser estable. Adicionalmente para De la rosa-Perez et al., (2007) el suelo tiende a acidificarse durante la electrorremediación, excepto cuando los electrodos están hechos de materiales reactivos, como los utilizados durante el experimento (hierro, cobre y bronce).

Con la diferencia entre el pH del agua y con KCl se obtuvo el ΔpH con un valor de -0,44 para el suelo antes del tratamiento, y -0,20 para el suelo tratado con electrorremediación, determinando en los dos casos la acidez del suelo y al obtener valores negativos, evidencia un buen intercambiador de cationes como son los H^+ o Al^{3+} los cuales dan la acidez en el suelo.

c) Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica se encarga de medir la cantidad de sales que se encuentra en el suelo, es decir que puede ser un suelo salino o no salino.

En la tabla 7 se encuentran los resultados para CE del suelo antes y después de aplicar electrorremediación. La conductividad eléctrica para el suelo inicial fue en

promedio 0,905 ds/m, lo que indica que no es un suelo salino ya que no hay suficientes sales solubles como para afectar a la germinación de las semillas, el crecimiento de las plantas o a la absorción de agua de estas.

Tabla 7. *CE antes y después de tratar el suelo*

Muestra	Conductividad Eléctrica (ds/m)	
	Suelo inicial	Suelo después de electroremediación
A	0,917	1,275
B	0,879	1,303
C	0,919	1,252
Promedio	0,905	1,277

Fuente: Autor

Para el suelo después de electroremediación, la conductividad eléctrica en promedio fue de 1,277 ds/m, lo que indica que es un suelo ligeramente salino, por lo que no afecta el crecimiento de las plantas. Al comparar el resultado con el obtenido para la muestra de suelo sin tratar, se analiza que al aplicar la electroremediación la conductividad del suelo se incrementa con el tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, así como por la solubilización de las especies iónicas como resultado de los cambios de pH (Acar & Alshawabkeh, 1996)

d) Humedad gravimétrica

En la tabla 8 se observan los resultados obtenidos para diferentes muestras de suelo. De acuerdo con estos, en promedio, en este suelo hay una humedad gravimétrica de 34,58%, que es la cantidad de agua disponible para las plantas.

Tabla 8. *Humedad gravimétrica.*

MUESTRA	CANTIDAD DE AGUA (mL)	PESO MACETA (g)	SUELO SECO (g)	SUELO HÚMEDO (g)	PESO TOTAL (g)	%HG
A	500	54,5	1108,9	1508,1	1453,5	34,39
B	540	34,2	1204,8	1660,7	1625,8	33,21
C	575	72,5	1421,1	1934,0	1861,5	30,88
D	600	28,0	1166,6	1592,3	1564,3	38,35
E	600	51,1	1175,8	1687,3	1636,2	36,67
F	540	61,9	1134,9	1651,1	1589,2	33,97
Promedio						34,58

Fuente: Autor

e) Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

En la tabla 9 se presentan los resultados de CIC para un suelo antes de ser tratado y posterior al tratamiento de electroremediación.

Tabla 9. *CIC antes y después de tratar el suelo*

Muestra	CIC (meq/100 g)	
	Suelo inicial	Suelo después de electroremediación
A	4,5	5,6
B	4,3	5,0
C	4,0	5,6
Promedio	4,3	5,4

Fuente: Autor

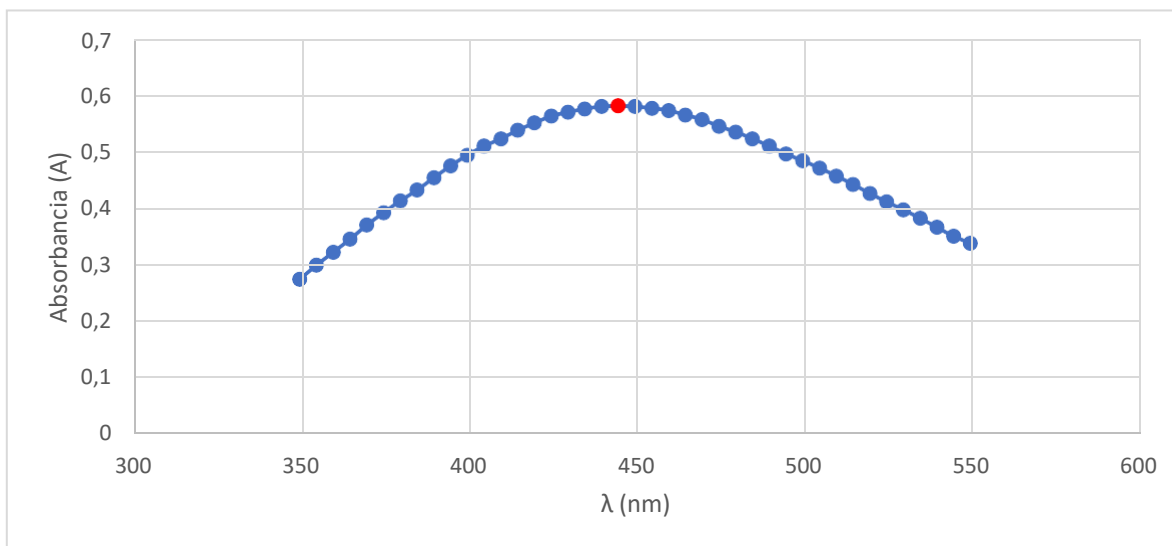
Los resultados promedio de CIC fueron de 4,3 para el suelo antes de aplicar electroremediación y 5,4 meq/100 g para el suelo después de aplicada la técnica, siendo una CIC baja, (menor del rango 10 meq/100 g). Esto concuerda con los resultados obtenidos en la textura y pH, ya que para un suelo franco arenoso y con pH ácido se espera que la CIC sea baja debido a la poca disponibilidad de nutrientes

y bases existentes y, la alta concentración de Al.

6.1.2 Síntesis de las nanopartículas de plata

La técnica de espectroscopía UV-visible permitió definir si en el proceso de síntesis se habían formado nanopartículas de Plata, presentando una longitud de onda de 445 nm y una absorbancia de 0,594, lo cual se confirmó ya que según Cardeño & Londoño (2014) las AgNPs se forman en un rango de longitud de onda de 400 – 450 nm como se observa en la figura 15.

Figura 15. Determinación de nanopartículas de plata con espectrofotometría UV- visible

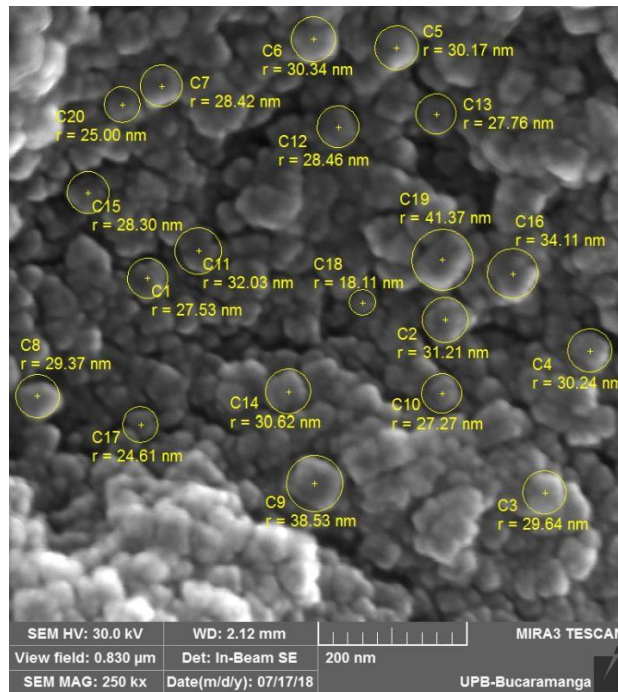


Fuente: Autor

6.1.3 Magnetización y caracterización de las nanopartículas de plata

En la figura 16 se evidencian las nanopartículas de plata observadas en el microscopio electrónico de barrido. Se aprecia que el diámetro de estas varía entre 24,61 nm y 41,37 nm.

Figura 16. Microscopia Electrónica de Barrido de AgNP's a 250.000X



Fuente: Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología UPB seccional Bucaramanga

6.2 Determinación de la eficiencia de remoción de nanopartículas de plata aplicadas en un suelo de palma de aceite mediante el pretratamiento con electrorremediación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para determinar la distancia, combinación de electrodos, voltaje y concentración que tuvo mayor eficiencia de recuperación de las AgNPs.

6.2.1 Determinación de la distancia de electrodos

Una vez realizado el proceso de absorción Atómica, se procedió a calcular los porcentajes de remoción de nanopartículas de plata por la técnica de electrorremediación (ver tabla 10). En la absorción atómica se obtuvieron valores desde 0,013 mg/kg hasta 0,098 mg/kg de nanopartículas. En promedio, para una distancia de 5 cm entre cada electrodo, se logró una recuperación del 2,82%. Para una distancia de 10 cm, se obtuvo una recuperación del 3,75% y para una distancia de 15 cm, se obtuvo una recuperación del 1,07%. Analizando los resultados, se determinó que la mejor distancia es la de 10 cm entre electrodos.

Existen características fisicoquímicas que infieren en el proceso de migración de las nanopartículas de plata hacia los electrodos, una vez analizado el suelo de cultivo de palma africana, se pudo especificar que es necesario que la textura del suelo sea franco (40% arena, 40% limo y 20% arcilla) para incrementar la superficie de contacto con los electrodos.

Tabla 10. Comparación % Recuperación por distancias entre electrodos.

Posición toma de muestra	Distancia (cm)	Extracción Abs. Atómica (mg/kg)	% Retención	% Recuperación
Anterior	5	0,079	93,65	6,35
	5	0,015	98,8	1,2
	5	0,011	99,1	0,9
Promedio		0,04	97,18	2,82
Medio	10	0,03	97,61	2,39
	10	0,098	92,71	7,83
	10	0,013	98,96	1,04
Promedio		0,05	96,43	3,75
Posterior	15	0,013	98,96	1,04
	15	0,014	98,89	1,11
	15	0,013	98,93	1,07
Promedio		0,013	98,927	1,07

Fuente: Autor

6.2.2 Determinación de los electrodos y voltajes

Una vez obtenida la mejor distancia entre electrodos, se procedió a determinar el voltaje óptimo. De acuerdo con el análisis realizado en el laboratorio, para las tres muestras por cada voltaje se obtuvieron los siguientes resultados para la combinación cobre-bronce de 60, 70 y 80 Voltios y una distancia de 10 cm, como se evidencia en la tabla 11. Se observa que el mejor resultado es el de 85,07% de recuperación de nanopartículas de plata a un voltaje de 60 Voltios.

Tabla 11. Combinación de electrodos Cobre-bronce

Voltaje	Prom. Abs. Atómica (mg/kg)	[NPsAg] (mg/kg)	% Retención	% Recuperación
60 v	1,063	1,25	14,93	85,07
70 v	0,500	1,25	60,00	40,00
80 v	0,467	1,25	62,67	37,33

Fuente: Autor

En la tabla 12 se evidencia que para la combinación Hierro-cobre, el mejor resultado es el de 34,13% de recuperación con un voltaje de 60 Voltios. También se observa que esta combinación no fue efectiva para un voltaje de 80V ya que el porcentaje de recuperación fue de 0%.

Tabla 12. *Combinación de electrodos Hierro-Cobre*

Voltaje	Prom. Abs. Atómica (mg/kg)	[NPsAg] (mg/kg)	% Retención	% Recuperación
60 v	0,427	1,25	65,87	34,13
70 v	0,133	1,25	89,33	10,67
80 v	0,000	1,25	100,00	0,00

Fuente: Autor

La tabla 13 muestra que para el Hierro bronce, el mejor resultado es el de 35,60% de recuperación para un voltaje de 60 Voltios y, similar que en la combinación hierro-cobre, el voltaje de 80V no obtuvo ninguna recuperación.

Tabla 13. *Combinación de electrodos Hierro-Bronce*

Voltaje	Prom. Abs. Atómica (mg/kg)	[NPsAg] (mg/kg)	% Retención	% Remoción
60 v	0,445	1,25	64,40	35,60
70 v	0,167	1,25	86,67	13,33
80 v	0,000	1,25	100,00	0,00

Fuente: Autor

De acuerdo a los resultados, el mejor voltaje para trabajar cualquiera de los elementos químicos es el de 60 Voltios.

Comparando los resultados obtenidos para cada una de las variables, de acuerdo con la combinación de electrodos utilizada, se determinó que la mejor

combinación es la de cobre-bronce, pues fue la que obtuvo resultados óptimos (85,07% de recuperación de NPs) para una distancia de 10 cm entre ellos y un voltaje de 60V (ver tabla 14)

Tabla 14. Comparación de las condiciones óptimas por combinación de electrodos

Electrodos	Distancia (cm)	Voltaje (V)	% Recuperación
Cobre – Bronce	10	60	85,07
Hierro – Cobre	10	60	34,13
Hierro - Bronce	10	60	35,6

Fuente: Autor

6.2.3 Determinación de la recuperación de nanopartículas de plata después de electrorremediación

Para el voltaje y distancia entre electrodos ya elegidos anteriormente, se analizó el % de recuperación para diferentes concentraciones (tabla 15).

Tabla 15. Comparación de la concentración óptima de AgNPs

Voltaje	[NPsAg] (ppm)	[NPsAg] (mg/kg)	Prom. Abs. Atómica (mg/kg)	% Retención	% Recuperación
60 v	100	1,25	1,063	14,93	85,07
60 v	200	2,50	1,407	43,73	56,27
60 v	300	3,75	0,547	85,42	14,58
60 v	400	5,00	1,497	70,07	29,93
60 v	500	6,25	1,510	75,84	24,16

Fuente: Autor

La mejor concentración para la aplicación de la electrorremediación fue de 100 ppm de nanopartículas de plata, ya que logró una recuperación del 85,07%. Al

comparar los resultados obtenidos, se encontró que, a mayor concentración, menor es el % de recuperación de nanopartículas. Esto puede deberse al corto tiempo que se le aplicó la electrorremediación, ya que en la literatura se encuentran tiempos de aplicación desde 24h (Hernández E, 2017) hasta 3000h (Acar & Alshawabkeh, 1996).

6.3 Determinación del porcentaje de retención de nanopartículas de plata en el suelo de palma de aceite, a través del post-tratamiento con la técnica de lavado a presión.

En esta sección se presenta los resultados obtenidos después de la electrorremediación y posterior a la aplicación de Flushing y la efectiva de las técnicas utilizadas.

6.3.1 Aplicación de la técnica de lavado a presión (flushing) para el análisis del porcentaje de retención de AgNP's

Una vez determinada la recuperación obtenida en la técnica de electrorremediación, se procedió a analizar las muestras mediante el lavado de Flushing, el cual consistió en inundar los suelos que contenían la sustancia problema AgNPs con una solución que transporte las sustancias problema o contaminantes, para luego recuperar los mismos del suelo.

6.3.2 Cálculo del porcentaje de retención de AgNPs en el suelo

Para calcular el porcentaje de retención de AgNPs en el flushing, se tuvo en cuenta el resultado obtenido de la absorción atómica posterior a la electroremediación.

Tabla 16. Resultados de absorción atómica con el post-tratamiento lavado a presión (flushing)

[NPsAg] inicial (ppm)	[NPsAg] inicial (mg/kg)	Abs. Atómica Electroremediación (mg/kg)	Abs. Atómica Flushing (mg/kg)	% Recuperación Flushing	% Retención Flushing	% Recuperación Total	% Retención total
200	2,5	1,407	0,436	69,01	30,99	82,56	17,44

Fuente: Autor

Como se observa en la tabla 16, después de la electroremediación, se obtuvo una concentración de 1,407 mg/kg de nanopartículas en el suelo. Posterior a la aplicación del flushing, se volvió a calcular la cantidad de nanopartículas presentes en el suelo y se encontró una concentración de 0,436 mg/kg. Con el flushing se obtuvo una recuperación del 69,01%, lo que indica que, como técnica individual, fue efectiva para la descontaminación del suelo. Finalmente, para la combinación de las dos técnicas (electroremediación y flushing) se obtuvo una recuperación total de nanopartículas del 82,56% lo que indica que la aplicación de las técnicas combinadas fue efectiva.

La retención durante el flushing puede presentarse porque el único agente que se empleó para realizar el lavado fue agua del grifo, esto nos indica que se debe emplear un agente adicional o con mayor capacidad de capturar o encapsular las nanopartículas con el fin de ser recuperadas.

En la tabla 17 se observa que el % de recuperación de nanopartículas obtenido en la combinación de las técnicas fue comparado con el proyecto presentado por Ebratth (2019) en el que solo fue aplicado la técnica de electroremediación al suelo, conservando las condiciones óptimas que se establecieron anteriormente (par de electrodos cobre-bronce, 60V, distancia entre electrodos de 10 cm).

Tabla 17. Comparación efectividad de técnicas

Técnica de recuperación de AgNPs	% Recuperación AgNPs
Electroremediación (Ebratth, 2019)	22,45
Electroremediación + Flushing (Márquez, 2019)	82,56

Fuente: Autor

Al analizar estos resultados se determinó que hubo una mayor efectividad para la remoción de las nanopartículas en la combinación de las técnicas de electroremediación y flushing, ya que en el presente estudio se obtuvo una mejoría en la recuperación de nanopartículas del 60%, por encima de lo obtenido por Ebratth, aplicando solo electroremediación.

7. CONCLUSIONES

- El suelo muestreado en la finca La Aurora, presentó una textura franco-arenosa, con mayor predominancia de arenas (84,08%). En cuanto al pH, el suelo se considera que tiene un pH fuertemente ácido (3,79), por lo que predominan las formas de aluminio intercambiable (Al^{+3}) en este. La conductividad eléctrica fue de 0,905 ds/m, lo que establece que no es un suelo salino, por lo que no afecta el crecimiento de las plantas. La humedad gravimétrica fue de 34,58% y la CIC de 4,27 meq/100 g. Estos resultados son acordes a la textura y pH del suelo, ya que para un suelo franco arenoso y con pH ácido se espera que la CIC sea baja debido a la poca disponibilidad de nutrientes y bases existentes y, la alta concentración de Al.
- Las condiciones óptimas para la electrorremediación fue la combinación de electrodos de cobre – bronce, separados entre sí a una distancia de 10 cm, aplicando un voltaje de 60 V durante 7 h, para una concentración de 100 ppm de AgNPs. Con estas condiciones, se logró obtener una recuperación del 85,07% de nanopartículas, lo que indica que la electrorremediación sí fue eficiente.
- La retención de nanopartículas de plata, para un suelo con una concentración de 200 ppm fue de 17,44%, lo que indica que la combinación de las técnicas fue efectiva, aunque aún se tuvo una alta retención, esto pudo ocurrir porque

no se utilizó un agente que pudiera encapsular o atraer las nanopartículas para aumentar la recuperación de estas.

- Al evaluar la recuperación de nanopartículas de plata aplicada en un suelo proveniente de un cultivo de palma de aceite, mediante la combinación de las técnicas de electrorremediación-lavado a presión, a escala de laboratorio, se determinó que la combinación de las técnicas de electrorremediación y flushing tuvieron una recuperación del 82,56% lo que indica que las técnicas fueron efectivas.
- Al comparar la recuperación de AgNPs reportada por Ebratth en un estudio previo (en el cual obtuvo una recuperación del 22,45% de NPs aplicando electrorremediación) con lo obtenido en este proyecto, se determinó que la combinación de las técnicas tuvo una recuperación de AgNPs por encima del 60%, de la obtenida en el estudio anterior.

8. RECOMENDACIONES

Para que el proceso de electroremediación sea más efectivo se recomienda encapsular las nanopartículas de plata o funcionalizar con agentes polares y no polares que ayuden al proceso de electroremediación.

Para la aplicación de la técnica de flushing, calcular el % de nanopartículas presentes en el agua que quedó como residuo, para tener este resultado en cuenta. Adicionalmente, realizar un tratamiento posterior a este residuo para remover la totalidad de las nanopartículas.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acar, Y. B., & Alshwabkeh, A. N. (1996). Electrokinetic Remediation. I: Pilot-Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(3), 173–185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:3\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:3(173))
- Ávalos, A. (2013). Nanopartículas de plata: aplicaciones y riesgos tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 7(2), 1–23.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (2005). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica en los sustratos para plantas. *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca*, 1–5. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-012370420-7/50029-0>
- Bohóquez, A. 2018. (2018). *Evaluación del porcentaje de recuperación de nanopartículas de plata en suelos de cultivo de palma de aceite, utilizando la técnica de lavado flushing.*
- Cardeño, L., & Londoño, M. E. (2014). *Síntesis verde de nanopartículas de plata mediante el uso del ajo (Allium sativum).* 129–140.
- Cardoso, P. C. (2016). Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud. *Artículo Especial Rev. Hosp. Niños (B. Aires)*, 58(260), 19–28. Retrieved from <http://revistapediatria.com.ar/wp-content/uploads/2016/04/260-Nanopartículas-de-plata.pdf>
- Carrillo González, R. (2009). La nanotecnología en la agricultura y rehabilitación de suelos contaminados. *Mundo Nano*, 2(2), 14.

- Cecchin, I., Reddy, K. R., Thomé, A., Tessaro, E. F., & Schnaid, F. (2016). Nanobioremediation: Integration of nanoparticles and bioremediation for sustainable remediation of chlorinated organic contaminants in soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.027>
- De la Rosa-Perez, D. A., Teutli-León, M. M. M., & Ramírez-Islas, M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 23(3), 129–138.
- Ebratth, Y. (2019). *Mejorar la remoción de nanopartículas de Plata aplicadas en un suelo de palma africana utilizando la técnica de electrorremediación*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Gálvez Pérez, V., Gózalo, C. T., Leite, P. E. C., Pereira, M. R., Granjeiro, J. M., Alkilany, A. M., ... Howard, C. V. (2015). Toxicología de las nanopartículas. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 33(4), 2313–2333. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.09.001>
- Gisbert, J. M., Ibañez, S., & Moreno, H. (2010). *La textura del suelo*. (9). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/50839531_La_textura_del_suelo?enrichId=rgreq-a6bc27cfd36b1b96bea3c3233d2166cb-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzUwODM5NTMxO0FTOjEwNDU4MzcyMDM0MTUwNUAxNDIxOTQ2MTEwMTcy&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf
- González Pérez, C. (n.d.). Espectrofotometría de absorción atómica. Retrieved November 26, 2019, from <http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/analisis->

aplicado-a-la-ingenieria-quimica/contenidos/course_files/Tema_5.pdf

Hernández E, B. J. (2017). *Evaluación de la técnica electrorremediación en el potencial de remoción de nanopartículas de plata, aplicadas a suelos contaminados del sector palmicultor.*

Huerta Cantera, H. E. (2010). *Determinación De Propiedades Físicas Y Químicas De Suelos Con Mercurio En La Región De San Joaquín, Qro., Y Su Relación Con El Crecimiento Bacteriano.* Retrieved from <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/tesisHilda1101.pdf>

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia,* 619. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Karn, B., Kuiken, T., & Otto, M. (2009). Nanotechnology and in situ remediation: A review of the benefits and potential risks. *Environmental Health Perspectives*, 117(12), 1823–1831. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900793>

López, M., & Estrada, H. (2015). Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los suelos. *Bioagrobiencias*, 8, 15–26.

Molins, R. (2008). Oportunidades y amenazas de la nanotecnología. *Comunic4*, 38–53. Retrieved from ricardo.molins@iica.int

Naranjo, A. (2015). *Determinación de la aplicabilidad de la propiedad antimicrobial de las nanopartículas de oro sintetizadas con extractos frutales provenientes del departamento de Bolívar.* Universidad Pontificia Bolivariana.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro.* Retrieved November 23, 2019, from <http://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1126977/>

Ortiz Bernad, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernández, S. (2007).

Técnicas de recuperación de suelos contaminados. ... *Universidad de Alcalá.*

Dirección General de ..., 109. Retrieved from

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+reucperaci?n+de+suelos+contaminados#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+recuperaci?n+de+suelos+c+ontaminados%230>

Poveda, C. M. (2015). *Evaluación del efecto tóxico de las nanopartículas de plata*

de las propiedades físico-químicas y microbiales de un suelo arcilloso.

Universidad Pontificia Bolivariana.

Quiroga, J. (2016). *Evaluación del efecto antimicrobial de las nanopartículas de*

plata aplicadas en un suelo del sector palmicultor del departamento de

Santander - Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana.

Rucks, L. (2004). Propiedades Físicas del Suelo. *República, Universidad D E L A.*

Salumina, L. B. 2018. (2018). *Facultad de ingeniería escuela profesional de*

ingeniería ambiental.

Sergio, G. (2016). *Síntesis de nanoparticulas de platino por metodos quimicos y*

biologicos soportadas en hueso bovino y su evaluacion en su actividad catalitica

en la reacción 2-butino-1-4-diol a 2-buteno-1-4-diol.

Tratnyek, P. G., & Johnson, R. L. (2006). Nanotechnologies for environmental

cleanup. *Nano Today*, 1(2), 44–48. [https://doi.org/10.1016/S1748-](https://doi.org/10.1016/S1748-0132(06)70048-2)

[0132\(06\)70048-2](https://doi.org/10.1016/S1748-0132(06)70048-2)

Wan, Y., Zhai, J., Wang, A., Han, H., Shen, M., & Wen, X. (2019). Environmental

research on remediation of cd-contaminated soil by electrokinetic remediation.

Ekoloji, 28(107), 873–881.