



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

UNIDAD SALTILLO

**SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y
ENERGÍA**

**“Evaluación del efecto del tratamiento electroquímico
sobre la respiración basal del suelo para su potencial
aplicación en la remoción de contaminantes del suelo
agrícola”**

T E S I S

Que presenta

Juan Fernando Méndez Vázquez

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

EN

**SUSTENTABILIDAD DE LOS RECURSOS NATURALES Y
ENERGÍA**

Directoras de la Tesis:

**Dra. Dulce Yaahid Flores Rentería
Dra. Padmasree Karinjilottu Padmadas**

Ramos Arizpe, Coahuila

MAYO, 2022

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada para poder realizar la tesis de maestría. De la misma manera agradezco al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo, por facilitar la infraestructura y reactivos necesarios durante esta investigación; además de propiciar las condiciones de salubridad y control de acceso a los laboratorios para salvaguardar y sobrellevar el confinamiento por el COVID-19.

A la Doctora Dulce Yaahid Flores Rentería y a la Doctora Padmasree Karinjilottu Padmadas, que fungieron no solo como directoras de mi tesis, sino que con su guía, paciencia, comprensión y facilidad de transmitir el conocimiento práctico y teórico, aprendí a manipular los equipos y a realizar las diversas técnicas de medición y control durante el proyecto.

A mi comité de investigación por sus acertados comentarios, observaciones, aportaciones y ayudarme a ver los distintos ángulos y alcances del proyecto.

Al gran amor de mi vida, mi cielo y estrellas que me impulsaron a seguir adelante y a mi familia por su apoyo incondicional, gracias por creer en mí.

Gracias Dios por permitirme concluir una meta que parecía inalcanzable, por cuidarme y guiarme durante todo el camino, gracias por darme la posibilidad de ignorar menos, escuchar más y aprender a conocerme. Gracias por demostrarme que aún hay personas de buen corazón y con la disponibilidad de ayudar, ya sea con una plática, compartiendo una comida o con una simple sonrisa.

Por último, gracias al Universo por otorgarme la energía y la sabiduría para reconocer las señales y seguir mi camino.

Gracias por todo

Contenido

Índice de Tablas.....	iii
Índice de Figuras	iv
Glosario	vii
Acrónimos	ix
Resumen	x
Abstract	xi
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	3
2.1 Contaminación de suelos agrícolas.....	3
2.2 El suelo	4
2.3 Indicadores de la calidad del suelo.....	5
2.3.1 Textura y densidad aparente del suelo.....	6
2.3.2 Conductividad eléctrica del suelo	7
2.3.3 Capacidad de intercambio catiónico.....	7
2.3.4 pH.....	8
2.3.5 Respiración del suelo	9
2.4 Tratamientos para la remoción de contaminantes del suelo.....	10
2.5 Tratamiento electroquímico del suelo (TEQ).....	12
2.5.1 Mecanismos de remoción.....	13
2.5.2 Potencial de hidrógeno (pH) durante el TEQ.....	13
2.5.3 Material y configuración de los electrodos.....	17
2.5.4 Electrolito.....	17
2.5.5 Compositos de barreras permeables y selectivas.....	18
2.5.6 Efecto del campo electromagnético sobre los microorganismos.....	19
3. Justificación	21
4. Hipótesis	21
5. Objetivos.....	22
5.1 General.....	22
5.2 Particulares	22
6. Metodología.....	22

6.1	Ubicación del sitio de estudio y muestreo del suelo.....	22
6.2	Caracterización fisicoquímica del suelo.....	23
6.3	Construcción de porta electrodo.....	25
6.4	Celdas de tratamiento.....	27
6.5	Incubación de las muestras.....	28
6.6	Tratamiento Electroquímico (TEQ).....	29
6.7	Actividad biológica del suelo.....	30
6.8	Diseño experimental.....	32
6.9	Análisis estadístico.....	36
7.	Resultados y discusión.....	37
7.1	Caracterización fisicoquímica.....	37
7.2	Efecto del tratamiento electroquímico sobre la actividad biológica del suelo.....	38
7.3	Efecto del tratamiento electroquímico sobre el pH y la conductividad eléctrica.....	42
8.	Conclusiones.....	48
9.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	49
10.	Bibliografía.....	50

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación y características de los suelos salinos [51]	7
Tabla 2. Clasificación de los suelos de acuerdo a su nivel de pH, SEMARNAT 2002 [54].	8
Tabla 3. Características, ventajas y desventajas de diversas técnicas de tratamiento del suelo....	11
Tabla 4. Problemáticas, soluciones y efectos que pueden presentarse en el tratamiento electroquímico.....	16
Tabla 5. Características y efecto biológico durante el TEQ de diversos contaminantes, modificada de [117].	20
Tabla 6. Propiedades de la zeolita clinoptilolita. Caracterizada por el Laboratorio de Servicios Profesionales “Ing. Severo G. Flores Lira” en la Universidad Autónoma de Nuevo León, 2016.	27
Tabla 7. Composición química de los electrodos, la matriz es de titanio con aleación de vanadio y aluminio.	30
Tabla 8. Composición y concentración del electrolito.	30
Tabla 9. Diseño de experimentos para evaluar la respiración basal durante la aplicación del TEQ con agua y electrolito como soluciones electrolíticas con inversión de polaridad cada 3, 6 y 9 horas.	32
Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del suelo agrícola antes de la aplicación de TEQ. Los valores corresponden a la media \pm error estándar.....	37
Tabla 11. Composición química del suelo agrícola antes del TEQ.....	38
Tabla 12. Comparación del suelo agrícola con los valores umbrales para determinar la capacidad buffer de acuerdo con Bennardi y colaboradores [142]......	42

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso simplificado del TEQ, las especies se mueven de acuerdo con la carga que presenten. Modificado de [80].	12
Figura 2. Procesos electrocinéticos de transporte de carga y fluidos en los poros del suelo; (1) Doble capa eléctrica, (2) Capa de difusión, (3) electromigración de cationes, (4) flujo electroosmótico, (5) electroforesis de micelas o coloides y (6) electromigración de aniones.	13
Figura 3. Movimiento del frente ácido (1, amarillo) proveniente del ánodo y un frente básico (3, violeta) que surge del cátodo durante una prueba para la remoción de Zinc, después de 11.3 horas se genera la zona de transición, frenando el avance del frente ácido y por ende la remoción de los contaminantes. El suelo sin tratar se encuentra en la región central de la celda de tratamiento (2, marrón) [81].	14
Figura 4. Ubicación de la Hacienda San Isidro de Gómez en el municipio de General Cepeda, Coahuila de Zaragoza, México. Fuente: Google Maps 2021.	22
Figura 5. Sitio de muestreo de suelo, con puntos de recolección aleatorios.	23
Figura 6. Diagrama textural USDA [128].	25
Figura 7. En (1) Tubo de PVC con un diámetro interno de 2 cm, (2) muestra el corte de 14.5 cm para conformar el cuerpo del porta-electrodo, (3) se aprecia la red trazada a 0.5 cm de distancia entre cada punto y en (4) el producto terminado con perforaciones de 1, 1.5 y 3 milímetros.	26
Figura 8. Componentes del porta-electrodo (1), en donde A es la tapa superior con un orificio para el electrodo, B es el papel filtro, C es la tapa inferior, D son adaptadores para las tapas, E es la zeolita clinoptilolita, F el cuerpo del porta electrodo y G es el electrodo de titanio. Porta-electrodo ensamblado, con papel filtro entre el cuerpo y la zeolita (2).	26
Figura 9. Dimensiones de las subceldas de tratamiento, (A) divisor de polipropileno, (C1, C2 y C3) son las subceldas de tratamiento.	27
Figura 10. En (1) se muestran las charolas en donde se llevó a cabo el proceso de incubación con las distintas soluciones electrolíticas (agua y electrolito) y en (2) se aprecia la micro estación WatchDog sobre la charola central.	28
Figura 11. Micro estación meteorológica, data logger 1000, WatchDog, Spectrum technologies, que midió la temperatura y humedad ambiental durante la incubación y el TEQ.	28
Figura 12. Colocación y distancia entre los electrodos durante el TEQ.	29
Figura 13. Esquema del funcionamiento del EGM-5, [Fuente, Manual de operación EGM-5]. ...	31
Figura 14. (A) Analizador de gases infrarrojo EGM-5 [PP systems TM], (B) cámara de respiración del suelo SRC-2 y (C) sensor de humedad y temperatura Hydra Probe II [Stevens Water Monitoring Systems, Inc]. [Fuente, Manual de operación EGM-5].	31
Figura 15. Arreglo del sistema para el TEQ. En la parte superior izquierda aparece la bomba automática, la fuente de poder, el sistema de riego de la solución electrolítica y los electrodos.	32
Figura 16. (1) Se llenaron las subceldas con 5 kilogramos de suelo, (2) subcelda C ₂ llenada a la mitad de su capacidad con suelo y (3) subcelda C ₁ con los 5 kilogramos y lista para comenzar con el riego de la solución electrolítica.	34

Figura 17. Subceldas de tratamiento C ₁ , C ₂ y C ₃ , el suelo está en proceso de ser incorporado para dar inicio al proceso de incubación.....	34
Figura 18. (A) Sistema para el TEQ antes del periodo de incubación: (1) Tanque de solución electrolítica, (2) bomba automática, (3) porta-electrodos, (4) sistema de riego y (5) porta-electrodo con línea de riego. (B) Se ha comenzado el riego, observando problemas de infiltración y dificultades para la homogenización de la humedad.....	34
Figura 19. Usando una pipeta graduada se adiciona solución electrolítica dentro del porta-electrodo, mojando la zeolita hasta saturarla y logrando que el nivel de líquido llegue a cubrirla.	35
Figura 20. Identificación de los puntos de muestreo para las determinaciones de pH y CE; estos puntos son los mismos para las 3 subceldas.	35
Figura 21. Registro de la respiración basal antes y después del TEQ mediante cámara de respiración SRC-2 acoplada al EGM-5.....	35
Figura 22. Registro de la temperatura y porcentaje de humedad en el suelo, antes y después del TEQ mediante la sonda Hydra Probe II acoplada al EGM-5.....	36
Figura 23. Monitoreo de la RB, temperatura y % de humedad del suelo durante los periodos de incubación.	36
Figura 24. La RB en la fase de sequía está representada por la barra blanca, el efecto Birch durante la incubación con agua (barra gris claro) y con electrolito (barra gris oscuro). Las barras indican datos promedio de la respiración basal de las 3 subceldas y las barras de error estándar.	39
Figura 25. Respiración basal (RB) del suelo asociada al tipo de electrolito durante el periodo de incubación. El electrolito está representado por las barras gris oscuro y las gris claro representan el agua. Se presentan datos promedio y error estándar. Las letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre el tipo solución electrolítica durante el periodo de incubación, de acuerdo con la prueba de Tukey del ANOVA ($p < 0.05$).	39
Figura 26. Promedios de la respiración basal (RB) durante el periodo de incubación (1) usando agua como solución electrolítica y (2) con electrolito. Las letras minúsculas iguales indican ausencia de diferencias significativas para la RB entre los días de tratamiento.....	40
Figura 27. Promedios de la RB observados durante el TEQ con agua (1) y con electrolito (2), las letras minúsculas iguales indican que no existen diferencias significativas durante los sesiones de tratamiento; también se muestran las barras de error estándar.....	41
Figura 28. Influencia del TEQ sobre el pH. Las barras de color gris claro representan la fase de incubación y TEQ con agua como solución electrolítica y las de gris oscuro al uso de electrolito. Las barras de error son el error estándar, las letras minúsculas distintas señalan una variación significativa entre la solución electrolítica empleada en los distintos tratamientos. Se presentan los datos promedio y error estándar. Las letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre el tipo de tratamiento con la misma solución electrolítica, de acuerdo con la prueba de Tukey del ANOVA ($p < 0.05$).	43
Figura 29. Influencia del TEQ sobre la CE. Las barras de color gris claro representan la fase de incubación y TEQ con agua como solución electrolítica y las de gris oscuro al electrolito. Las barras de error son el error estándar, las letras minúsculas distintas señalan una variación significativa entre la solución electrolítica empleada en los distintos tratamientos. Se presentan	

los datos promedio y error estándar. Las letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre el tipo de tratamiento con la misma solución electrolítica, de acuerdo con la prueba de Tukey del ANOVA ($p < 0.05$).....43

Figura 30. El pH está representado por la línea discontinua y con triángulos como marcadores y la CE es la línea continua con círculos, estos valores fueron registrados durante periodo de incubación con agua.....44

Figura 31. El pH está representado por la línea discontinua con marcadores triangulares y la CE es la línea continua con círculos, valores registrados durante el periodo de incubación con electrolito.45

Figura 32. El pH está representado por la línea discontinua con marcadores en triangulo y la CE por la línea continua con círculos, estos valores fueron recopilados durante el TEQ con agua.46

Figura 33. El pH está representado por la línea discontinua con marcadores triangulares y la CE con la línea continua y círculos; estos valores fueron recopilados durante el TEQ con electrolito.46

Glosario

Adsorción: proceso de adhesión de moléculas, átomos o iones de un gas, líquido o sólido disuelto a una superficie; no existe transferencia de masa sino que se crea una capa superficial sobre el adsorbente.

Agente complejante: sustancia química con la capacidad de formar enlaces sencillos con otros compuestos, formando un complejo que normalmente es más soluble.

Agregados del suelo: unión de partículas del suelo como resultado de diversos procesos químicos, biológicos y físicos que promueven la formación de estructuras pequeñas mediante la interacción del exudado de las raíces, la materia orgánica y la actividad microbiana; los agregados son empleados como indicadores de la funcionalidad del suelo pues contribuyen a la infiltración del agua y reducen los efectos de la erosión al proporcionar una mayor estabilidad a las estructuras del suelo.

Antropósfera: también conocida como tecnosfera, es la parte del medio ambiente que los humanos han modificado para desarrollar sus actividades; considera la masa total de sistemas y materiales generados por la humanidad así como las interacciones que tiene con las demás esferas de la tierra.

Curvas de crecimiento microbiológico: consiste de las siguientes etapas; 1) adaptación: los microorganismos maduran y se aclimatan al medio; 2) exponencial: comienza la duplicación celular y se mantiene un ritmo constante hasta que ocurran alteraciones en el medio; 3) estacionaria: la tasa de crecimiento disminuye al agotarse la disponibilidad de nutrientes y la acumulación de productos tóxicos y se caracteriza por tener un número constante de individuos (la tasa de crecimiento se iguala a la tasa de muerte) y 4) declive: las bacterias se quedan sin nutrientes y mueren.

Edáfico: que pertenece al suelo o está relacionado con él, en lo que respecta a su composición química y a la vida de las plantas que crecen en él.

Escorrentía: corriente de agua de lluvia que circula sobre la superficie del suelo cuando rebasa el nivel de un depósito natural o aliviadero, o supera la capacidad de evaporación o infiltración.

Eutrofización: proceso degradativo de la calidad del ecosistema debido al incremento en la tasa de suministro de nutrientes por causas naturales o antropogénicas que perjudica el desarrollo de los cultivos.

Fauna edáfica: son los organismos que habitan en la hojarasca y el suelo, de acuerdo con su tamaño se clasifican en: **mesofauna:** invertebrados que viven en los poros del suelo y miden entre

0.1 y 2 mm como los colémbolos y ácaros; **macrofauna**: incluye a los invertebrados que miden más de 2 mm como las hormigas, lombrices de tierra y los ciempiés; **microbiota**: son organismos que solo pueden ser observados mediante microscopios como las bacterias, hongos y protozoarios.

Floculación: es un proceso químico de agregación de partículas en donde un gran número de partículas pequeñas llamadas coloides se aglutinan y forman coágulos que pueden ser retirados del medio mediante filtración o decantación.

Meteorización: descomposición de rocas y minerales por procesos físicos, químicos y/o biológicos que dan origen a los suelos.

Mineralización del carbono orgánico: se refiere al proceso de transformación de la materia orgánica a compuestos inorgánicos por organismos degradadores (bacterias y hongos) y como resultado se produce CO₂ por los organismos heterótrofos del suelo.

Organismos autótrofos: que genera su propio alimento. Las plantas y las algas son el ejemplo más claro de estos, pues mediante la fotosíntesis obtienen la energía necesaria para completar sus procesos metabólicos.

Organismos heterótrofos: no pueden formar su propio alimento así que obtienen nutrientes mediante la digestión de alimento, incorporando sustancias y transformándolas en moléculas orgánicas mediante el proceso de nutrición que incluye la ingestión, digestión, absorción, circulación, metabolismos y excreción.

Osmolitos: compuestos orgánicos presentes en las células que ayudan a regular el ingreso de agua a la membrana para mantener el volumen celular.

Polución: degradación del suelo por la presencia de una sustancia adversa en el medio, como los agroquímicos, derrames de hidrocarburos o desechos industriales.

Respiración del suelo: el aporte de CO₂ del suelo a la atmósfera se da mediante la respiración de las raíces de las plantas (**respiración autótrofa**) y mayoritariamente por los micro y macroorganismos del suelo (**respiración heterótrofa**).

Respiración basal: mide la emisión de CO₂ por parte de las comunidades microbianas debido a la mineralización de la materia orgánica bajo condiciones controladas en un laboratorio.

Rizósfera: ecosistema en el que interactúan los microorganismos y las raíces de las plantas; se extiende desde la superficie de las raíces hasta 3 mm al interior del suelo.

Salinización/alcalinización: incremento de la concentración de sales en la superficie del suelo causado por la intrusión de agua marina, riego inapropiado y exceso de fertilizantes químicos.

Servicios ambientales o ecosistémicos: constituyen todos aquellos beneficios que la población obtiene de los ecosistemas.

Suelo agrícola: es aquel que tiene las características físicas, químicas y biológicas (pH, textura y conductividad eléctrica) para propiciar el desarrollo de los cultivos y plantaciones, debe ser fértil, con disponibilidad de nutrientes y materia orgánica

Sustrato: (biología) superficie en la que una planta o un animal vive; parte del biotopo donde determinados seres vivos realizan sus funciones vitales.

Valor umbral: valor más bajo que puede generar un efecto determinado.

Acrónimos

CE: conductividad eléctrica

CIC: capacidad de intercambio catiónico

pH: potencial de hidrógeno

TEQ: tratamiento electroquímico

RB: respiración basal

SSSA: Soil Science Society of America

ICS: indicadores de la calidad del suelo

Resumen

El tratamiento electroquímico del suelo (TEQ) es una técnica de remediación que basa su funcionamiento en la generación de un campo eléctrico al aplicar un gradiente de potencial eléctrico entre dos electrodos introducidos en el suelo para remover una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Los fenómenos de transporte que predominan durante el TEQ son la electroósmosis (movimiento del líquido presente en el suelo), la electromigración de las especies cargadas (aniones y cationes), la electroforesis de las partículas coloidales y la electrólisis del agua. Durante esta última se liberan iones OH^- dando lugar a un frente básico y un frente ácido generado por los protones H^+ .

Por un lado, estos frentes contribuyen a la electromigración de los contaminantes; pero por otro, alteran los niveles de pH en el suelo alcanzando valores de 1 en la zona anódica y hasta 12 en la zona catódica; este salto de pH tiene efectos negativos sobre la funcionalidad del suelo puesto que disminuye la actividad biológica del suelo.

Algunas técnicas para el control del pH incluyen el acondicionamiento de la solución electrolítica, la presencia de barreras selectivas y la inversión periódica de la polaridad en los electrodos. Así pues, en este proyecto de investigación, se propuso aplicar el TEQ con dichas técnicas de control a un suelo agrícola de la región sureste del estado de Coahuila de Zaragoza, México, evaluando los efectos del TEQ sobre la actividad biológica del suelo, determinada mediante la respiración basal (RB), midiendo además el pH y la conductividad eléctrica (CE) del suelo.

Durante el periodo de incubación (sin estímulo eléctrico) con ambas soluciones electrolíticas (agua y solución acondicionada, a partir de ahora nombrada electrolito) se reportó un valor de RB de $0.9 \pm 0.02 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. En contraste, al aplicar el TEQ, se observó un incremento del 30% al usar el electrolito ($0.44 \pm 0.02 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$) en comparación con el agua (0.31 ± 0.01).

Los niveles de pH durante el TEQ al usar agua fueron de 8.15 ± 0.02 y cuando se usó el electrolito fue de 8.24 ± 0.02 ; la CE fue inversamente proporcional al pH, pues a mayor pH menor CE (pH de 7.8 = $956 \mu\text{S/cm}$, pH de 8.2 = $520 \mu\text{S/cm}$ y pH de 8.4 = $388 \mu\text{S/cm}$).

Concluyendo que el tipo de solución electrolítica tiene efectos sobre el pH y la conductividad eléctrica, además de que el estímulo eléctrico promueve la actividad biológica.

Abstract

The electrochemical soil treatment (ECT) is a remediation technique that removes a variety of organic and inorganic pollutants, producing an electric field due to the application of an electric potential gradient between two electrodes inserted into the subsurface of the soil.

The main transport phenomena during the ECT are electroosmosis (which implies the movement of the liquid present in the soil), electromigration of charged species (anions and cations), electrophoresis of colloidal particles and the electrolysis of water. During the electrolysis OH^- ions are released promoting a basic front and an acidic front generated by the protons H^+ .

On one side, these fronts contribute to the electromigration of pollutants, but on the other they modify the pH levels in the soil, reaching values of 1 in the anodic zone and up to 12 in the cathodic one, this pH jump has a negative effect on soil functionality, decreasing its biological activity.

Some pH control techniques include conditioning the electrolyte solution, use of selective barriers and periodic polarity reversal. Thus, in this research project it was applied the ECT with these control techniques to an agricultural soil in the southeast region of Coahuila de Zaragoza, México, evaluating the effects of the ECT on soil's biological activity measured by basal respiration (BR), also the soil pH levels and electrical conductivity (EC) where measured.

During the incubation period (without electrical stimulation) a BR of $0.9 \pm 0.02 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ was reported for both electrolytic solutions (water and conditioned solution, from now on called electrolyte). In contrast, when the ECT was applied the RB increased by 30% when using electrolyte ($0.44 \pm 0.02 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$) compared with water (0.31 ± 0.01).

pH levels during ECT with water were 8.15 ± 0.02 and 8.24 ± 0.02 with the electrolyte, the EC was proportionally inverse to pH, since the higher the pH, the lower the EC (pH of 7.8 = 956 $\mu\text{S/cm}$, pH of 8.2 = 520 $\mu\text{S/cm}$ and pH of 8.4 = 388 $\mu\text{S/cm}$).

Concluding that the electrolytic solution has effect on the pH and EC, in addition the electrical stimulus promotes biological activity.

1. Introducción

Desde finales del siglo XIX, la diversidad y cantidad de contaminantes que han sido liberados al ambiente a causa de las actividades humanas (industriales, urbanas y agrícolas) han significado un problema debido al riesgo que representan para la salud pública, así como al deterioro de los ecosistemas naturales y la antropósfera [1]. Ante esta problemática se inició una búsqueda de tratamientos innovadores y sustentables para la remoción de contaminantes del suelo, pues éste es el destino final y reservorio de la mayoría de los contaminantes; la presencia de éstos altera la capacidad del suelo de proporcionar múltiples servicios ecosistémicos [2].

En muchas ocasiones los tratamientos de remoción de contaminantes alteran las propiedades del suelo a tal grado que resultan perjudiciales para su funcionalidad (por ejemplo: el lavado/enjuague de suelos, la cementación y la vitrificación por plasma térmico) [3–5].

La pérdida de la funcionalidad del suelo puede verse reflejada en la alteración de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, cantidad de biomasa microbiana, respiración del suelo, etc.), que sirven como indicadores de la calidad y la salud del suelo [6,7]. El Comité para la Salud del Suelo de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA por sus siglas en inglés) define a la calidad del suelo como la capacidad que tiene para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de cultivos y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y el agua, favorecer la salud humana y el hábitat [8].

Es de vital importancia mantener la funcionalidad del suelo para los sistemas productivos y el equilibrio de los ecosistemas, pues no solo se obtienen recursos y alimentos de él, si no que existen interacciones complejas que involucran el ciclado de nutrientes y la regulación del flujo de contaminantes. De ahí la relevancia de buscar tratamientos de remoción que puedan mantener o incluso mejorar la funcionalidad del suelo.

Así surge como alternativa el tratamiento electroquímico del suelo (TEQ) con perturbaciones mínimas a la superficie, capaz de remover diversos contaminantes en los distintos estratos del suelo (pesticidas, hidrocarburos, metales pesados y radionúclidos [9–12]) e incluso, mejorar sus propiedades mecánicas [13–17].

El principio del TEQ se basa en la aplicación de un campo eléctrico de corriente continua a baja intensidad a través de un medio poroso (como el suelo) entre electrodos distribuidos en éste [18]. Durante el TEQ los contaminantes son transportados hacia los electrodos mediante la

electromigración (movimiento de los aniones y cationes hacia los electrodos con carga opuesta) y la electroósmosis (transporte del líquido por los poros del suelo arrastrando partículas con él) [2].

Con la oxidación del agua, llevada a cabo en el ánodo, se liberan iones H^+ que son atraídos hacia el cátodo dando lugar a un frente ácido que disuelve los contaminantes que han precipitado y los adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo; por otro lado, la reducción del agua en el cátodo genera iones OH^- creando así un frente básico que precipita los contaminantes y entorpece la remediación. Estos frentes influyen en el transporte de los contaminantes y modifican los niveles de pH en el suelo y alteran sus propiedades físicas, químicas y biológicas [19].

Otros factores que influyen sobre el TEQ son:

- Textura y composición del suelo: teniendo mayor tasa de remoción en los suelos con baja conductividad hidráulica, teóricamente la remediación es más rápida en arenas y gravas que en limos y arcillas [20].
- Porcentaje de humedad del suelo: se ha reportado que el porcentaje óptimo es del 50%, obteniendo el doble de la tasa de remoción en comparación con el 35% [21].
- Tipo de compuesto contaminante: los efectos nocivos de los contaminantes dependen del tiempo y frecuencia de exposición así como de la concentración, su distribución y las sinergias que presenten con otros compuestos contaminantes [22].
- Acondicionamiento de la solución electrolítica: la presencia de agentes quelantes, estabilizadores y oxidantes promueven la movilidad de los compuestos y controlan los cambios en los niveles de pH, también se ha favorecido la actividad biológica al incluir nutrientes [23–29].
- Material, cantidad y configuración de los electrodos: por lo general estos dependen del presupuesto económico y de la potencia eléctrica que suministra la fuente de poder; en cuanto al material se busca que sean químicamente inertes y resistentes a la corrosión; para la cantidad y configuración puede ser de forma simple (un par de electrodos por celda) o compuesta (más de 2 electrodos), en forma vertical u horizontal [2,18].

Diversos estudios revelan que, bajo condiciones específicas existe un desarrollo de la vegetación en el suelo tratado con TEQ [29–31]. Sin embargo, los efectos del TEQ sobre los microorganismos del suelo y su funcionalidad no han sido explorados a profundidad. El principal objetivo del presente trabajo es determinar el efecto del TEQ sobre la calidad y funcionalidad del suelo, diferenciando los efectos del estímulo eléctrico y la selección de la solución electrolítica.

2. Antecedentes

2.1 Contaminación de suelos agrícolas

Las áreas agrícolas son de gran importancia económica global, pues según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (mejor conocida como la FAO) se dedican cerca de 1 500 millones de hectáreas (ha) a esta actividad (11% de la superficie mundial). Sin embargo, las actividades humanas (como la expansión demográfica y los patrones insostenibles de producción y consumo) han causado su degradación paulatina [32,33].

Al respecto, en el año 2016, la FAO reportó que cerca del 33% de los suelos en el mundo tienen una degradación alta o moderada (495 millones de ha) y pronostica que de mantenerse los patrones de producción intensivos para el 2050 se tenga una pérdida anual de 4.5 millones de ha (0.9%) [34].

En México, para el año 2011, el INEGI reportó que se dedicaron cerca de 39 millones de ha a las actividades agropecuarias (24 para la agricultura y 15 para pastizales). Por otro lado, el mismo organismo informó que el 44.9% del territorio nacional está afectado por algún tipo de degradación (88 millones de ha) [35].

En concreto, la degradación química en México ocupa el 1^{er} lugar en extensión con 35.8 millones de ha (18.3% del territorio nacional) de éstas el 0.6% es afectada por la eutrofización, el 3.2% por salinización/alcalinización, el 3.5% por polución y en el 92.7% se tiene una disminución de la fertilidad [35]. En Coahuila de Zaragoza, el INEGI reportó en el 2002, que la superficie afectada por la degradación hídrica y eólica alcanzó las 2.7 millones de ha (17.8%) mientras que 411 mil ha presentan degradación química y física (2.7%) [36].

La degradación del suelo ya sea por causas naturales o por las actividades antropogénicas, es un proceso que reduce la capacidad actual y potencial de éste para producir cualitativa y cuantitativamente bienes y servicios; se puede dividir en:

- Hídrica y eólica: los suelos erosionados hídricamente representan un 26.5% del total de los suelos degradados en México y son ocasionados principalmente por los manejos inapropiados de las tierras lo que produce escorrentías y escurrimientos. Por otro lado, la erosión eólica representa un 21.1% del territorio nacional y es causada esencialmente por la falta de cobertura vegetal, deficiencia de humedad o falta de barreras cortavientos generando el desplazamiento del material del suelo.

- Física y química: la degradación física (12.6% de los suelos degradados en México) es ocasionada por la disminución de la cobertura vegetal generada por el sobrepastoreo, así como la compactación por su pisada, de igual manera el suelo se compacta por el tránsito frecuente de maquinaria. La degradación química (39.7% de los suelos degradados en México) ocasiona el detrimento de la fertilidad y la materia orgánica, como consecuencia el rendimiento de los cultivos se ve reducido lo que conlleva al uso excesivo de fertilizantes y al desequilibrio de la cadena trófica del suelo [37].

La degradación química del suelo se entiende como la alteración de las propiedades químicas por la introducción de sustancias ajenas a los componentes inherentes al suelo o en caso de que la concentración de estos incremente por causas naturales o antropogénicas, lo que provoca a corto plazo la disminución de la productividad, pero a largo plazo lleva sin remedio alguno a la desertificación [38].

Las principales causas de la degradación química y disminución de la fertilidad en México son el cambio de uso de suelo (de forestal a agropecuario) y la reducción de la cobertura vegetal, pues al no existir un aporte de nutrientes por parte de la vegetación y la materia orgánica, se recurre a la adición de fertilizantes para satisfacer las demandas nutricionales de los cultivos [39]. Sin embargo, los cultivos han resultado más susceptibles a las plagas y enfermedades por la alteración de sus ciclos vegetativos, siendo necesaria la aplicación de sustancias químicas que ayuden a controlar estos inconvenientes, contaminando todavía más al ecosistema [40].

Si bien en el presente trabajo no se abordó el potencial de remoción de contaminantes por el TEQ, se estudió el efecto de éste sobre la funcionalidad y la calidad del suelo.

2.2 El suelo

Según la SSSA, el suelo es la capa de material fértil que recubre la superficie de la Tierra, sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas; es una matriz física, dinámica y compleja que presenta una gran heterogeneidad con variaciones de pH, porcentaje de materia orgánica, textura y composición fisicoquímica de acuerdo con los factores que le dieron origen (roca madre, eventos climatológicos, topografía, cubiertas vegetales y el tiempo de erosión) [41].

El suelo se considera como un recurso natural, finito y no renovable puesto que su proceso de formación es complejo y lento en la escala de tiempo humana, en él influyen factores ambientales que reducen el tamaño de las partículas de la roca madre (material parietal). Estas partículas interaccionan con el agua, el oxígeno, el dióxido de carbono y otros compuestos orgánicos que alteran su composición química. El componente biológico del suelo, está integrado por la macrofauna (invertebrados), la mesofauna (artrópodos, nemátodos, moluscos y anélidos) y la microbiota (bacterias y hongos), que en conjunto se encargan de degradar la materia orgánica del suelo, contribuyendo al ciclado de nutrientes [40–43]. El suelo presta numerosos servicios ecosistémicos, entre ellos:

- Hábitat: en un gramo de suelo se encuentran millones de microorganismos que llevan a cabo la mineralización de la materia orgánica, mediante estos procesos los nutrientes quedan disponibles para ser aprovechados por los organismos que medran en el suelo.
- Regulación de inundaciones: por cada metro cúbico de suelo se almacenan hasta 600 litros de agua permitiendo el crecimiento de los cultivos durante la época de sequías.
- Purificación del agua y reducción de contaminantes del suelo: la elevada superficie de contacto que ofrecen las partículas de suelo, aunada a sus cargas eléctricas propicia que se lleven a cabo las reacciones químicas y los procesos metabólicos de los microorganismos para reducir la toxicidad de los compuestos contaminantes disueltos y adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo.
- Ciclado de nutrientes: en él se llevan a cabo los ciclos biogeoquímicos de diversos elementos (C, N, P, K, Ca, Mn, etc.)

Aunado a lo anterior, la calidad de la alimentación de una población está ligada a la calidad de los suelos y se ha señalado que la gestión inadecuada y la contaminación del recurso conllevarán a la degradación de millones de hectáreas alrededor del mundo, propiciando la pérdida de la biodiversidad y los ecosistemas [34].

2.3 Indicadores de la calidad del suelo

Un suelo fértil se define como aquel que tiene la capacidad de almacenar y suministrar los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y que al conservar sus

propiedades físicas, químicas y biológicas mantiene el potencial de atenuar los contaminantes presentes en él [44].

Por consiguiente, estas propiedades medibles se utilizan como indicadores de la calidad del suelo y exploran sus características a nivel físico (textura, porosidad, capacidad de retención de agua, densidad aparente, etc.), químico (pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico y disponibilidad de nutrientes, etc.) y biológico (actividad y diversidad de la biomasa microbiana del suelo) [45–47].

Las características físicas de los suelos se determinan por la composición de la fracción mineral de éste. Esta fracción mineral define las propiedades mecánicas de un determinado suelo como la plasticidad (da soporte ante deformaciones rápidas sin rebote elástico, sin modificar el volumen o agrietarse), la permeabilidad (movilidad de un fluido en la matriz sólida por unidad de tiempo), la resistencia (oposición a la deformación de la partícula por unidad de área) y la compresibilidad (capacidad de deformarse sin perder las propiedades originales por unidad de área) [48].

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, éstas hacen referencia a las condiciones químicas que intervienen en la relación suelo-planta, la capacidad amortiguadora o buffer, la calidad y la disponibilidad de los nutrientes. En esta investigación se consideraron la conductividad eléctrica (CE, que de acuerdo con García y colaboradores es una propiedad química [8]), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH, pues son las que se alteran durante el TEQ [47].

2.3.1 Textura y densidad aparente del suelo

La fracción mineral del suelo es clasificada de acuerdo con el porcentaje y tamaño de las partículas sólidas presentes en él; las arcillas y limos tienen un diámetro menor a 0.05 mm, las arenas entre 0.05 y 2 mm y las mayores a 2 mm son conocidas como gravas. De esta forma, se utiliza el porcentaje de cada partícula para determinar la clase textural del suelo y estimar ciertos atributos como la capacidad de retención del agua, la capacidad productiva, el comportamiento mecánico, la velocidad de infiltración y la densidad aparente [48,50,51].

La densidad aparente del suelo es el peso por unidad de volumen expresada en $[g/cm^3]$ y es inversamente proporcional al espacio poroso, éste permite la aireación y el flujo del agua además de facilitar la penetración de las raíces y proporcionar espacios para que la fauna edáfica prospere; además con el valor obtenido de la densidad aparente se pueden establecer equivalencias entre la

relación masa/masa y masa/superficie que son utilizadas para la aplicación de fertilizantes para corregir la deficiencia de nutrientes o enmiendas para atenuar los problemas de la acidez [52,53].

2.3.2 Conductividad eléctrica del suelo

La conductividad eléctrica (CE) señala de forma indirecta la cantidad de sales presentes en el suelo, también se entiende como la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica expresada en micro siemens por centímetro [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. Esta propiedad está relacionada con el tipo, concentración, valencia y movilidad de los iones disueltos. En regiones áridas o semiáridas los niveles de CE son elevados debido a que las sales naturales no han sido lavadas o arrastradas por las precipitaciones; de igual manera la topografía tiene un impacto severo pues las zonas bajas del paisaje tendrán una mayor concentración de sales debido a que fueron lavadas desde los puntos más altos [54]. Las sales disueltas tienden a formar enlaces con el agua debido a las cargas que presentan, disminuyendo así la disponibilidad del recurso hídrico para que las plantas lo absorban. La clasificación de los suelos de acuerdo con su nivel de CE se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación y características de los suelos salinos [53].

Tipo de suelo	Condiciones	Características
Salino	CE ≥ 4 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C, Na intercambiable < 15%	Tienen costra de sales blanca, pudiendo ser de Cl^- , SO_4^{2-} , CaCO_3 , Na_2CO_3 y MgCO_3 . Las sales se lixivian fácilmente hasta las raíces por el riego o la lluvia.
Sódico	CE < 4 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C, Na intercambiable > 15% pH: 8.5 - 10	Espacio poroso reducido pues el Na dispersa a la arcilla y a la materia orgánica, confiriéndoles una coloración negruzca.
Salino-sódico	CE = 4 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] a 25°C, Na intercambiable = 15% pH: > 8.5	La concentración de sales solubles suele ser elevada; la estructura del suelo es dispersa sin llegar a la de los suelos sódicos y tienen permeabilidad baja.

2.3.3 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se mide en [$\text{mEq}/100\text{g}$] y hace referencia a la cantidad total de cargas negativas que se encuentran disponibles en la superficie de las partículas del suelo, indicando la facilidad que tienen éstas para adsorber o intercambiar los nutrientes en la fase acuosa

del suelo, así como el pH potencial de las mismas. Los principales cationes intercambiables son el K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Al^{3+} y en menor medida el NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} y Cu^{2+} , estos serán intercambiados por protones (H^+) o por otros cationes [40].

Las cargas negativas del suelo intervienen en los procesos de floculación y dispersión de la arcilla, lo que se traduce como la facilidad para desarrollar la estructura y mantener la estabilidad de los agregados del suelo. La arcilla (que es la fracción inorgánica con mayor actividad química, debido a su elevado número de cargas negativas superficiales) junto con la materia orgánica, confieren la mayor parte de la CIC al suelo.

2.3.4 pH

El pH edáfico, hace referencia a la concentración del protón H^+ en solución con agua y se calcula mediante el logaritmo decimal del recíproco de la concentración molar de iones H^+ [38]. Éste tiene un efecto significativo en el desarrollo de las actividades de los organismos, la disponibilidad de los nutrientes y la solubilidad de los minerales; es fuertemente afectado por la temperatura y las precipitaciones, pues éstas controlan la intensidad de la lixiviación y la meteorización [40].

Por otro lado, la presencia de sales en los suelos ya sea por fuentes naturales o adicionadas por los fertilizantes, suelen disminuir los valores de pH, incrementando sus concentraciones de manera progresiva. En los suelos calcáreos, prevalientes en las zonas áridas, los carbonatos como el $CaCO_3$ mantienen los niveles de pH entre 7.3 y 8.6 [55]. Los suelos pueden clasificarse de acuerdo con el rango de pH que presenten (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los suelos de acuerdo a su nivel de pH, SEMARNAT 2002 [56].

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

2.3.5 Respiración del suelo

De manera general, los indicadores biológicos (como la respiración del suelo, la cantidad de biomasa microbiana y el coeficiente metabólico) suelen responder más rápido que los indicadores físicos y químicos ante condiciones de estrés en el medio [46].

La fracción biológica del suelo crea relaciones complejas y dinámicas a distintos niveles, pues influye en numerosos ciclos biogeoquímicos, fomenta el flujo de diversos nutrientes (S^{2-} , C^{2+} , K^+ , Na^+ , P^{3+} , Mg^+ , N^{2+} , etc.) y regula la dispersión de patógenos o compuestos nocivos en el sistema [45–47]. Así mismo, la actividad biológica del suelo puede determinarse a tiempo real mediante la medición de la respiración del suelo (R_S), ésta considera la respiración heterótrofa (actividades aeróbicas de la fauna del suelo y la de los microorganismos que descomponen la materia orgánica) y la respiración autótrofa (respiración de las raíces de las plantas y micorrizas) midiendo el flujo de CO_2 por unidad de área específica del suelo en un lapso de tiempo [46].

Por lo tanto la R_S refleja las alteraciones que se producen en el suelo ya sea por causas naturales o por actividades antropogénicas como la deforestación, los cambios en las prácticas de manejo del suelo y la contaminación [57].

Los principales controles de la R_S son: la humedad, que determina la distribución de los microorganismos, la disponibilidad de nutrientes y la movilidad del oxígeno; por otro lado, la temperatura, que está relacionada con las estaciones de lluvias y sequías, influye sobre los procesos fotosintéticos de los cultivos, los procesos de descomposición de la materia orgánica y por consiguiente en el suministro de sustrato para los microorganismos [58–60].

Se ha reportado que el TEQ puede modificar la actividad enzimática de los microorganismos del suelo [61,62]. Sin embargo, no existen estudios del efecto sobre la actividad biológica a tiempo real. En el presente estudio se realizaron mediciones de la respiración basal del suelo (RB) considerando solo la respiración heterótrofa bajo condiciones determinadas de humedad, tipo de electrolito y aplicación del campo eléctrico durante el TEQ.

En conjunto, los indicadores de la calidad del suelo (ICS) ayudan a determinar la respuesta que tiene la productividad o funcionalidad del suelo ante las condiciones ambientales. Entonces, al monitorear estos ICS se establece una línea base de los efectos que tendrán las técnicas de remediación (en especial el TEQ) sobre la funcionalidad y proponer así, estrategias correctivas para mantener o incrementar la calidad del suelo [63].

2.4 Tratamientos para la remoción de contaminantes del suelo

En la actualidad existen diversas técnicas para contener, separar o remover los contaminantes del suelo (ver Tabla 3); sin embargo, muchas de ellas operan en condiciones poco favorables para mantener la funcionalidad de éste y soportar futura actividad biológica. Algunas como el lavado y enjuague de suelos usan agentes tóxicos como el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), H₂SO₄ o agentes quelantes y cementantes pudiendo extender la pluma contaminante, otras adicionan compuestos peligrosos formando complejos con los nutrientes removiéndolos del medio [64–66].

Los tratamientos térmicos basan su funcionamiento en la aplicación de calor para lograr la movilidad de los componentes volátiles, destruirlos o inmovilizarlos como es el caso de la vitrificación, alcanzando temperaturas de 1,400°C (de forma *ex situ* mediante la aplicación de una corriente eléctrica en hornos) hasta 2,000°C (*in situ*, introduciendo electrodos de grafito en el suelo y una vez enfriado se solidifica dentro de la matriz vítrea); también se pueden usar arcos de plasma y alcanzar temperaturas superiores a los 4,000°C; sin embargo, tiene un costo y consumo energético elevado lo que limita su aplicación a gran escala [4,67].

En cualquiera de los casos, las características del suelo que mantienen la fracción biológica (pH, humedad, disponibilidad de nutrientes, rizosfera, etc.) son alteradas, dejando una problemática mayor y poniendo en riesgo la capacidad de los suelos para proveer los diversos servicios ecosistémicos; el TEQ no es la excepción [68]. Las limitantes para la selección de un tratamiento de remoción son las características físico-químicas de los suelos, la composición del contaminante, la eficacia potencial del tratamiento, la viabilidad económica y el tiempo disponible para su desarrollo [69]. Según la forma de aplicación se clasifican en *in situ*, que se aplica en el sitio contaminado y *ex situ*, en donde es necesaria la excavación previa del suelo para darle tratamiento en el sitio (*on site*) o transportarlo a una planta de tratamiento fuera de éste (*off site*) [42].

Con la finalidad de atenuar los efectos negativos de un tratamiento en específico, se han incorporado varias técnicas de manera simultánea, conocido como tren de tratamiento para potenciar los beneficios de cada una [70]. Un ejemplo es la remoción electroquímica de hidrocarburos asistida por biorremediación; donde la hidrólisis genera O₂, favoreciendo las condiciones aeróbicas para el crecimiento microbiano y al invertir la polaridad de los electrodos, los nutrientes permanecen disponibles para los microorganismos sin la creación de las zonas extremas de pH [71,72].

Tabla 3. Características, ventajas y desventajas de diversas técnicas de tratamiento del suelo.

Técnica	Características	Ventajas	Desventajas	Referencia
Lavado y enjuague de suelos	Se remueven los contaminantes al hacer pasar distintos fluidos de extracción interactuando con ellos y luego son bombeados al exterior.	Remoción de los contaminantes, fácil operación y bajo costo de instalación, poca alteración del suelo.	Mejor eficacia para suelos con textura gruesa, alta permeabilidad, pero existe la posibilidad de extender la pluma contaminante.	[73]
Extracción electrocinética	Se aplica corriente directa, con electrodos de grafito, titanio, etc. Los contaminantes son atraídos de acuerdo con sus cargas (+ o -) ya sea al cátodo o ánodo; después son removidos de los electrodos mediante galvanoplastia, se llevan a cabo procesos faradaicos (redox) para movilizar los contaminantes.	Remueve contaminantes sin alterar las condiciones del suelo manteniendo su funcionalidad. Tiene bajo consumo eléctrico y se controla la dirección del flujo de contaminantes.	Es un tratamiento lento, con baja eficiencia, limitado a suelos con baja permeabilidad y con porosidad fina.	[19]
Biorremediación	Remoción de contaminantes usando microorganismos para transformarlos reduciendo su valencia.	Bajo impacto en suelos, costos bajos y fácil de implementar.	Remoción probada en contaminantes orgánicos, tiene baja eficiencia.	[4]
Fitorremediación	Se usan plantas, en algunos casos hiper acumuladoras para remover, fijar o estabilizar los contaminantes; si los niveles son muy elevados se inhibirá el crecimiento de las plantas. Los contaminantes se movilizan a las raíces y a las hojas; esta biomasa puede ser usada como combustible.	Tiene una elevada aceptación pública, con costos mínimos, es fácil de implementar, efectivo en zonas extensas con niveles bajos de contaminación.	Es limitado a casos de contaminación superficie, con baja eficiencia pues suele tardar años en lograr la degradación de los contaminantes.	[74]
Vitrificación	Tratamiento térmico (superior a los 7,000 °C) que al enfriar quedan inertes dentro de una matriz vítrea.	Alta eficacia, inertización de contaminantes, pueden usarse los productos del tratamiento como materiales de construcción.	Tiene costos elevados y es una técnica destructiva con pérdida de la funcionalidad del suelo. Limitada a bajas áreas o volúmenes.	[4]

2.5 Tratamiento electroquímico del suelo (TEQ)

El TEQ basa su funcionamiento en la aplicación de un gradiente de potencial eléctrico entre electrodos introducidos en el suelo generando así un campo eléctrico. Esto da lugar a diversos procesos, entre ellos:

- Físicos: como el calentamiento eléctrico debido a las caídas de tensión por la resistencia del suelo (efecto Joule)
- Electroquímicos: reacciones de oxidación y reducción en la superficie de los electrodos.
- Electrocinéticos: fenómenos de transporte de carga y fluidos a través de los poros del suelo por electromigración, electroósmosis, electroforesis y electrólisis

Ha sido empleado para la remoción de contaminantes tan variados como pesticidas [75], hidrocarburos [10], metales pesados [11] y radionúclidos [12]. No obstante, tiene como limitantes el tipo de suelo (desempeñándose mejor en aquellos con baja permeabilidad), la naturaleza y extensión de la contaminación, la presencia de obstáculos en el sitio (como piedras pequeñas, objetos enterrados y rocas fracturadas), la fuerza del campo eléctrico aplicado en el sitio y la corrosión de los electrodos, en especial si son de hierro [76–78].

En la Figura 1, se muestra el arreglo general para el TEQ; el sistema cuenta con un par de electrodos (1) por donde pasará la corriente eléctrica suministrada por la fuente de poder (2); es necesario adicionar agua o una solución electrolítica (3), los aniones (4) y los cationes (5) forman complejos con el H^+ y OH^- provenientes de la electrólisis del agua y son transportados por los diversos mecanismos de remoción [79].

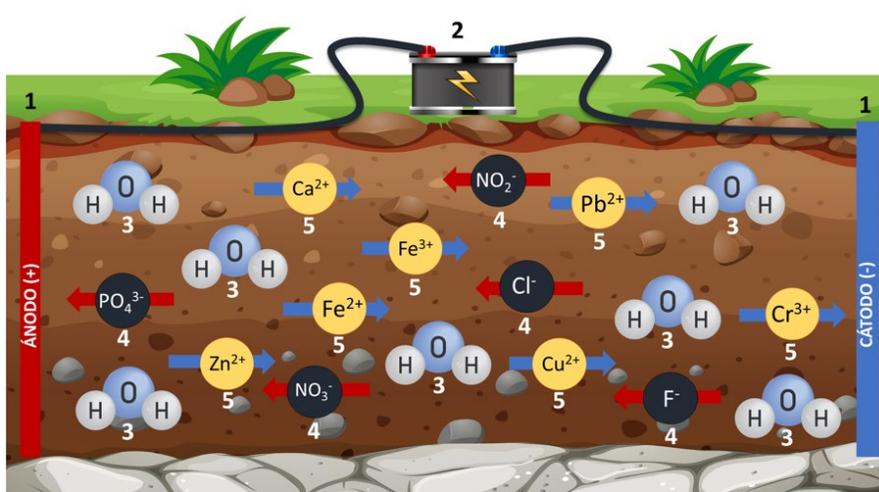


Figura 1. Proceso simplificado del TEQ, las especies se mueven de acuerdo con la carga que presenten. Modificado de [80].

2.5.1 Mecanismos de remoción

En la Figura 2 se muestran los fenómenos de transporte para la remoción de contaminantes durante el TEQ. Gracias a la formación de la doble capa eléctrica (1) y la capa difusa (2) en los poros y capilares de las partículas de suelo se crea el perfil de transmisión para el flujo electroosmótico (4), el cual transporta el líquido saturante (solución electrolítica) junto con las sustancias suspendidas en él, este fluye generalmente del ánodo hacia el cátodo.

La electromigración (3 y 6) es el mecanismo predominante que transporta las especies cargadas (iones en solución, así como los complejos que se forman con los diversos iones metálicos, el H^+ , el OH^- , etc.) hacia el electrodo de carga opuesta. La electroforesis (5) tiene una menor recurrencia, en especial en suelos compactados y se observa cuando se encuentran partículas o coloides con carga eléctrica [79].

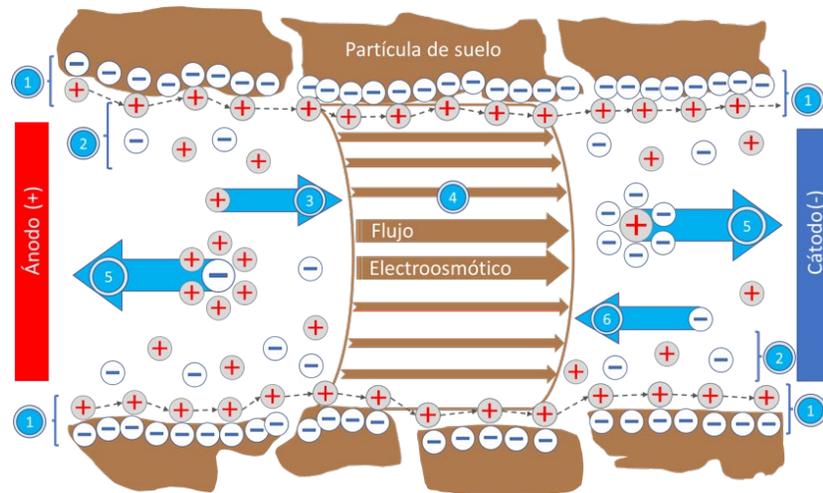
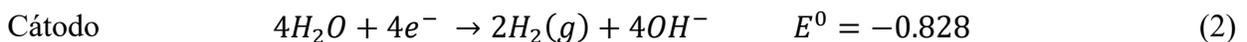
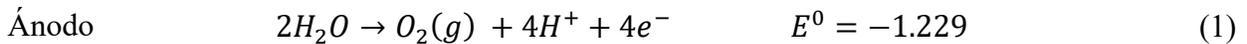


Figura 2. Procesos electrocinéticos de transporte de carga y fluidos en los poros del suelo; (1) Doble capa eléctrica, (2) Capa de difusión, (3) electromigración de cationes, (4) flujo electroosmótico, (5) electroforesis de micelas o coloides y (6) electromigración de aniones.

2.5.2 Potencial de hidrógeno (pH) durante el TEQ

La electrólisis del agua se explica con las ecuaciones (1) y (2) en donde ocurren reacciones redox; en el ánodo (electrodo negativo) sucede la oxidación del agua generando H^+ y O_2 , la reducción se efectúa en el cátodo (electrodo positivo) produciendo H_2 y OH^- .



Como resultado de estas reacciones se genera un frente ácido en el ánodo que migra hacia el cátodo, así como un frente básico en el cátodo que viaja hacia el ánodo. El frente ácido avanza con mayor velocidad que el básico (Figura 3) debido a la elevada movilidad del ion H^+ propiciando la solubilización de los contaminantes, pero el frente básico (proveniente del cátodo) precipitará los compuestos en forma de hidróxidos, bloqueando los poros y capilares del suelo. Cuando estos frentes se encuentran se crea una zona de transición con valores de pH de 2 a 13 en menos de 0.5 cm [81,82].



Figura 3. Movimiento del frente ácido (1, amarillo) proveniente del ánodo y un frente básico (3, violeta) que surge del cátodo durante una prueba para la remoción de Zinc, después de 11.3 horas se genera la zona de transición, frenando el avance del frente ácido y por ende la remoción de los contaminantes. El suelo sin tratar se encuentra en la región central de la celda de tratamiento (2, marrón) [81].

Este salto de pH no solo facilita o dificulta la remoción, también tiene una influencia negativa sobre las funciones biológicas del suelo afectando a las comunidades microbianas, en especial las bacterias pues inhibe sus funciones vitales promoviendo la proliferación de hongos y actinomicetos, disminuyendo así la capacidad de fertilidad de los suelos [83–85].

La eficiencia de remoción está condicionada al avance del frente ácido y básico debido a la solubilidad y precipitación de los contaminantes; el estudio realizado por Yang y Lin indica que en la zona anódica (ácida) la concentración de los contaminantes disminuye hasta un 90%, pero en la zona anódica (básica) incrementa hasta un 180% [86].

Otra limitante relacionada al pH es el potencial Z (ζ) que a su vez depende del punto de carga cero (del inglés Zero Point Charge, ZPC). El ZPC se refiere al pH al cual la carga de la superficie de una partícula es 0, está en función de la naturaleza y composición del medio de suspensión.

En la mayoría de los suelos el ζ es negativo debido a que la carga de sus partículas es negativa, pero cuando disminuye el pH disminuye también la negatividad de ζ propiciando la floculación y precipitación de las partículas [87,88]. Este potencial determina la velocidad y la dirección del flujo electroosmótico, si éste llega a ser positivo se dará la electroósmosis inversa (del cátodo al ánodo) dificultando la remoción de los contaminantes [49].

La Tabla 4 condensa varias problemáticas y las soluciones que se han propuesto ante el cambio de pH; las propuestas que se pondrán en efecto en esta investigación son:

- Condicionamiento del electrolito: adición de sales a la solución para incrementar la CE y la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, de igual manera se agregarán agentes complejantes a la solución para aumentar la capacidad buffer del suelo.
- Implementación de barreras permeables compuestas por zeolita clinoptilolita y papel filtro Whatman®.
- Inversión periódica de la polaridad cada 3 horas.

Tabla 4. Problemáticas, soluciones y efectos que pueden presentarse en el tratamiento electroquímico.

Problemática	Solución	Efecto	Ejemplos	Referencia
Solubilidad y movilidad de los contaminantes	Agentes quelantes	Formación de complejos estables (múltiples enlaces) con los contaminantes con enlaces fuertes y solubles en agua. Es necesario un tratamiento posterior del fluido de extracción.	EDDS (ácido etilendiamino disucínico), EDTA (ácido etilendiamino tetraacético), ácido cítrico	[65,89]
	Surfactantes	Actúan como floculantes, reducen la tensión superficial, mejoran la solubilidad y forman micelas.	SDS (dodecilsulfato de sodio), SDBS (dodecilbenceno sulfonato de sodio), Tween 80 y fosfolípidos	[5,90,91]
	Agentes complejantes	Formación de complejos (un solo enlace) con los contaminantes, ayudan a controlar el pH por efecto buffer.	I ⁻ , Cl ⁻ , NH ₃ ⁻ y OH ⁻ , ácido acético, ácido láctico y ciclodextrinas	[92]
	Reductores/Oxidantes	Ayudan a disminuir la toxicidad de los contaminantes.	Aire, O ₂ , H ₂ O ₂ , KMnO ₄ y NaMnO ₄	[93,94]
	Soluciones catiónicas	Se incrementa la capacidad de intercambio catiónica y conductividad eléctrica al introducir iones al medio.	NaCl, Al ³⁺ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ y K ⁺	[95]
Control del pH	Inversión de polaridad	Distribuir homogéneamente la conductividad eléctrica y el pH, evitando que los contaminantes precipiten.	Inversión cada 6, 8 y 24 horas con diversos % de remoción	[19,96,97]
	Condicionamiento de electrolito	Neutralizar la generación de H ⁺ /OH ⁻ con la adición de ácidos y bases débiles.	Ácido acético y ácido cítrico	[98][98–100]
	Membranas selectivas	Permitir/bloquear el paso de los iones OH ⁻ o H ⁺ .	Nafion™ y membranas iónicas/catiónicas	[101–104]

2.5.3 *Material y configuración de los electrodos*

En cuanto a la naturaleza de los electrodos se recomienda que sean de un material resistente a la corrosión, químicamente inertes, de fácil maquinado y con cierto grado de porosidad para permitir el paso de los gases que se liberen durante la electrólisis del agua; entre los materiales recomendados se encuentra el oro, platino, plata, titanio, aleaciones de titanio/acero, grafito, hierro y cobre [105].

La configuración de los electrodos dependerá de las dimensiones de la celda, la profundidad de la contaminación y la capacidad de la fuente de poder; la configuración unidimensional es la más común, aunque la forma multidimensional tiene una mayor eficiencia, pues usa más electrodos reduciendo el área inactiva del campo eléctrico [24].

Sin embargo, la limitante en este tipo de configuraciones es el costo de los electrodos así como la disponibilidad del tiempo y consumo energético pues suele ser superior [106].

López-Vizcaino y colaboradores intentaron escalar el TEQ para tratar 16 y 32 m³ de suelo contaminado con pesticidas, con una configuración hexagonal conocida como valla electrocinética (3 ánodos y 3 cátodos), reportan que los porcentajes de humedad disminuyeron debido al incremento de la temperatura en el suelo por el efecto Joule (pérdida en forma de calor de la energía cinética de los electrones que pasan por un conductor), concluyendo que la distancia, el porcentaje de humedad y la configuración de los electrodos deben optimizarse para escalar las celdas de tratamiento [107].

2.5.4 *Electrolito*

Los electrolitos pueden contener ácidos y bases débiles, con la finalidad de controlar los niveles de pH, además de que pueden ayudar a mantener a los contaminantes en la fase móvil al solubilizarlos y adicionar iones en concentraciones mínimas para favorecer la capacidad de intercambio catiónico, proveer nutrientes a los microorganismos y formar complejos con los contaminantes para ser removidos del medio [95].

En diversos estudios se ha empleado el EDTA como un agente quelante para formar complejos con los metales pesados como el Cd y Pb [30,108,109].

Jelusic y colaboradores realizaron estudios sobre el efecto del lavado de suelos con EDTA en su fertilidad y la capacidad de varios vegetales para asimilar metales pesados y micronutrientes, concluyendo que la absorción del EDTA por las raíces de las plantas llegó hasta los órganos superiores (hojas y frutos) y que su crecimiento presentó una marcada disminución en términos de

biomasa, debido a que el EDTA formó complejos con los contaminantes y con los nutrientes (Zn y Mg); en menor medida durante la aplicación del estímulo eléctrico con agua los nutrientes del suelo que tienen carga positiva (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) y negativa (PO_4^- , SO_4^- , CO_3^- , NO_3^-) son arrastrados y removidos del suelo mediante la electromigración y electroósmosis [36].

Yang & Lin estudiaron la capacidad electrolítica de los ácidos débiles como el cítrico y el acético a concentraciones 0.1 M, usando electrodos de grafito y un campo electromagnético de 1V cm^{-1} de intensidad durante 20 días. Al finalizar dividieron la celda de tratamiento en 5 fracciones longitudinales y tomaron las muestras del suelo para analizar el contenido de humedad y el porcentaje de plomo residual. Concluyendo que la selección de los componentes del electrolito, así como el pH y el flujo electroosmótico afectan los porcentajes de remoción [86].

2.5.5 *Compositos de barreras permeables y selectivas*

Para contrarrestar la pérdida de nutrientes se han desarrollado barreras selectivas y permeables o filtros con material poroso, con el fin de evitar la degradación química de los suelos [109,110].

Entre éstos, las zeolitas han sido empleadas ampliamente en la protección medioambiental por su alta adsorción y selectividad [111–113]. Las zeolitas son aluminosilicatos con estructuras cavernosas, tiene la capacidad de almacenar agua y poseen cationes intercambiables como el Ca, Na, K y Mg; el tamaño de la partícula es de 1-3 mm [114].

Pueden sintetizarse para obtener zeolitas alcalinas y ácidas, las cuales pueden funcionar como una base sólida para neutralizar la generación excesiva de H^+ y OH^- en los electrodos y aminorar los cambios de pH [115].

Fu y colaboradores exploraron la posibilidad de controlar el pH mediante una barrera selectiva incorporada a los electrodos de hierro metálico y zeolita, comprobando que en la zona anódica se alcanzaron niveles de pH de 5 y en la catódica llegaron a niveles cercanos a 8 [116].

Paralelamente, Ursini y colaboradores estudiaron la capacidad de intercambio catiónico que presentan las zeolitas y concluyeron que pueden funcionar como un secuestrador de metales pesados, evitando que sean adsorbidos por los electrodos [117].

Xu y colaboradores combinaron el lavado de suelos con la remoción electroquímica para reciclar los metales pesados. Funcionalizando los electrodos de grafito para emplearlos como filtros de los complejos formados con los metales y el EDTA; una vez que pasaban por el filtro, eran liberados y electrodepositados en su estado metálico (valencia 0) en los electrodos, los complejos formados con los nutrientes (Ca y Mg) y EDTA tienen un potencial de reducción bajo y fueron

retenidos en los filtros, se reincorporaron al suelo una vez que se recirculó el EDTA [37]. El equipo de investigación de Xu empleó una fuente de poder con corriente alterna asimétrica donde se varió la diferencia de potencial eléctrica entre 5 y -10 V invirtiendo la polaridad de los electrodos cada 2 microsegundos para disminuir la acidificación y alcalinización del medio. La remoción de los metales pesados alcanzó el 90% con periodos de tratamiento de 6 horas. Comprobaron la remoción de la toxicidad al sembrar chícharos, después del periodo de germinación observaron que al usar el suelo tratado con electroquímica y usando EDTA como electrolito se tenían resultados similares al suelo sin contaminar; por el contrario, en el suelo tratado mediante lavado con EDTA, la cantidad de biomasa se redujo en un 70%, demostrando así que el tratamiento es eficiente para remover los contaminantes aun usando EDTA como electrolito y preservar las concentraciones de los nutrientes en el suelo al usar un filtro selectivo.

2.5.6 Efecto del campo electromagnético sobre los microorganismos

Huang y colaboradores reportaron que la intensidad del campo eléctrico (E) es un factor determinante en el crecimiento bacteriano, aplicaron la inversión periódica de la polaridad y notaron que la temperatura y las tasas de transformación de los contaminantes orgánicos incrementaron sin generar las zonas de pH extremos cercanos a los electrodos. Por otro lado la producción de O₂ en el ánodo intensificó la actividad aeróbica microbiana, manteniendo una distribución uniforme en el suelo [71]. En la Tabla 5 se muestran diversos estudios que analizaron el efecto del campo eléctrico sobre los microorganismos, entre éstos destacan posibles alteraciones fisiológicas y forma de la célula, modificación de las características fisicoquímicas de la membrana celular, comprometiendo su movilidad y su metabolismo.

La magnitud de los efectos depende de (E) y del tiempo de exposición; en muchos casos se observó el incremento en los porcentajes de remoción debido al desarrollo de las comunidades microbianas, en otros la (E) sobrepasó los límites de tolerancia de los microorganismos resultando en la muerte celular. En resumen, el TEQ favorece la degradación aeróbica al generar H₂ y O₂ mediante la electrólisis del agua; con la oxidación y reducción parcial se reduce la toxicidad de ciertos contaminantes y además se logra un mayor tiempo de contacto entre los microorganismos, nutrientes y contaminantes gracias a los fenómenos electrocinéticos. Sin embargo, se observan efectos negativos por el cambio de pH, el calentamiento excesivo por el efecto Joule y los productos de las reacciones con los electrodos como el ion cloro o iones metálicos [118].

Tabla 5. Características y efecto biológico durante el TEQ de diversos contaminantes, modificada de [118].

Condiciones de operación y características						Efecto biológico	Referencia
Contaminante	Duración del tratamiento	Corriente (I)	Intensidad del campo electromagnético (E)	Inversión de polaridad (IP)	Configuración de los electrodos (ES)		
2-4 diclorofenol	15 días	Entre 5.7 a 21.3 mA	1 V/cm	6-12 h	Electrodos de grafito: a) 2 en unidimensional a 20 cm, b) 7 en hexagonal a 10 cm del centro, b-1) en paralelo con IP 6-12 horas y b-2) solo un electrodo conectado al central con cambio de electrodo cada 6-12 h.	Inhibición bacteriana por variación del pH; mejor control del pH con IP cada 6 h, remoción hasta 3 veces más que en el de 12 h. Distribución uniforme de la concentración residual del contaminante con ES hexagonal, pero menor remoción que la unidimensional.	[119]
Pentaclorofenol	36-95 días	10 mA	1 V/cm	24 h, solo en la prueba (3)	1) electrodos de grafito en contenedores separados del suelo por membranas de intercambio iónico y agua como electrolito y, 2) adición de ácidos y bases para control del pH, 3) electrodos directo al suelo con IP diaria.	Mejor degradación con la IP (3), para los experimentos en (2 y 3) se reportaron problemas con el pH, el porcentaje de humedad y la inhibición de la biomasa microbiana.	[120]
Pirenos	50 días	NE	1 V/cm	24 h	4 electrodos de grafito	La remoción fue más elevada en el tratamiento con campo eléctrico que el control y los resultados mejoraron con IP por el control del pH.	[121]
Diésel	25 días	10 mA	NE	NE	Electrodos de grafito	Reducción en la biodiversidad y biomasa microbiana debido al pH; el EDTA presentó efectos tóxicos en la zona catódica	[122]
Fenol	10 días	NE	1 V/cm	1.5, 3 y 12 h	De 1 a 4 electrodos de grafito	Con la IP de 1.5, 3 y 12 h se observó una remoción de 68%, 60% y 49% respectivamente; control de pH mejoró la remoción	[123]
Hidrocarburos	14 días	NE	0.5, 1 y 1.5 V/cm	24 h	NE	La remoción es igual para E: 0.5, 1 V/cm y el control, mayor remoción en E: 1.5 V/cm, pero inhibición en zonas cercanas al electrodo por variación del pH.	[124]

NE: No especificado

3. Justificación

Debido a que la humanidad obtiene la mayor parte de sus alimentos y recursos a partir del suelo y éste tiene una tendencia a la degradación; resulta de especial interés encontrar técnicas de remoción de contaminantes que ayuden a mejorar su calidad. Sin embargo, la mayoría de los tratamientos operan en condiciones adversas para los microorganismos y al final de los procesos es necesario aplicar un post tratamiento para alcanzar los niveles de calidad anteriores al tratamiento.

El tratamiento electroquímico (TEQ) ha mostrado una alta efectividad para la remediación de los suelos contaminados, sin embargo existe la posibilidad de remover los nutrientes catiónicos y aniónicos durante su operación. Asimismo, el nivel de pH ácido que se alcanza en la zona anódica y la basicidad en la zona catódica, así como la zona de transición puede alterar la movilidad de los compuestos cargados, potencialmente afectando los procesos vitales y metabólicos de la comunidad microbiana del suelo, disminuyendo así su funcionalidad, lo que conllevaría una degradación biológica del suelo como resultado del propio TEQ.

La presente investigación surge de la necesidad de estudiar el efecto del estímulo electroquímico sobre la actividad biológica del suelo, así como el efecto de la integración de varias medidas de control para los niveles de pH como la inversión periódica de la polaridad, la presencia de barreras porosas y el acondicionamiento de la solución electrolítica (electrolito) con el propósito de identificar las estrategias a aplicar en trabajos futuros para mantener la funcionalidad del suelo agrícola al aplicar un tratamiento electroquímico para la remoción de contaminantes.

4. Hipótesis

Los niveles de pH durante el tratamiento electroquímico en el suelo agrícola se mantendrán estables debido a la serie de medidas aplicadas como el acondicionamiento de la solución electrolítica, la inversión periódica de la polaridad y la presencia de barreras físicas. Este control del pH tendrá un impacto positivo sobre la actividad biológica del suelo, cuantificada por medio de la respiración basal del suelo.

5. Objetivos

5.1 General

Evaluar el efecto del tratamiento electroquímico y el electrolito neutro sobre el pH, la conductividad eléctrica y la respiración basal del suelo, para su potencial aplicación en la remoción de contaminantes del suelo agrícola.

5.2 Particulares

- Determinar el efecto del TEQ a corto plazo sobre el pH y la CE, evaluados como indicadores de la calidad del suelo agrícola.
- Determinar el efecto del estímulo electroquímico sobre la actividad biológica, mediante la respiración del basal suelo, a lo largo del TEQ.
- Diferenciar el efecto de cada electrolito durante el TEQ sobre la actividad biológica del suelo, mediante la determinación de la respiración basal del suelo.

6. Metodología

6.1 Ubicación del sitio de estudio y muestreo del suelo

El suelo que se utilizó para la aplicación del TEQ fue recolectado de una parcela agrícola ubicada en la hacienda San Isidro de Gómez en el municipio de General Cepeda en Coahuila de Zaragoza, México ($25^{\circ}30'16.64''$ N, $101^{\circ}39'05.19''$ E) (Figura 4).

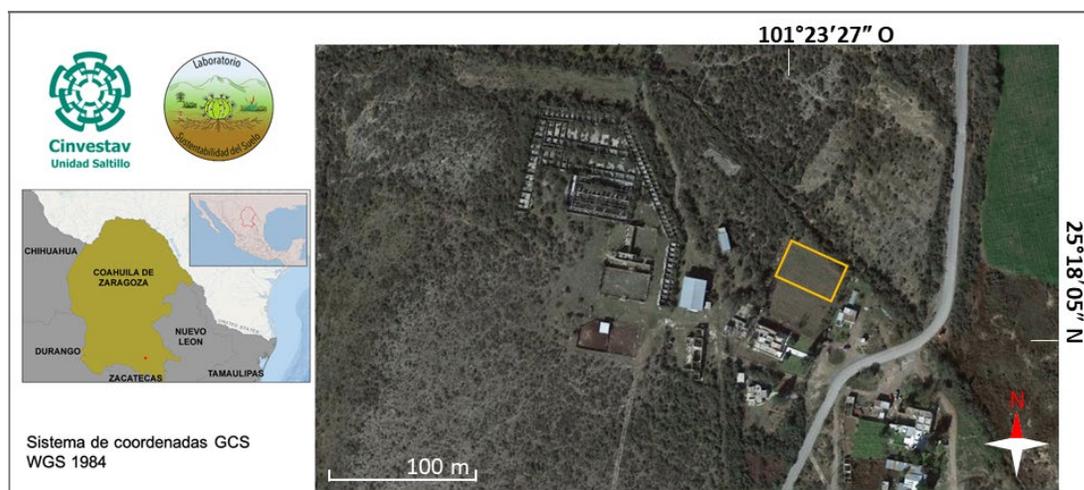


Figura 4. Ubicación de la Hacienda San Isidro de Gómez en el municipio de General Cepeda, Coahuila de Zaragoza, México. Fuente: Google Maps 2021

Se recolectaron muestras de suelo a una profundidad de 20 cm de forma aleatoria en la parcela (Figura 5) y se tamizaron con una malla de 2 mm de apertura para su homogenización de acuerdo con el método AS-01 contenido en la NOM-021-RECNAT-2000 [125], posteriormente, se transportaron y almacenaron en costales de 40 kilos a temperatura ambiente para el periodo de incubación y posterior TEQ.



Figura 5. Sitio de muestreo de suelo, con puntos de recolección aleatorios.

6.2 Caracterización fisicoquímica del suelo

Con la finalidad de conocer las condiciones iniciales del suelo se realizaron determinaciones de pH, densidad aparente, textura, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica y composición química. Así mismo, se caracterizaron estas propiedades al final del TEQ (exceptuando la textura y la materia orgánica pues no se esperan modificaciones a corto plazo durante el TEQ), para determinar el efecto de éste sobre las propiedades del suelo.

Para la composición química inicial se tomaron alícuotas de 5 puntos aleatorios en el sitio de estudio para mezclarlas y tener una muestra compuesta. Se pesaron 10 gramos de suelo y se molieron para tamizarlos por malla #100 y analizarlos mediante espectroscopía de absorción atómica por ICP (Thermo Scientific, ICE 3300) y espectrometría de emisión por plasma (Perkin Elmer, OPTIMA8300) en los laboratorios de análisis químico del CINVESTAV, Unidad Saltillo.

Usando un potenciómetro Orion Star A210 y un conductímetro Orion Star A212, ambos de la marca Thermo Scientific TM, se determinaron el pH y la conductividad eléctrica del suelo en una suspensión de suelo: agua (1:2) de acuerdo con el método AS-02 de la NOM-021-RECNAT-2000 [125].

La densidad aparente se calculó usando la ecuación (3), sustituyendo los valores del peso del suelo (previamente seco a 105°C) y el volumen de un matraz aforado de 100 ml siguiendo el método AS-04 de la NOM-021-RECNAT-2000 [125].

$$\text{densidad aparente} = \frac{\text{peso del suelo [g]}}{\text{volumen [cm}^3\text{]}} \quad (3)$$

La materia orgánica del suelo fue determinada por el método de calcinación o combustión gravimétrica, secando 5 gramos de muestra en crisoles de porcelana a 120°C durante 24 horas y calcinándolos en una mufla a 350°C durante 4 horas; después se pesaron y los valores se sustituyeron en la ecuación (4).

$$\% MO = \left(\frac{(P_2 - P_1) - (P_3 - P_1)}{(P_2 - P_1)} \right) \times \frac{2}{3} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

% MO : Porcentaje de materia orgánica, es necesario multiplicar el valor obtenido por 2/3 para evitar una sobre estimación del % MO de acuerdo con Sato y colaboradores [126].

P₁ : peso del crisol seco

P₂ : peso del crisol + la muestra seca

P₃ : peso del crisol + la muestra calcinada

La textura del suelo se determinó con la metodología desarrollada por Bouyoucos [127], utilizando hexametáfosfato de sodio al 10% (NaPO₃)₆ como dispersante. Con una proporción 5:1 (peso/volumen) suelo: solución dispersante, se aforó a 1 litro de agua. Se registraron las mediciones del hidrómetro y la temperatura del agua inmediatamente después de la agitación inicial para obtener la proporción de limos y arcillas mediante la ecuación (5) y dos horas después de la agitación para obtener solo la proporción de arcillas con la ecuación (6).

$$\% \text{ limos} + \% \text{ arcillas} = \frac{\text{Primera lectura}}{g \text{ de suelo}} \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ arcilla} = \frac{\text{Segunda lectura}}{g \text{ de suelo}} \times 100 \quad (6)$$

Finalmente se calculó el porcentaje de arenas de acuerdo con la ecuación (7) y se determinó la textura del suelo con el diagrama textural (Figura 6) de la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América).

$$\% \text{ de arenas} = 100 - (\% \text{ limos} - \% \text{ arcillas}) \quad (7)$$

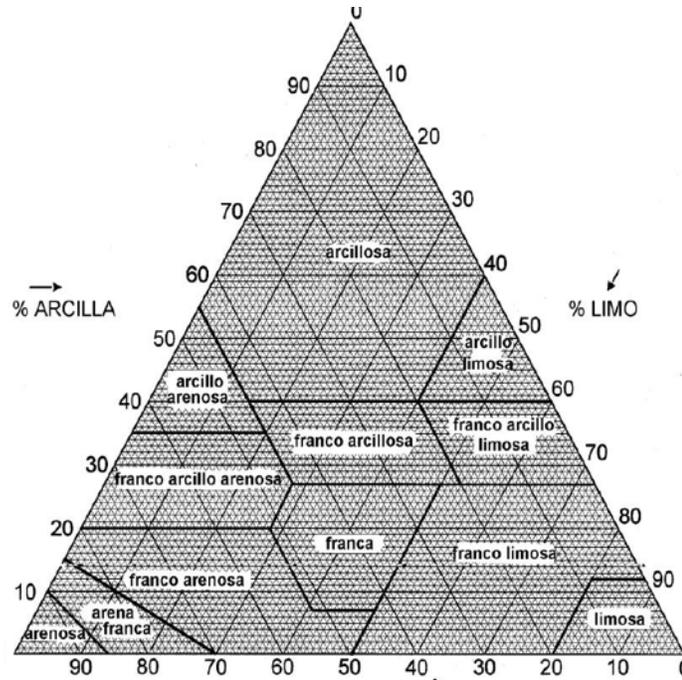


Figura 6. Diagrama textural USDA [128].

6.3 Construcción de porta electrodo

Se construyeron seis porta-electrodos con la finalidad de proveer un sitio en el que una barrera adsorbente, en este caso zeolita, se mantuviera en contacto con el electrodo asegurando la integridad física y química de éstos [129]. Para el maquinado del cuerpo de cada porta-electrodo se cortó un tubo de policloruro de vinilo (PVC) de 2 cm de diámetro interno y 14.5 cm de largo.

Se realizaron perforaciones a lo largo del cuerpo de PVC a una distancia de 0.5 cm con diámetros de 1, 1.5 y 3 milímetros para facilitar el flujo del electrolito al suelo. Cada porta-electrodo

se empacó con 46 gramos de zeolita clinoptilolita como material poroso y entre esta capa y el cuerpo de PVC se colocó papel filtro Whatman® número 4 para evitar la contaminación de la zeolita con el suelo.

La función de la zeolita es actuar como barrera iónica selectiva pues puede adsorber los nutrientes del suelo que son arrastrados durante el TEQ evitando que sean adsorbidos en la superficie de los electrodos [117,130]. En la Figura 7 se muestra el proceso de corte para el cuerpo de los porta-electrodos y en la Figura 8 (1) se observan los componentes de los porta-electrodos y (2) el porta-electrodo ensamblado.

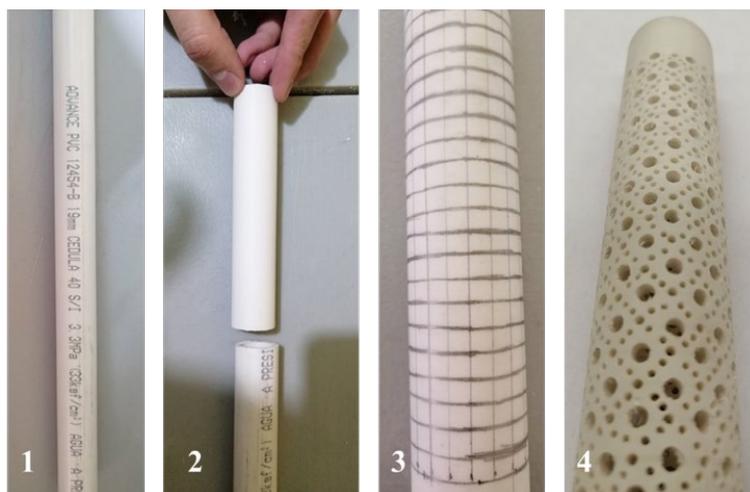


Figura 7. En (1) Tubo de PVC con un diámetro interno de 2 cm, (2) muestra el corte de 14.5 cm para conformar el cuerpo del porta-electrodo, (3) se aprecia la red trazada a 0.5 cm de distancia entre cada punto y en (4) el producto terminado con perforaciones de 1, 1.5 y 3 milímetros.

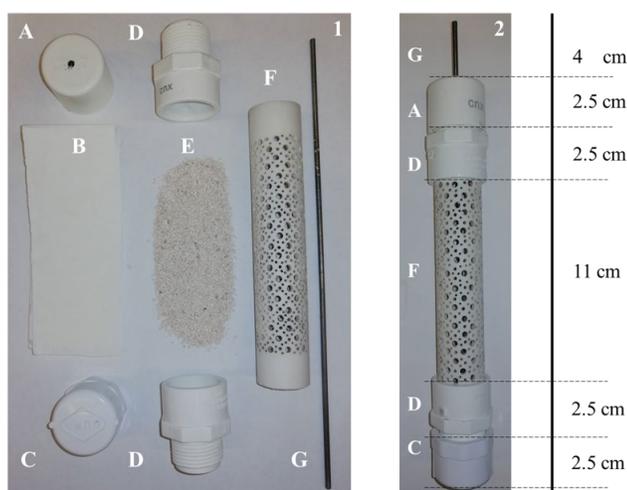


Figura 8. Componentes del porta-electrodo (1), en donde A es la tapa superior con un orificio para el electrodo, B es el papel filtro, C es la tapa inferior, D son adaptadores para las tapas, E es la zeolita clinoptilolita, F el cuerpo del porta electrodo y G es el electrodo de titanio. Porta-electrodo ensamblado, con papel filtro entre el cuerpo y la zeolita (2).

La zeolita clinoptilolita que se utilizó como material de empaque en el porta-electrodos proviene de la empresa Zeomex y sus características se muestran en la Tabla 6. La presencia de los cationes intercambiables la convierte en un material compatible para realizar el intercambio con los contaminantes con carga eléctrica y libere los cationes como el K^+ y el Mg^+ que son nutrientes indispensables para los cultivos y los microorganismos.

Tabla 6. Propiedades de la zeolita clinoptilolita. Caracterizada por el Laboratorio de Servicios Profesionales “Ing. Severo G. Flores Lira” en la Universidad Autónoma de Nuevo León, 2016.

Característica de la Zeolita clinoptilolita	
Relación Si/Al	5.50
Capacidad de intercambio catiónico [meq/g]	2.2 - 2.6
Cationes intercambiables	Na, K, Mg y Ca

6.4 Celdas de tratamiento

Se elaboraron dos celdas de tratamiento usando vidrio templado Tintex® de 6 mm de espesor, cada una con dimensiones de 40 x 19 x 20 cm (largo x ancho x alto), teniendo una capacidad de tratamiento de 15, 276 cm³. En cada celda se colocaron dos divisores de polipropileno de 1 cm de espesor, siendo un aislante eléctrico con resistencia a los agentes corrosivos y con baja absorción de humedad. En total se obtuvieron 3 subceldas con dimensiones de 12.7 x 19 x 20 cm (largo x ancho x alto) y una capacidad de 4,850 cm³. En cada subcelda se colocaron 5 kg de suelo para la aplicación del TEQ (Figura 9), cada subceldas se tomó como una repetición del experimento.

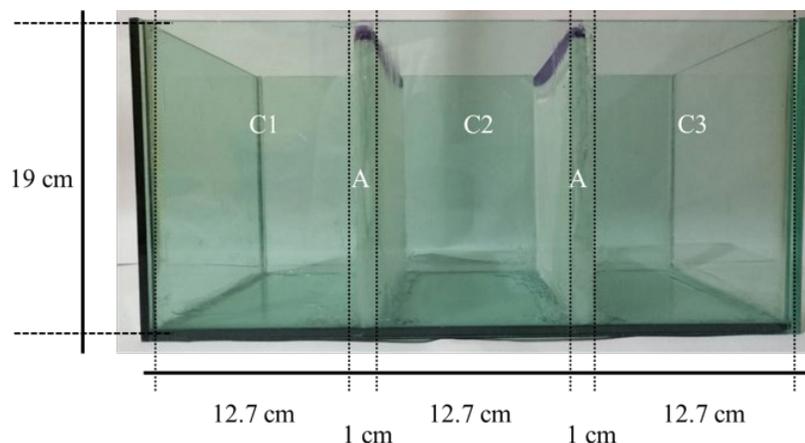


Figura 9. Dimensiones de las subceldas de tratamiento, (A) divisor de polipropileno, (C1, C2 y C3) son las subceldas de tratamiento.

6.5 Incubación de las muestras

El suelo agrícola tamizado a 2 mm se irrigó con la solución electrolítica (agua desionizada o con electrolito); se pesaron 250 gramos de suelo en una charola y se adicionaron 30 mililitros de la solución electrolítica, según el tratamiento a aplicar, para tener un 12% de humedad inicial, garantizando las condiciones aerobias necesarias para el mantenimiento de la comunidad microbiana.

El suelo se incubó durante un mes en charolas de aluminio (Figura 10) bajo condiciones de temperatura y humedad ambientales dentro del laboratorio (monitoreadas con una micro estación meteorológica, mostrada en la Figura 11), removiendo el contenido cada dos días para permitir la aireación de las muestras.



Figura 10. En (1) se muestran las charolas en donde se llevó a cabo el proceso de incubación con las distintas soluciones electrolíticas (agua y electrolito) y en (2) se aprecia la micro estación WatchDog sobre la charola central.



Figura 11. Micro estación meteorológica, data logger 1000, WatchDog, Spectrum technologies, que midió la temperatura y humedad ambiental durante la incubación y el TEQ.

6.6 Tratamiento Electroquímico (TEQ)

Se utilizaron 6 electrodos de titanio en paralelo, colocando un par (1 ánodo y 1 cátodo) en cada subcelda a una distancia de 17 cm entre ellos (Figura 12). Bajo estas condiciones se generó una intensidad de campo eléctrico (E) de 1 V cm^{-1} , como ha sido reportado por diversos investigadores que encontraron niveles de remoción de metales pesados aceptables al usar una E de 0.5, 1 y hasta 2 V cm^{-1} en suelos texturalmente similares [131–133]. De igual manera, se ha reportado que los microorganismos pueden prosperar bajo esta E reflejando resultados positivos en los tratamientos de biorremediación [119,120,122,134–136].



Figura 12. Colocación y distancia entre los electrodos durante el TEQ.

El sistema operó de un modo bidireccional al invertir la polaridad de los electrodos cada 3 horas para evitar la formación de las zonas de pH extremas cercanas a los electrodos [85].

El tiempo acumulado del tratamiento fue de 126 horas distribuidas en 19 días para el electrolito y 25 cuando se ocupó agua como solución electrolítica; esta diferencia radica en que al utilizar electrolito se llevaron a cabo 3 sesiones promedio diarias (9 h), mientras que para el agua solo se realizaron 2 sesiones (6 h); sin embargo el tiempo acumulado de tratamiento es el mismo en ambos casos.

Se caracterizó la composición química de los electrodos mediante espectrometría de absorción (Thermo Scientific, ICE 3300) y emisión atómica por plasma (Perkin Elmer, OPTIMA 8300) en el

laboratorio de análisis químico del CINVETAV, Unidad Saltillo, mostrando que se trata de una aleación de titanio, vanadio y aluminio (Tabla 7).

Tabla 7. Composición química de los electrodos, la matriz es de titanio con aleación de vanadio y aluminio.

Compuesto	% en peso	Compuesto	% en peso
Ti	89.01	Nb	0.316
Al	6.53	Mo	0.157
V	3.57	Zr	0.072

A lo largo del TEQ se mantuvo la humedad del suelo en un 25% adicionando agua o electrolito. La composición de la solución electrolítica se muestra en la Tabla 8; cabe mencionar que para preparar el electrolito se tomaron en cuenta los componentes con resultados exitosos reportados en la literatura el control del pH y la adición de nutrientes como el $MgSO_4$ y el $Ca(NO_3)_2$ [92,95,137].

Tabla 8. Composición y concentración del electrolito.

Compuesto	Concentración [molar]	Compuesto	Concentración [molar]
$NaHCO_3$	0.26	CH_3COOH	0.245
$Na_3C_6H_5O_7$	0.5	$AlCl_3$	0.0004
$NaOH$	0.5	$Ca(NO_3)_2$	0.006
$MgSO_4$	0.008	$CaCl_2$	0.0009

El pH de los electrolitos es neutro pues el agua tiene un valor de 7.18 ± 0.06 y el electrolito de 7.81 ± 0.09 . Su conductividad eléctrica es de 31.65 ± 1.06 y 61.86 ± 2.49 $\mu S/cm$ para el agua y el electrolito respectivamente.

6.7 Actividad biológica del suelo

Con la finalidad de observar los efectos del TEQ sobre la actividad biológica del suelo se monitoreó diariamente la respiración basal (RB) antes y después de cada sesión de TEQ y durante el periodo de incubación.

De igual manera se registró la temperatura y el porcentaje de humedad (% H) en el suelo para asegurar las condiciones aeróbicas y realizar ajustes en los niveles de riego del electrolito en el suelo, así como la cantidad de éste que se agregó en los porta-electrodos.

Estos parámetros se midieron con un analizador de gases infrarrojo EGM-5 (Figura 13), el cual envía el gas de muestra a la celda de detección mediante un ventilador interno, la fuente emite una señal IR a $4.26 \mu\text{m}$, que es la óptima para detectar el CO_2 , éste absorbe la energía, el filtro óptico reduce el ancho de banda de la fuente IR recibida por el detector y el detector mide la reducción de la señal; mientras mayor sea la concentración de CO_2 , menor será la señal recibida por el detector. Además de la cámara SRC-2 que es empleada para realizar las mediciones de la RB, se acopló el sensor Hydra Probe II que mide la temperatura y la humedad del suelo (Figura 14).

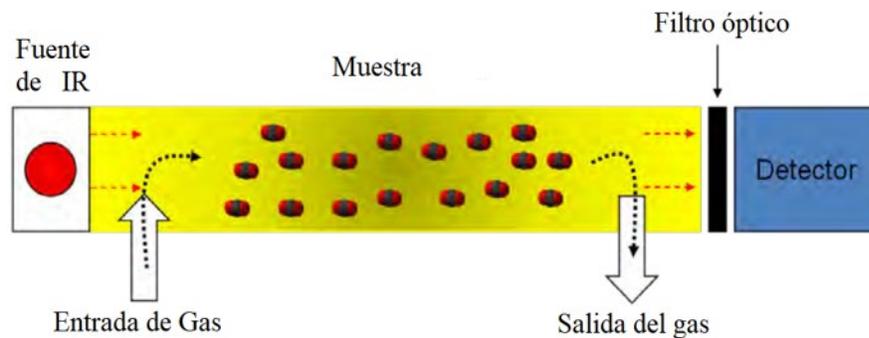


Figura 13. Esquema del funcionamiento del EGM-5, [Fuente, Manual de operación EGM-5].

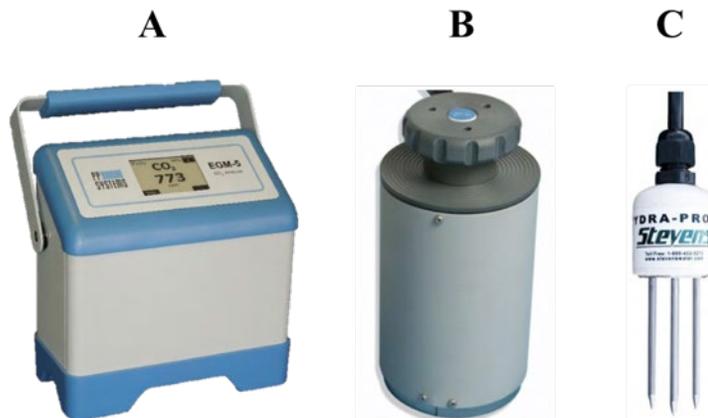


Figura 14. (A) Analizador de gases infrarrojo EGM-5 [PP systems TM], (B) cámara de respiración del suelo SRC-2 y (C) sensor de humedad y temperatura Hydra Probe II [Stevens Water Monitoring Systems, Inc]. [Fuente, Manual de operación EGM-5].

6.8 Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial 2^3 como se observa en la Tabla 9. Es importante recalcar que se consideró el suelo incubado con agua como la muestra control y que cada tratamiento contó con tres réplicas.

En la Figura 15 se muestra el sistema empleado para el TEQ; el electrolito se irrigo con el sistema de riego impulsado por la bomba automática, la fuente de alimentación está conectada a los electrodos y puede proporcionar una tensión eléctrica en un rango de 0 a 19V.

Tabla 9. Diseño de experimentos para evaluar la respiración basal durante la aplicación del TEQ con agua y electrolito como soluciones electrolíticas con inversión de polaridad cada 3, 6 y 9 horas.

Factor	Niveles	
Tratamiento electroquímico (TEQ)	Si	No (periodo de incubación)
Solución electrolítica	Agua	Electrolito
Tiempo de medición	Inicial	Final

Tratamientos: 8 Réplicas : 3 Total de corridas: 24

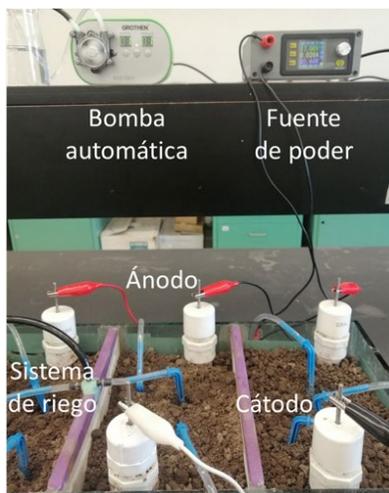


Figura 15. Arreglo del sistema para el TEQ. En la parte superior izquierda aparece la bomba automática, la fuente de poder, el sistema de riego de la solución electrolítica y los electrodos.

Para realizar el TEQ y el periodo de incubación se estableció lo siguiente:

1. Suelo sin tratamiento electroquímico (periodo de incubación): en un inicio se colocaron directamente 5 kilogramos de muestra tamizada en cada subcelda y se ideó un sistema de riego con una bomba automática (Figura 16, Figura 17 y Figura 18) para humedecerlas y mantenerlas en las subceldas durante el periodo de incubación; sin embargo, la solución se distribuyó desigualmente en las subceldas dificultando la homogenización de la humedad. Por lo que se optó el colocar los 5 kilogramos de suelo en charolas de aluminio humectando con agua y con electrolito bajo condiciones ambientales (temperatura ambiental promedio de 27°C y humedad relativa promedio de 56%) (Figura 10), adicionando 30 ml de la solución por cada 250 gramos de suelo (hasta un 10% de humedad en promedio) realizando volteos manuales con la ayuda de una pala para homogeneizar la humedad y mantener las condiciones aeróbicas para los microorganismos. Debido a los procesos de evaporación fue necesario suministrar solución electrolítica con un atomizador, éste ayudó a tener una mayor dispersión de la solución sobre el suelo.
2. Suelo con tratamiento electroquímico (TEQ): una vez terminado el periodo de incubación, se colocaron las muestras en las subceldas (C₁, C₂ y C₃) para ser sometidas al TEQ; antes de cada sesión de tratamiento se adicionaron 20 ml de solución electrolítica (Figura 19) dentro de los porta-electrodos para asegurar el proceso de hidrólisis y 30 ml en la celda para mantener la humedad del suelo; al final de las sesiones se colocaron toallas de algodón húmedas para evitar la pérdida de humedad por evaporación y cada quinto día se revolvió el suelo dentro de la celda para garantizar las condiciones aeróbicas y que la humedad fuera homogénea.
3. La toma de muestras (80 gramos) para determinar el pH y la CE se realizó antes y después del periodo de incubación. Para el TEQ se tomaron antes (0 h), durante (63 h) y después (126 h) en tres puntos, dos cercanos a los electrodos (P.1 y P.3) y uno más en la parte central de la celda (P.2) (Figura 20), en P.2 se tomaron las lecturas de la RB.
4. Los valores de RB, %H y temperatura se registraron de forma diaria antes y después de cada sesión de TEQ (Figura 21 y Figura 22) , de igual manera estos valores se registraron al inicio y final del día durante el periodo de incubación (Figura 23).

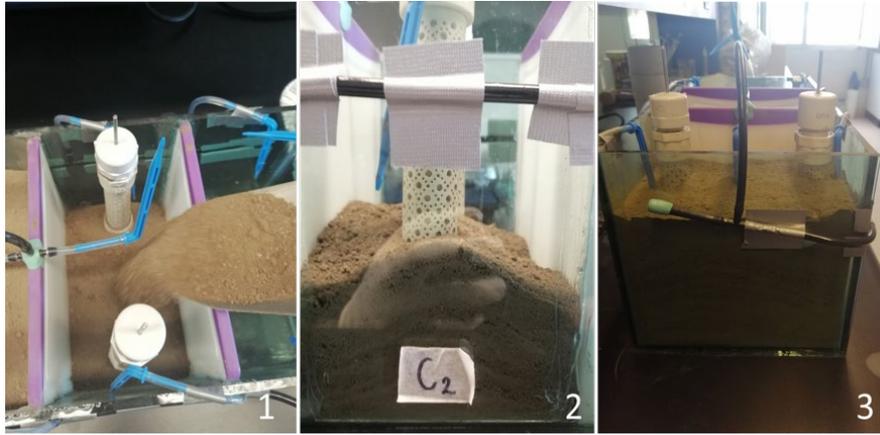


Figura 16. (1) Se llenaron las subceldas con 5 kilogramos de suelo, (2) subcelda C_2 llenada a la mitad de su capacidad con suelo y (3) subcelda C_1 con los 5 kilogramos y lista para comenzar con el riego de la solución electrolítica.

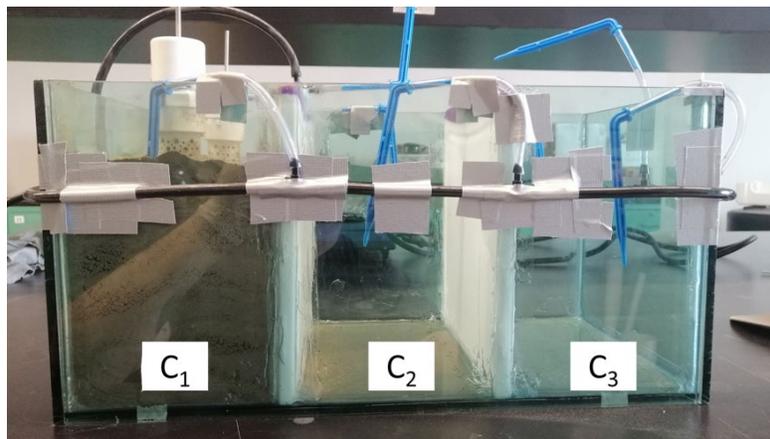


Figura 17. Subceldas de tratamiento C_1 , C_2 y C_3 , el suelo está en proceso de ser incorporado para dar inicio al proceso de incubación.

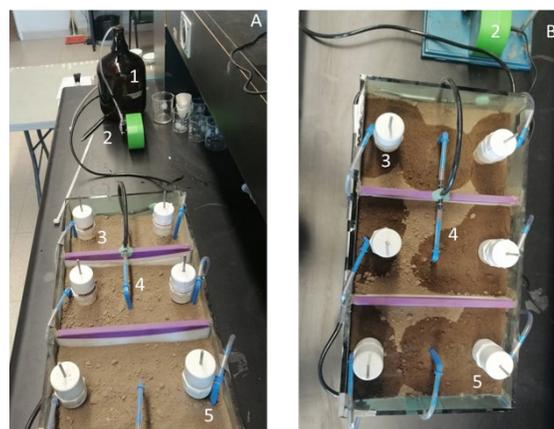


Figura 18. (A) Sistema para el TEQ antes del periodo de incubación: (1) Tanque de solución electrolítica, (2) bomba automática, (3) porta-electrodos, (4) sistema de riego y (5) porta-electrodo con línea de riego. (B) Se ha comenzado el riego, observando problemas de infiltración y dificultades para la homogenización de la humedad.

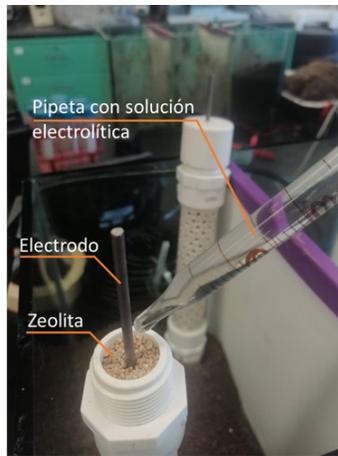


Figura 19. Usando una pipeta graduada se adiciona solución electrolítica dentro del porta-electrodo, mojando la zeolita hasta saturarla y logrando que el nivel de líquido llegue a cubrirla.

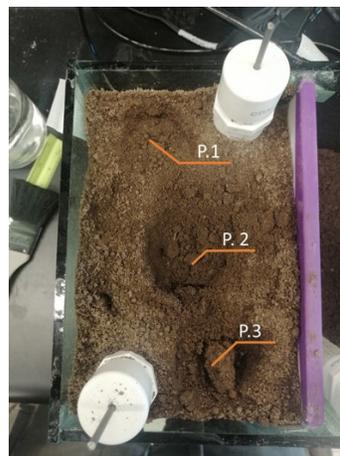


Figura 20. Identificación de los puntos de muestreo para las determinaciones de pH y CE; estos puntos son los mismos para las 3 subceldas.



Figura 21. Registro de la respiración basal antes y después del TEQ mediante cámara de respiración SRC-2 acoplada al EGM-5.



Figura 22. Registro de la temperatura y porcentaje de humedad en el suelo, antes y después del TEQ mediante la sonda Hydra Probe II acoplada al EGM-5.



Figura 23. Monitoreo de la RB, temperatura y % de humedad del suelo durante los periodos de incubación.

6.9 Análisis estadístico

Se analizaron los resultados en la RB, estudiados mediante un Análisis de Varianza de medidas repetidas (ANOVA) ($P < 0.05$), al aplicar o no un estímulo eléctrico al suelo (TEQ), el tipo de solución electrolítica empleada durante éste (agua y electrolito) en un modo de operación bidireccional, invirtiendo la polaridad cada 3 horas; así como la interacción entre ellos sobre la funcionalidad del suelo (explicada a través de la RB, el pH y la CE). Se realizó la prueba de la diferencia honestamente significativa (HSD, por sus siglas en inglés) de Tukey para determinar diferencias estadísticamente significativas con $\alpha = 0.05$ entre los tratamientos. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa libre STATISTICA V 10.

7. Resultados y discusión

7.1 Caracterización fisicoquímica

Según datos de la CONABIO, el municipio de General Cepeda, Coahuila de Zaragoza tiene un tipo de clima BSokw (árido templado con lluvias en verano) con una clasificación de suelo leptosol lítico (suelo somero, limitado en profundidad por una roca dura continua). Estas características marcan el límite para las propiedades fisicoquímicas del suelo como el pH, el porcentaje de materia orgánica, la CE y la CIC.

De acuerdo con los resultados de la caracterización fisicoquímica (Tabla 10) y la NOM-021-RECNAT-2000 donde se establecen las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos se infiere lo siguiente:

- El pH del suelo es neutro (17% de los suelos agrícolas nacionales) y con niveles bajos de materia orgánica (3% de los suelos agrícolas nacionales) como se espera para las regiones del norte del país.
- La densidad aparente refleja una textura arcillosa (1.11 g/cm^3); sin embargo el análisis textural demuestra que se trata de un suelo franco-arcilloso.
- La CE de $341 \mu\text{S/cm}$ indica un efecto despreciable de la salinidad sobre la fertilidad.
- Tiene un grado de fertilidad media con un valor de CIC de $18.2 \text{ cmol kg}^{-1}$, concluyendo que existen arcillas pertenecientes al grupo de las micas hidratadas y al de las cloritas.

Tabla 10. Caracterización fisicoquímica del suelo agrícola antes de la aplicación de TEQ. Los valores corresponden a la media \pm error estándar.

Propiedad	Valor
pH	7.00 ± 0.19
Conductividad eléctrica [$\mu\text{S/cm}$]	341 ± 7.74
Densidad aparente [g/cm^3]	1.11 ± 0.03
Materia Orgánica [%]	3.17 ± 0.09
Capacidad de intercambio catiónico [cmol kg^{-1}]	18.2 ± 0.32
Textura	
Arcillas %	35 ± 1.6
Arenas %	30 ± 9.5
Limos %	35 ± 8

Al analizar la composición química de las muestras (Tabla 11) se observa que se trata de un suelo agrícola estándar con presencia de sílice (SiO₂), óxidos de aluminio y calcio. No se identifica la presencia de contaminantes. El SiO₂ tiene efectos en los procesos del suelo, el crecimiento de las plantas y el desarrollo de las comunidades microbianas; estudios revelan que la presencia de este compuesto disminuye la toxicidad del Fe y el Mn pues permite incrementar la cantidad de oxígeno que proviene de las hojas y el tallo y llegue a las raíces para oxidar la rizósfera, de esta forma se oxida el Fe y el Mn reducidos [138].

Tabla 11. Composición química del suelo agrícola antes del TEQ.

Compuesto	%	Compuesto	%
Al ₂ O ₃	7.19	Li	<0.001
SiO ₂	62.9	Na	0.015
Al	0.889	Ni	<0.001
Ca	9.97	P	0.075
Cr	0.001	Pb	0.001
Cu	0.064	S	0.375
Fe	1.182	Si	0.09
K	0.277	Ti	0.009
Mg	0.417	Zn	0.012

7.2 Efecto del tratamiento electroquímico sobre la actividad biológica del suelo

El flujo de CO₂ durante este experimento fue registrado en gramos de CO₂ por metro cuadrado por hora, [g C-CO₂ m² h⁻¹].

De manera general, cuando se hidrata el suelo después de un periodo de sequía (comprendido en este experimento desde la recolección de las muestras, hasta el periodo de incubación) se observa un incremento drástico en la respiración del suelo conocido como “efecto Birch”. Navarro y colaboradores explican que esto se debe a diversos procesos físicos y metabólicos, pues los microorganismos consumen los osmolitos previamente generados por ellos al adaptarse al periodo de sequía, así como al consumo de la materia orgánica liberada por la fractura de los agregados del suelo [139].

En la Figura 24 se muestra el efecto Birch durante el periodo de incubación con ambos electrolitos (agua y electrolito) y la RB inicial en el periodo de sequía ($0.217 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$), alcanzando valores de $1.2 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ para el agua y $1.6 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ con electrolito (25% más que con agua), este incremento podría ser explicado por la presencia del MgSO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y CaCl_2 en el electrolito que funcionan como nutrientes para los microorganismos [140].

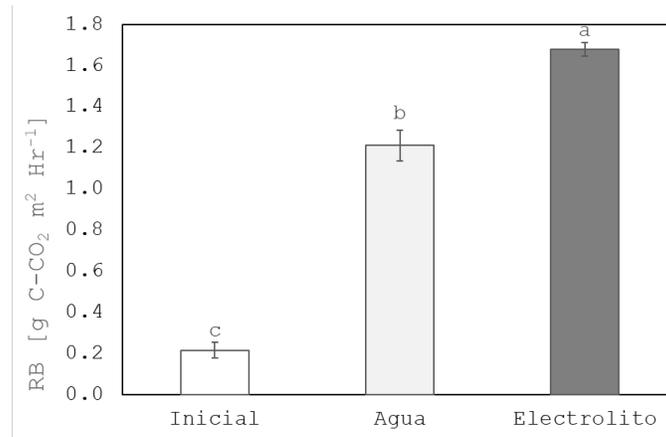


Figura 24. La RB en la fase de sequía está representada por la barra blanca, el efecto Birch durante la incubación con agua (barra gris claro) y con electrolito (barra gris oscuro). Las barras indican datos promedio de la respiración basal de las 3 subceldas y las barras de error estándar.

En la Figura 25 se observa que al final del periodo de incubación no existen diferencias significativas en la RB, teniendo el mismo valor promedio $0.9 \pm 0.02 \text{ [g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}]$ para agua y electrolito, este comportamiento podría explicarse mediante las curvas de crecimiento de los microorganismos, indicando que se encuentran en la fase estacionaria [140].

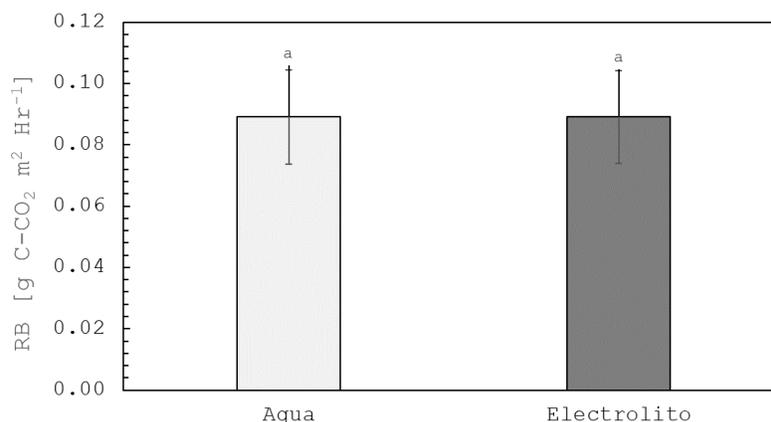


Figura 25. Respiración basal (RB) del suelo asociada al tipo de electrolito durante el periodo de incubación. El electrolito está representado por las barras gris oscuro y las gris claro representan el agua. Se presentan datos promedio y error estándar. Las letras iguales indican que no existen diferencias significativas entre el tipo solución electrolítica durante el periodo de incubación, de acuerdo con la prueba de Tukey del ANOVA ($p < 0.05$).

Al analizar la tendencia de la RB en la Figura 26, al usar agua como solución electrolítica (1), se puede apreciar que las comunidades microbianas durante el periodo de incubación se encuentran en la fase exponencial del crecimiento hasta el día 7; a partir del día 8 se estabiliza con tendencia al declive; esto ocurre también al usar electrolito (2), con un comportamiento similar desde el día 10 al 19, pudiendo deberse por el lavado de los nutrientes durante el riego constante de la solución electrolítica [141].

Por otro lado, la RB alcanza un valor máximo de $0.282 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ al día 3 cuando se ocupó electrolito y $0.269 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ al día 7 cuando se usó agua; de igual manera el valor mínimo se da en el día 12 ($0.038 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$) para el electrolito y hasta el día 25 con agua ($0.028 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$).

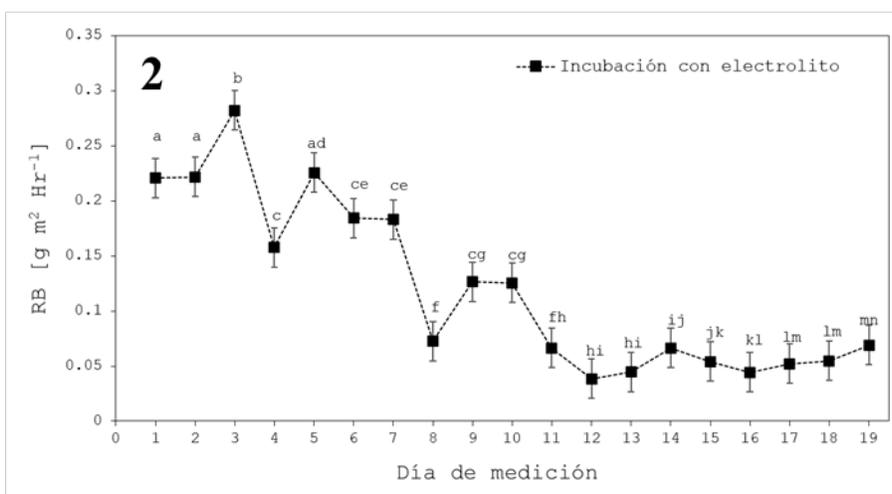
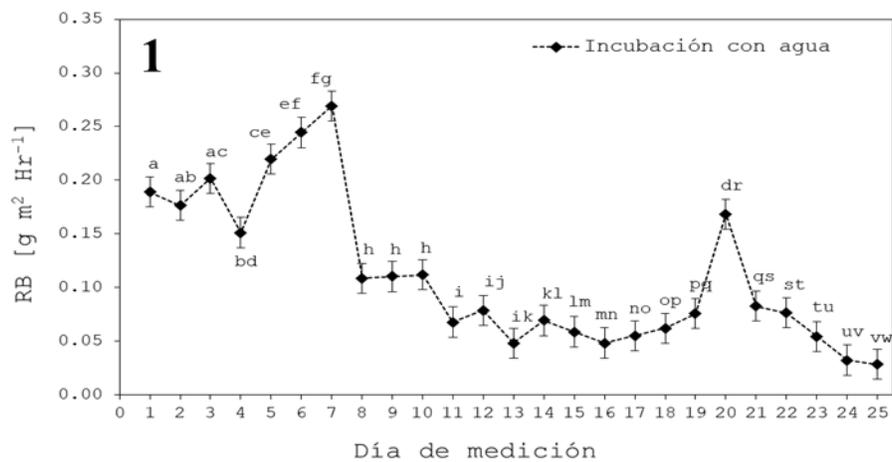


Figura 26. Promedios de la respiración basal (RB) durante el periodo de incubación (1) usando agua como solución electrolítica y (2) con electrolito. Las letras minúsculas iguales indican ausencia de diferencias significativas para la RB entre los días de tratamiento.

En cambio, durante el TEQ con agua (Figura 27 (1)) se observa que la fase de adaptación se da en los primeros 4 días para dar paso a la fase de crecimiento, la cual comprende del día 7 hasta el 14, siendo éste en el que se obtiene un valor máximo de $0.387 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. Desde el día 15 comienza a disminuir pudiendo indicar el agotamiento del sustrato que requieren los microorganismos para su metabolismo [142].

Al usar electrolito durante el TEQ (Figura 27 (2)) se aprecia un incremento del 30% en la RB con respecto del TEQ con agua, registrando un valor máximo de $0.577 \text{ g C-CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ para el día 8; de lo anterior se infiere que el estímulo del campo eléctrico en modo bidireccional propicia el crecimiento de los microorganismos como lo mencionan Huang y colaboradores [71].

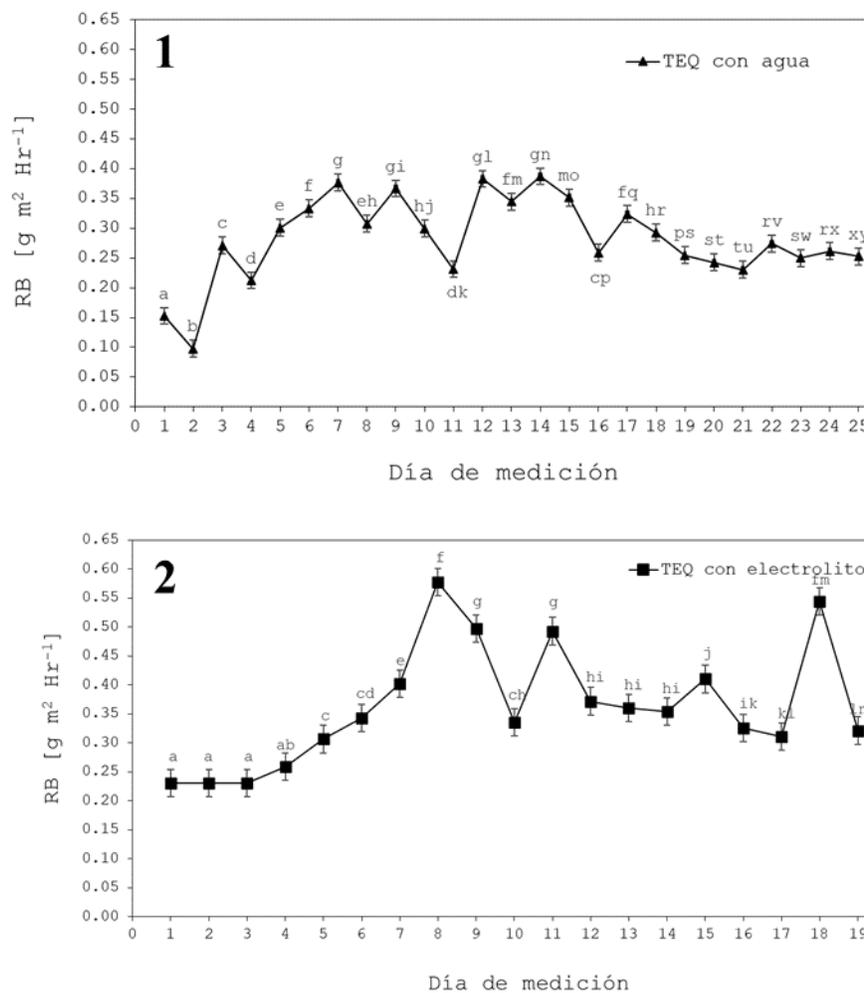


Figura 27. Promedios de la RB observados durante el TEQ con agua (1) y con electrolito (2), las letras minúsculas iguales indican que no existen diferencias significativas durante los sesiones de tratamiento; también se muestran las barras de error estándar.

7.3 Efecto del tratamiento electroquímico sobre el pH y la conductividad eléctrica

El estudio realizado por Bennardi y colaboradores demuestra que los suelos que tengan valores superiores a los de la Tabla 12 tendrán una mayor capacidad buffer ácida y alcalina en comparación con los que estén por debajo de éstos [143]. Comparando con los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica del suelo y su fracción textural (Tabla 10) se puede concluir que el suelo usado en el experimento tendrá una resistencia a la modificación del pH ante la generación de iones H^+ y OH^- por la electrolisis del agua durante el TEQ.

En otras palabras, este suelo tiene la capacidad para mantener el pH dentro de un rango estable aunque se adicionen al sistema ácidos o bases débiles. En la columna a la extrema derecha de la Tabla 12 se indica el cumplimiento de los valores umbrales por el suelo agrícola antes del TEQ.

Tabla 12. Comparación del suelo agrícola con los valores umbrales para determinar la capacidad buffer de acuerdo con Bennardi y colaboradores [143].

Propiedad del suelo		Valor umbral	Valor del suelo agrícola
Materia orgánica	%	> 3	3.17 ± 0.09
Capacidad de Intercambio Catiónica [cmol kg ⁻¹]		> 14	18.2 ± 0.32
Textura			
	Arcilla %	> 20	35 ± 1.6
	Limo %	> 31	35 ± 8
	Arena %	< 40	30 ± 9.5

De acuerdo con el seguimiento del pH del suelo durante la aplicación del TEQ, se confirma esta capacidad buffer. Aunque los valores de pH se mantienen dentro del rango de 8.1 a 8.2 existen diferencias significativas entre los tratamientos y el tipo de solución electrolítica, pues los niveles del pH (Figura 28) durante la incubación con agua (barras gris claro) llegaron en promedio a 8.11 ± 0.02 y con electrolito (barras gris oscuro) a 8.19 ± 0.03 ; así mismo, durante el TEQ con agua se tiene un pH de 8.15 ± 0.02 y de 8.24 ± 0.02 para el electrolito. Indicando además que estos niveles de pH no representan un riesgo para la actividad biológica.

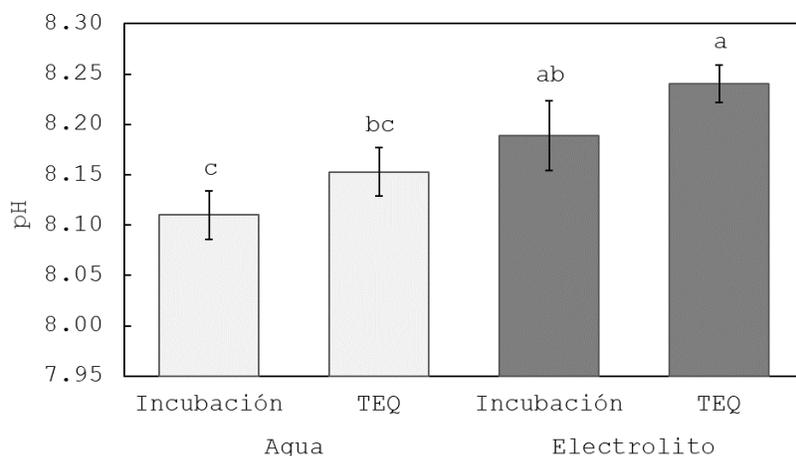


Figura 28. Influencia del TEQ sobre el pH. Las barras de color gris claro representan la fase de incubación y TEQ con agua como solución electrolítica y las de gris oscuro al uso de electrolito. Las barras de error son el error estándar, las letras minúsculas distintas señalan una variación significativa entre la solución electrolítica empleada en los distintos tratamientos. Se presentan los datos promedio y error estándar. Las letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre el tipo de tratamiento con la misma solución electrolítica, de acuerdo con la prueba de Tukey del ANOVA ($p < 0.05$).

La Figura 29 muestra la CE promedio obtenida durante los periodos de incubación y el TEQ para ambas soluciones electrolíticas; al usar agua se obtuvo un valor de CE de $566 \pm 15 \mu\text{S/cm}$, además al final del TEQ con agua se tiene una CE de $703 \pm 29 \mu\text{S/cm}$. Por el contrario, durante el periodo de incubación con el electrolito se nota un incremento en la CE debido a la acumulación progresiva de las sales en el suelo hasta un valor final de $861 \pm 15 [\mu\text{S/cm}]$.

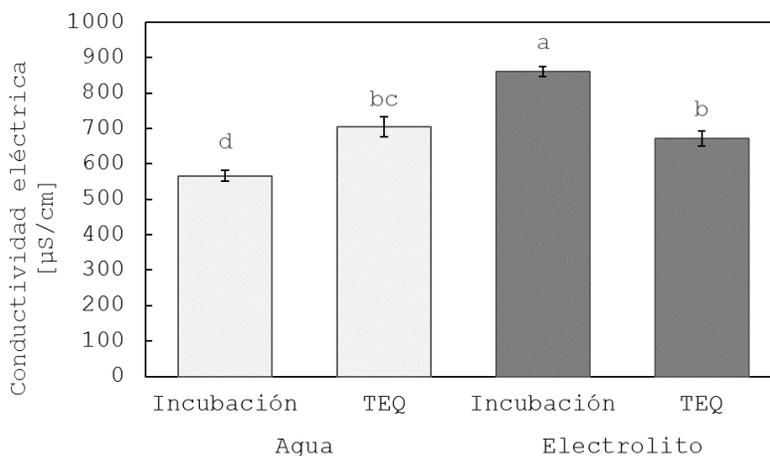


Figura 29. Influencia del TEQ sobre la CE. Las barras de color gris claro representan la fase de incubación y TEQ con agua como solución electrolítica y las de gris oscuro al electrolito. Las barras de error son el error estándar, las letras minúsculas distintas señalan una variación significativa entre la solución electrolítica empleada en los distintos tratamientos. Se presentan los datos promedio y error estándar. Las letras minúsculas distintas indican diferencias significativas entre el tipo de tratamiento con la misma solución electrolítica, de acuerdo con la prueba de Tukey del ANOVA ($p < 0.05$).

El comportamiento del pH y la CE durante el periodo de incubación con agua se aprecia en la Figura 30, observando un ligero incremento del pH, con fluctuaciones entre 7.98 y 8.19 desde el día 1 y hasta el día 13; a partir del día 14 alcanzó un valor de 8.1. Y en la etapa final se mantiene estable con valores cercanos a 8.2. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de óxidos de calcio, carbonatos y a la capacidad buffer del suelo [144,145].

Por otro lado, la CE durante el periodo de incubación con agua se mantiene en el rango de 630 a 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta el día 13 y disminuye de manera continua hasta los 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ porque las sales naturales del suelo fueron lavadas al agregar el agua [141]. Otra razón podría ser que a partir del día 13 los niveles de pH incrementaron de 7.98 a 8.14 precipitando algunas de las sales lo que disminuirá la CE [107].

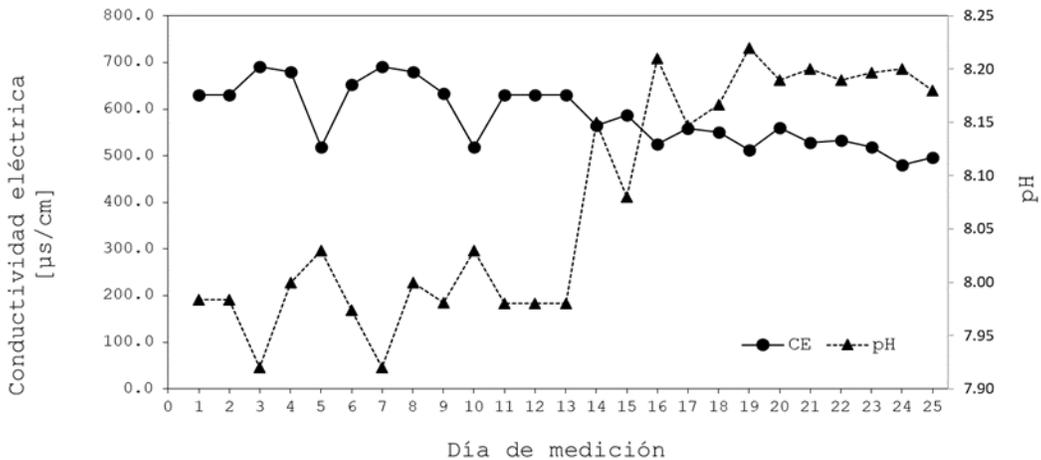


Figura 30. El pH está representado por la línea discontinua y con triángulos como marcadores y la CE es la línea continua con círculos, estos valores fueron registrados durante periodo de incubación con agua.

En contraste, durante el periodo de incubación con electrolito (Figura 31), el incremento del pH de 8.1 a 8.4 se puede explicar por la presencia del NaOH (hidróxido de sodio) que al igual que el $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ (citrato de sodio) es una base fuerte que puede alcalinizar el medio [146].

La CE permaneció dentro del rango de 900 a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta el día 12, pero el día 14 alcanzó una CE de 1,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que puede explicarse debido a la disminución del pH pues desde el día 13 hasta el día 18 se tienen valores de 8.23 y 8.13 e incrementa hasta 8.22 el día 19. Observando una relación inversamente proporcional entre el pH y la CE pues se solubilizan las sales al disminuir el pH (acidificando el medio) e incrementa la CE.

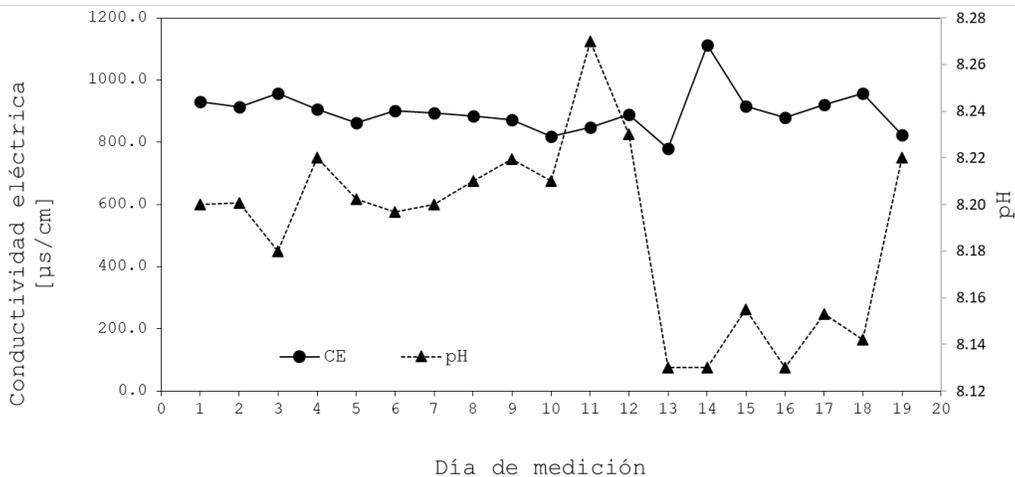


Figura 31. El pH está representado por la línea discontinua con marcadores triangulares y la CE es la línea continua con círculos, valores registrados durante el periodo de incubación con electrolito.

Ahora bien, durante el TEQ con agua (Figura 32) el pH se mantiene estable los primeros 7 días con valores de 8.2, el día 8 disminuye a 8.08 y se mantiene un rango de 7.8 a 8.05 hasta el día 18 a causa de los procesos de mineralización [145], con un aumento el día 19 a 8.4 y 8.3 al final del TEQ debido posiblemente a la precipitación de las sales por operación en modo bidireccional del campo eléctrico; no obstante estas variaciones en el pH no resultan significativas para alterar la composición microbiana o representar una disminución en la funcionalidad del suelo [134].

Al comenzar el TEQ con agua el valor de CE se mantiene estable (520 µS/cm) hasta el día 7 que es donde los niveles de pH comienzan a fluctuar. En el día 8 se observa un incremento del 45% (956 µS/cm) que se mantiene hasta el día 18 y disminuye el día 19 (388 µS/cm) para incrementar de nuevo el día 22 (790 µS/cm) estabilizándose el día 24 con 546 µS/cm.

Por otro lado, en la Figura 33; el pH durante el TEQ se mantiene estable por la presencia del NaOH que neutraliza la producción de H⁺ en el ánodo y el CH₃COOH (ácido acético) que neutraliza los OH⁻ producidos en el cátodo [99,147–151]. Teniendo valores de pH entre 8.2 y 8.3 desde el inicio hasta el día 14 debido al efecto buffer del suelo y el electrolito, en conjunto con la modalidad bidireccional del campo eléctrico como afirman Luo y colaboradores [152].

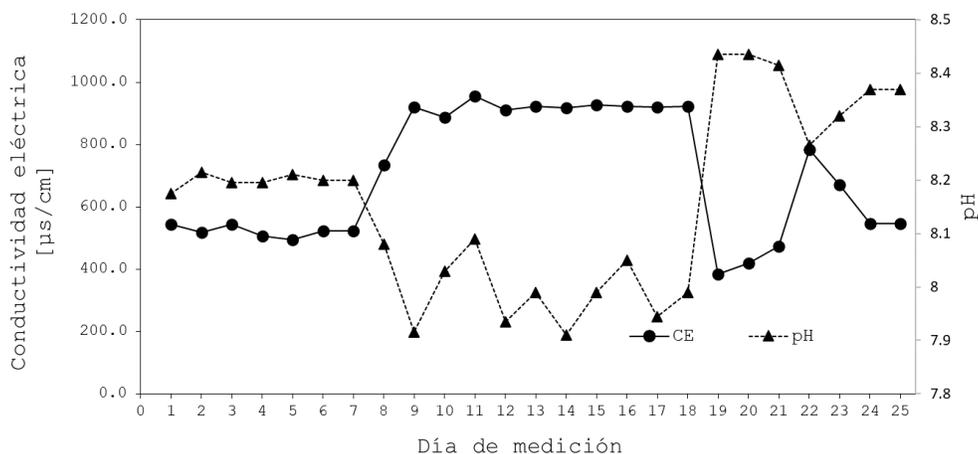


Figura 32. El pH está representado por la línea discontinua con marcadores en triangulo y la CE por la línea continua con círculos, estos valores fueron recopilados durante el TEQ con agua.

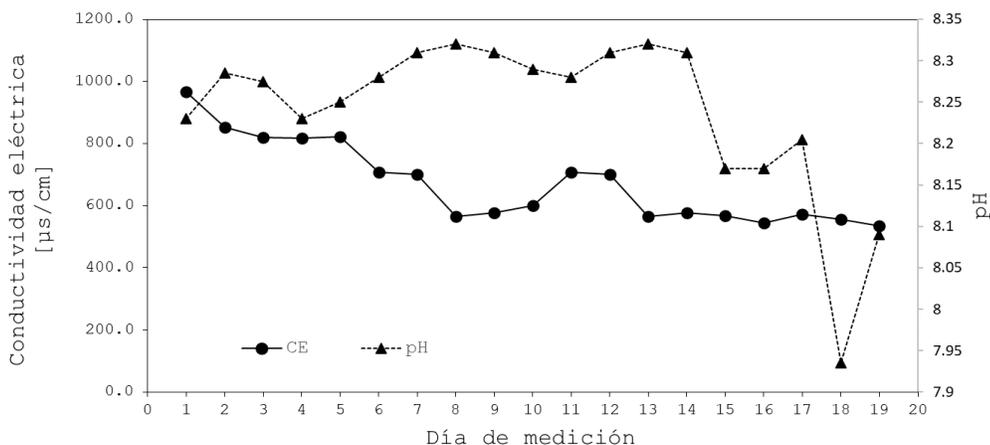


Figura 33. El pH está representado por la línea discontinua con marcadores triangulares y la CE con la línea continua y círculos; estos valores fueron recopilados durante el TEQ con electrolito.

A lo largo del TEQ con electrolito se ve una tendencia a la baja en la CE pues el primer día es de 965 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y hasta el día 8 es de 578 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El día 8 comienza a incrementar (601 $\mu\text{S}/\text{cm}$) por los cambios en el pH hasta el día 12 (700 $\mu\text{S}/\text{cm}$), y se mantiene estable hasta el final del TEQ (entre 535 y 575 $\mu\text{S}/\text{cm}$) debido al transporte y remoción de las sales en el suelo [13].

En otras palabras, al usar el electrolito y mantener la inversión de la polaridad durante el TEQ no existen tantas variaciones en los niveles de pH a lo largo del tiempo, lo que representa condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos (Figura 27).

Este comportamiento de la CE se explica por la solubilización de los iones, lo que provoca el incremento de su concentración en el suelo y la disminución puede deberse al agotamiento de los iones del suelo que fueron removidos por los fenómenos electrocinéticos y precipitados durante el TEQ por los cambios en el nivel del pH [107,153].

De acuerdo con Cameselle y colaboradores la CE tiene una influencia en la distribución del campo eléctrico a lo largo del suelo, lo que se traduce en condiciones adversas para los microorganismos puesto que las comunidades microbianas eligen establecerse en los sitios con mayor intensidad de campo eléctrico [154]; sin embargo, si se reduce la concentración de sales en el suelo se podría evitar la formación de los suelos sódicos y salinos que representan un problema para el desarrollo de los microorganismos [155].

8. Conclusiones

Con los datos obtenidos se puede concluir que el TEQ tiene efectos positivos sobre los microorganismos del suelo lo cual se refleja en un incremento de la RB; este efecto es potenciado por la presencia de una solución electrolítica que contiene sales que mantienen estable la disminución de la CE para mantener una distribución homogénea del campo eléctrico a lo largo del suelo.

El pH es inversamente proporcional a la CE debido a la solubilidad de los cationes y aniones que son transportados durante el TEQ.

La capacidad buffer del suelo es reforzada por los componentes del electrolito como el ácido acético y el citrato de sodio; además ayudaron a controlar el pH al neutralizar la generación de H^+ en la zona anódica y el OH^- en la región catódica, beneficiando a las comunidades microbianas.

9. Recomendaciones para trabajos futuros

Es importante mantener el porcentaje de humedad (35 a 50%) homogéneo en todo el suelo, por lo que se recomienda usar alguna técnica de volteo al finalizar las sesiones diarias de TEQ. Los periodos de incubación podrían llevarse a cabo dentro de las celdas de tratamiento una vez que se encuentre una técnica para remover y homogeneizar la humedad al interior de ellas.

Es necesario optimizar la concentración de los compuestos en la solución electrolítica (nutrientes, agentes quelantes, buffer y sales) para el tipo de suelo en Coahuila de Zaragoza. Disminuir la cantidad y tamaño de los orificios en los porta-electrodos para incrementar el tiempo de residencia del agua dentro de estos, disminuyendo así la cantidad de solución electrolítica empleada durante la electrólisis del agua.

También se recomienda realizar la determinación de contenido de biomasa microbiana para comprobar el porcentaje de sobrevivencia y adaptación de los microorganismos ante el TEQ, observando el coeficiente metabólico para mantener o incrementar la funcionalidad del suelo interpretada a partir de la actividad microbiana, pues los controles sobre el pH y la CE ya han sido establecidos.

Realizar determinaciones texturales al finalizar el TEQ aplicado en un largo plazo para comprobar su aplicación en la recuperación de suelos con problemas de ingeniería edáfica (compresibilidad, plasticidad y humedad).

Es importante comprobar la eficacia del sistema para remover contaminantes como los metales pesados y pesticidas con el TEQ, así como sopesar el efecto de la fuerza de gravedad al suministrar el electrolito por irrigación, proponiendo un arreglo tipo lasaña para los electrodos.

10. Bibliografía

- [1] S.P. McGrath, A.M. Chaudri, K.E. Giller. Long-term effects of metals in sewage sludge on soils, microorganisms and plants. *J. Ind. Microbiol.* 14 (1995) 94-104.
- [2] Y.B. Acar, A.N. Alshwabkeh. Principles of Electrokinetic Remediation. *Environ. Sci. Technol.* 27 (1993) 2638-2647.
- [3] J. Bear, Y. Sun. Optimization of pump-treat-inject (PTI) design for the remediation of a contaminated aquifer: Multi-stage design with chance constraints. *J. Contam. Hydrol.* 29 (1998) 225-244.
- [4] F.I. Khan, T. Husain, R. Hejazi. An overview and analysis of site remediation technologies. *J. Environ. Manage.* 71 (2004) 95-122.
- [5] C.N. Mulligan, R.N. Yong, B.F. Gibbs. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. *Eng. Geol.* 60 (2001) 371-380.
- [6] H. Schimann, C. Petit-Jean, S. Guitet, T. Reis, A.M. Domenach, J.C. Roggy. Microbial bioindicators of soil functioning after disturbance: The case of gold mining in tropical rainforests of French Guiana. *Ecol. Indic.* 20 (2012) 34-41.
- [7] J. Lehmann, D.A. Bossio, I. Kögel-Knabner, M.C. Rillig. The concept and future prospects of soil health. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1 (2020) 544-553.
- [8] Y. García, & W. Ramírez. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso, Soil quality indicators : A new way to evaluate this resource. 35 (2012) 125-138.
- [9] R. López-Vizcaíno, C. Risco, J. Isidro, S. Rodrigo, C. Saez, P. Cañizares, V. Navarro, M.A. Rodrigo. Scale-up of the electrokinetic fence technology for the removal of pesticides. Part II: Does size matter for removal of herbicides? *Chemosphere.* 166 (2017) 549-555.
- [10] K. Heister, A.T. Lima. Soil heterogeneity and surfactant desorption influence PAH distribution during electroremediation at a tar oil–contaminated site. *Environ. Monit. Assess.* 191 (2019) 1-13.
- [11] K. Maturi, K.R. Reddy. Simultaneous removal of organic compounds and heavy metals from soils by electrokinetic remediation with a modified cyclodextrin. *Chemosphere.* 63 (2006) 1022-1031.
- [12] Z.H. Shi, T.J. Dou, H. Zhang, H.X. Huang, N. Zeng. Electrokinetic Remediation of Uranium Contaminated Soil by Ion Exchange Membranes. *Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng.* 10 (2016) 1180-1184.
- [13] C. Liaki, C.D.F. Rogers, D.I. Boardman. Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes. *J. Appl. Electrochem.* 40 (2010) 1225-1237.
- [14] A.T. Yeung, T.B. Scott, S. Gopinath, R.M. Menon, C. Hsu. Design, Fabrication, and Assembly of an Apparatus for Electrokinetic Remediation Studies. *Geotech. Test. J.* 20 (1997) 199-210.

- [15] S. Jayasekera, S. Hall. Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments. *Geotech. Geol. Eng.* 25 (2007) 1-10.
- [16] D. Tjandra, P. Wulandari. Improving Marine Clays with Electrokinetic Method. *Civ. Eng. Dimens.* 9 (2007) 98-102.
- [17] J. Shang, E. Mohamedelhassan, M. Ismail. Electrochemical cementation of offshore calcareous soil. *Can. Geotech. J.* 41 (2004) 877-893.
- [18] A. Yeung. Electrokinetic Flow Processes in Porous Media and Their Applications. *Adv. Porous Media.* 2 (1994) 309-395.
- [19] M. Pazos, M.A. Sanromán, C. Cameselle. Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity exchange technique. *Chemosphere.* 62 (2006) 817-822.
- [20] M. Saleem, M.H. Chakrabarti, M.F. Irfan, S.A. Hajimolana, M.A. Hussain. Electrokinetic Remediation of Nickel From Low Permeability Soil. *Int. J. Electrochem. Sci.* 6 (2011) 4264-4275.
- [21] S. Shin, S. Park, K. Baek. Soil moisture could enhance electrokinetic remediation of arsenic-contaminated soil. (2017) 9820-9825.
- [22] K.R. Reddy, C.Y. Xu, S. Chinthamreddy. Assessment of electrokinetic removal of heavy metals from soils by sequential extraction analysis. *J. Hazard. Mater.* 84 (2001) 279-296.
- [23] K. Reddy G, K. Yarrakula, V. Lakshmi U. Reducing agents enhanced electrokinetic soil remediation (EKSR) for heavy metal contaminated soil. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* 38 (2019) 183-199.
- [24] W.S. Kim, G.Y. Park, D.H. Kim, H.-B. Jung, S.H. Ko, K. Baek. In situ field scale electrokinetic remediation of multi-metals contaminated paddy soil: Influence of electrode configuration. *Electrochim. Acta.* 86 (2012) 89-95.
- [25] R. López Vizcaíno, A. Yustres, L. Asensio, C. Saez, P. Cañizares, M.A. Rodrigo, V. Navarro. Enhanced electrokinetic remediation of polluted soils by anolyte pH conditioning. *Chemosphere.* 199 (2018) 477-485.
- [26] S.H. Kim, H.Y. Han, Y.J. Lee, C.W. Kim, J.W. Yang. Effect of electrokinetic remediation on indigenous microbial activity and community within diesel contaminated soil. *Sci. Total Environ.* 408 (2010) 3162-3168.
- [27] N. Velasco-alvarez, I. González, P. Damian-matsumura, M. Gutiérrez-rojas. Bioresource Technology Enhanced hexadecane degradation and low biomass production by *Aspergillus niger* exposed to an electric current in a model system. *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 1509-1515.
- [28] H. Huang, J. Tang, Z. Niu, J.P. Giesy. Interactions between electrokinetics and rhizoremediation on the remediation of crude oil-contaminated soil. *Chemosphere.* 229 (2019) 418-425.
- [29] R. Bi, M. Schlaak, E. Siefert, R. Lord, H. Connolly. Influence of electrical fields (AC and DC) on phytoremediation of metal polluted soils with rapeseed (*Brassica napus*) and

- tobacco (*Nicotiana tabacum*). *Chemosphere*. 83 (2011) 318-326.
- [30] J.-M. Lim, A. Salido, D. Butcher. Phytoremediation of lead using Indian mustard (*Brassica juncea*) with EDTA and electrodes. *Microchem. J.* 76 (2004) 3-9.
- [31] H. Aboughalma, R. Bi, M. Schlaak. Electrokinetic enhancement on phytoremediation in Zn, Pb, Cu and Cd contaminated soil using potato plants. *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.* 43 (2008) 926-933.
- [32] T. Marañón, E. Madejón. Funciones Del Suelo y Servicios Ecosistémicos: Importancia De La Materia Orgánica. *Jornadas La Red Española Compost.* 16 (2016) 1-37.
- [33] L.R. Oldeman. *Guidelines for General Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation*, Wageningen, 1988.
- [34] GTIS. Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) Resumen Técnico, 1st.ed., Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, 2016.
- [35] SEMARNAT.in: Dirección General de Estadística e Información Ambiental (Ed.), Suelo, Inf. La Situación Del Medio Ambient. En México, 3rd ed., Ciudad de México, 2019, pp. 175-217.
- [36] C. Guevara.in: Suelos, Inf. La Situación Del Medio Ambiente En México. Compend. Estadísticas Ambient. Indicadores Clave y Desempeño Ambient., 18th ed., Ciudad de México, 2018, pp. 153-190.
- [37] CEDRSSA. El suelo, un recurso invaluable para la producción de alimentos, Ciudad de México, 2019.
- [38] M. Andrades, A. Moliner, A. Masaguer.in: U. de la Rioja (Ed.), Prácticas de edafología : métodos didácticos para análisis de suelos, Mater. Didáctico. Agric. y Aliment., Servicio de Publicaciones, Logroño, 2015, p. 82.
- [39] J.L. Havlin. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*, 6th ed., Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [40] J. Porta Casanellas, M. López-Acevedo Reguerin, C. Roquero de Laburu. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, 3^a, Mundi-Prensa, Madrid, 2003.
- [41] P. Nannipieri, J. Ascher, M.T. Ceccherini, L. Landi, G. Pietramellara, G. Renella. Microbial diversity and soil functions. *Eur. J. Soil Sci.* 54 (2003) 655-670.
- [42] B. Ortiz, J. Sanz, M. Dorado, S. Villar. *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*, Madrid, 2007.
- [43] M. Budhu. *Soil Mechanics and Foundations*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Arizona, 2008.
- [44] R. Weil, N. Brady. *The Nature and Properties of Soils.* 15th edition, 2017.
- [45] S. Marinari, R. Mancinelli, E. Campiglia, S. Grego. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol. Indic.* 6 (2006) 701-711.
- [46] F. Bastida, A. Zsolnay, T. Hernández, C. García. Past, present and future of soil quality

- indices: A biological perspective. *Geoderma*. 147 (2008) 159-171.
- [47] J. Harris. Soil Microbial Communities and Restoration Ecology: Facilitators or Followers? *Science*. 325 (2009) 573-574.
- [48] M.E. Summer. Handbook of soil science, 1st ed., CRC Press, Boca Raton Florida, 2000.
- [49] J. Virkutyte, M. Sillanpää, P. Latostenmaa. Electrokinetic soil remediation - Critical overview. *Sci. Total Environ*. 289 (2002) 97-121.
- [50] R. Lal, M.K. Shukla. Principles of Soil Physics, 1st ed., CRC Press, Boca Raton Florida, 2004.
- [51] C. Pereira, C. Maycotte, B. Restrepo, F. Mauro, A. Montes, M.J. Velarde. Edafología, 1^{ra} ed., Espacio Gráfico Comunicaciones S.A., Caldas, 2011.
- [52] I. Gonzáles Ornelas. Almacenes de carbono orgánico en tres sitios con diferente cobertura vegetal de la zona federal del ex-lago de texcoco, Universidad Autónoma del Estado de México, 2014.
- [53] L.C. Fernández Linares, N.G. Rojas Avelizapa, T.G. Roldán Carrillo, M.E. Ramírez Islas, H.G. Zegarra Martínez. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados, 1st ed., Instituto Mexicano del Petróleo, Ciudad de México, 2006.
- [54] M.V. Cremona, A.S. Enríquez. ALGUNAS PROPIEDADES DE SUELO QUE CONDICIONAN SU COMPORTAMIENTO: El pH y la conductividad eléctrica. *Presencia*. 73 (2020) 5-8.
- [55] G.W. Thomas. in: Soil pH and Soil Acidity, Methods Soil Anal. Part 3 Chem. Methods, Soil Science Society of American Society of Agronomy, Wisconsin, 1996, pp. 475-490.
- [56] SEMARNAT. NOM-021-SEMARNAT-2000, Ciudad de México, 2002.
- [57] O. Dilly, H.P. Blume, U. Sehy, M. Jimenez, J.C. Munch. Variation of stabilised, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices. *Chemosphere*. 52 (2003) 557-569.
- [58] J. Curiel Yuste, D.D. Baldocchi, A. Gershenson, A. Goldstein, L. Misson, S. Wong. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. *Glob. Chang. Biol*. 13 (2007) 2018-2035.
- [59] C.L. Phillips, N. Nickerson. in: Soil Respiration, Ref. Modul. Earth Syst. Environ. Sci., 3rd ed., Elsevier Inc., 2015, pp. 1-20.
- [60] J.R. Vásquez, F. Macías, J.C. Menjivar. Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*. 25 (2013) 175-180.
- [61] P. She, B. Song, X.-H. Xing, M. van Loosdrecht, Z. Liu. Electrolytic Stimulation of Bacteria *Enterobacter dissolvens* by a Direct Current. *Biochem. Eng. J*. 28 (2006) 23-29.
- [62] A. Valle, E. Zanardini, P. Abbruscato, P. Argenzio, G. Lustrato, G. Ranalli, C. Sorlini. Effects of low electric current (LEC) treatment on pure bacterial cultures. *J. Appl. Microbiol.*

103 (2007) 1376-1385.

- [63] I.R. Estrada-Herrera, C. Hidalgo-Moreno, R. Guzmán-Plazola, J.J. Almaraz Suárez, H. Navarro-Garza, J.D. Etchevers-Barra. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51 (2017) 813-831.
- [64] A. Azman, A.M. Carmen. *Tecnologías físico-químicas en la regeneración de suelos contaminados*, Universidad de Sevilla, 2018.
- [65] D. Lestan, C. Luo, X. Li. The use of chelating agents in the remediation of metal-contaminated soils: a review. *Environ. Pollut.* 153 (2008) 3-13.
- [66] G. Dermont, M. Bergeron, G. Mercier, M. Richer-Laflèche. Soil washing for metal removal: a review of physical/chemical technologies and field applications. *J. Hazard. Mater.* 152 (2008) 1-31.
- [67] J. Scullion. Remediating polluted soils. *Naturwissenschaften*. 93 (2006) 51-65.
- [68] L. Liu, W. Li, W. Song, M. Guo. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Sci. Total Environ.* 633 (2018) 206-219.
- [69] K.R. Reddy, J.A. Adams, C. Richardson. Potential technologies for remediation of brownfields. *Pract. Period. Hazardous, Toxic, Radioact. Waste Manag.* 3 (1999) 61-68.
- [70] A. Saini, D.N. Bekele, S. Chadalavada, C. Fang, R. Naidu. A review of electrokinetically enhanced bioremediation technologies for PHS. *J. Environ. Sci. (China)*. 88 (2020) 31-45.
- [71] D. Huang, S. Guo, T. Li, B. Wu. Coupling interactions between Electrokinetics and Bioremediation for Pyrene Removal from soil under Polarity Reversal Conditions. *Clean - Soil, Air, Water*. 41 (2013) 383-389.
- [72] K. Maturi, K.R. Reddy, C. Cameselle. Sequential Electrokinetic Remediation of Mixed Contaminants in Low Permeability Soils. *J. Environ. Eng.* 135 (2009) 989-998.
- [73] J. Wang, X. Feng, C.W.N. Anderson, Y. Xing, L. Shang. Remediation of mercury contaminated sites - A review. *J. Hazard. Mater.* 221-222 (2012) 1-18.
- [74] G.F. Caiza Caiza. *Mercurio en el suelo contaminación y remediación*. (2018).
- [75] R. López-Vizcaíno, C. Risco, J. Isidro, S. Rodrigo, C. Saez, P. Cañizares, V. Navarro, M.A. Rodrigo. Scale-up of the electrokinetic fence technology for the removal of pesticides. Part II: Does size matter for removal of herbicides? *Chemosphere*. 166 (2017) 549-555.
- [76] R. Lageman. Electroreclamation: Applications in the Netherlands. *Environ. Sci. Technol.* 27 (1993) 2648-2650.
- [77] K.R. Reddy, R.E. Saichek. Effect of Soil Type on Electrokinetic Removal of Phenanthrene Using Surfactants and Cosolvents. *J. Environ. Eng.* 129 (2003) 336-346.
- [78] R. Iyer. Electrokinetic remediation. Part. *Sci. Technol.* 19 (2001) 219-228.
- [79] A.N. Alshawabkeh, A.T. Yeung, M.R. Bricka. Practical Aspects of In-Situ Electrokinetic Extraction. *J. Environ. Eng.* 125 (1999) 27-35.

- [80] F. Méndez, F. Fernández-Luqueño. Una revolución electrizante. *Av. y Perspect.* 6 (2020).
- [81] R.F. Probst, R.E. Hicks. Removal of contaminants from soils by electric fields. *Science.* 260 (1993) 498-503.
- [82] A. Yeung. Contaminant Extractability by Electrokinetics. *Environ. Eng. Sci.* 23 (2006) 202-224.
- [83] J. Schimel, T.C. Balser, M. Wallenstein. Microbial Stress-Response Physiology and its Implications for Ecosystem Function. *Ecology.* 88 (2007) 1386-1394.
- [84] N. Fierer, R.B. Jackson. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 103 (2006) 626-631.
- [85] D.A. De la Rosa, M.M.M. Teutli, M.E. Ramírez. Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23 (2007) 129-138.
- [86] G.C. c. Yang, S.L. Lin. Removal of lead from a silt loam soil by electrokinetic remediation. *J. Hazard. Mater.* 58 (1998) 285-299.
- [87] A.T. Yeung. Contaminant Extractability by Electrokinetics. *Environ. Eng. Sci.* 23 (2005) 202-224.
- [88] G. Sposito. On Points of Zero Charge. *Environ. Sci. Technol.* 32 (1998) 2815-2819.
- [89] Y.-Y. Gu, A.T. Yeung. Desorption of cadmium from a natural Shanghai clay using citric acid industrial wastewater. *J. Hazard. Mater.* 191 (2011) 144-149.
- [90] J.D. Desai, I.M. Banat. Microbial production of surfactants and their commercial potential. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 61 (1997) 47-64.
- [91] C.-S. Jeon, J.-S. Yang, K.-J. Kim, K. Baek. Electrokinetic Removal of Petroleum Hydrocarbon from Residual Clayey Soil Following a Washing Process. *CLEAN – Soil, Air, Water.* 38 (2010) 189-193.
- [92] Ö. Hanay, H. Hasar, N.N. Koçer, O. Ozdemir. Removal of Pb from sewage sludge by electrokinetics: Effect of pH and washing solution type. *Environ. Technol.* 30 (2009) 1177-1185.
- [93] G.C. Yang, Y. Long. Removal and degradation of phenol in a saturated flow by in-situ electrokinetic remediation and Fenton-like process. *J. Hazard. Mater.* 69 (1999) 259-271.
- [94] S.-S. Kim, J.-H. Kim, S.-J. Han. Application of the electrokinetic-Fenton process for the remediation of kaolinite contaminated with phenanthrene. *J. Hazard. Mater.* 118 (2005) 121-131.
- [95] R.K. Reddy, C. Supraja. Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals in Glacial Till Soils Using Different Electrolyte Solutions. *J. Environ. Eng.* 130 (2004) 442-455.
- [96] S. Barba, M. Carvela, J. Villaseñor, M.A. Rodrigo, P. Cañizares. Improvement of the electro-bioremediation process of a non-polar herbicide-polluted soil by means of surfactant addition. *Sci. Total Environ.* 650 (2019) 1961-1968.

- [97] E. Mena, J. Villaseñor, M.A. Rodrigo, P. Cañizares. Electrokinetic remediation of soil polluted with insoluble organics using biological permeable reactive barriers: Effect of periodic polarity reversal and voltage gradient. *Chem. Eng. J.* 299 (2016) 30-36.
- [98] S.K. Puppala, A.N. Alshwabkeh, Y.B. Acar, R.J. Gale, M. Bricka. Enhanced electrokinetic remediation of high sorption capacity soil. *J. Hazard. Mater.* 55 (1997) 203-220.
- [99] H.H. Lee, J.W. Yang. A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation. *J. Hazard. Mater.* 77 (2000) 227-240.
- [100] B. Reed, M. Berg, J. Thompson, H. Hatfield. Chemical Conditioning of Electrode Reservoirs during Electrokinetic Soil Flushing of Pb-Contaminated Silt Loam. *J. Environ. Eng.* 121 (1995) 805-815.
- [101] H. Xu, Y. Song, L. Cang, D. Zhou. Ion exchange membranes enhance the electrokinetic in situ chemical oxidation of PAH-contaminated soil. *J. Hazard. Mater.* 382 (2020) 121042.
- [102] W.S. Kim, S.O. Kim, K.W. Kim. Enhanced electrokinetic extraction of heavy metals from soils assisted by ion exchange membranes. *J. Hazard. Mater.* 118 (2005) 93-102.
- [103] Z. Li, J.W. Yu, I. Neretnieks. Electroremediation: Removal of heavy metals from soils by using cation selective membrane. *Environ. Sci. Technol.* 32 (1998) 394-397.
- [104] S. Bebelis, K. Bouzek, A. Cornell, M.G.S. Ferreira, G.H. Kelsall, F. Lapique, C. Ponce de León, M.A. Rodrigo, F.C. Walsh. Highlights during the development of electrochemical engineering. *Chem. Eng. Res. Des.* 91 (2013) 1998-2020.
- [105] B.S. Haran, B.N. Popov, G. Zheng, R.E. White. Development of a new electrokinetic technique for decontamination of hexavalent chromium from low surface charged soils. *Environ. Prog.* 15 (1996) 166-172.
- [106] S. V Ho, C. Athmer, P.W. Sheridan, B.M. Hughes, R. Orth, D. McKenzie, P.H. Brodsky, A. Shapiro, R. Thornton, J. Salvo, D. Schultz, R. Landis, R. Griffith, S. Shoemaker. The Lasagna Technology for In Situ Soil Remediation. 1. Small Field Test. *Environ. Sci. Technol.* 33 (1999) 1086-1091.
- [107] R. López-Vizcaíno, C. Risco, J. Isidro, S. Rodrigo, C. Saez, P. Cañizares, V. Navarro, M.A. Rodrigo. Scale-up of the electrokinetic fence technology for the removal of pesticides. Part I: Some notes about the transport of inorganic species. *Chemosphere.* 166 (2017) 540-548.
- [108] A.T. Yeung, C.N. Hsu, R.M. Menon. EDTA-enhanced electrokinetic extraction of lead. *J. Geotech. Eng.* 122 (1996) 666-673.
- [109] M. Jelusic, D. Vodnik, I. Macek, D. Lestan. Effect of EDTA washing of metal polluted garden soils. Part II: Can remediated soil be used as a plant substrate? *Sci. Total Environ.* 475 (2014) 142-152.
- [110] J. Xu, C. Liu, P.C. Hsu, J. Zhao, T. Wu, J. Tang, K. Liu, Y. Cui. Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry. *Nat. Commun.* 10 (2019) 1-8.
- [111] S. Shevade, R.G. Ford. Use of synthetic zeolites for arsenate removal from pollutant water. *Water Res.* 38 (2004) 3197-3204.

- [112] A. Enmili, F. Monette, C. Yahiat, M. Amor, A. Hedhli, A. Azzouz. Aluminosilicate-catalyzed electrochemical removal of ammonium cation from water - kinetics and selectivity. *Environ. Res.* 185 (2020) 109412.
- [113] F. Ruggieri, V. Marín, D. Gimeno, J.L. Fernandez-Turiel, M. García-Valles, L. Gutierrez. Application of zeolitic volcanic rocks for arsenic removal from water. *Eng. Geol.* 101 (2008) 245-250.
- [114] A. de J. Montes-Luna, N.C. Fuentes-López, Y.A. Perera-Mercado, O. Pérez-Camacho, G. Castruita-de León, S.P. García-Rodríguez, M. García-Zamora. Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca^{2+} por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases. *Superf. y Vacío*. 28 (2015) 5-11.
- [115] R.B. Fu, F. Liu, C.B. Zhang, J. Ma. Effects of permeable reactive composite electrodes on hexavalent chromium in the electrokinetic remediation of contaminated soil. *Environ. Eng. Sci.* 30 (2013) 17-22.
- [116] R.B. Fu, X.X. Liu, F. Liu, J. Ma, Y.M. Ma, C.B. Zhang, J. Zhu. Electrokinetic remediation of heavy metal contaminated soil using permeable reactive composite electrodes. *Adv. Mater. Res.* 518-523 (2012) 361-368.
- [117] O. Ursini, E. Lilla, R. Montanari. The investigation on cationic exchange capacity of zeolites: The use as selective ion trappers in the electrokinetic soil technique. *J. Hazard. Mater.* 137 (2006) 1079-1088.
- [118] G. Beretta, A.F. Mastorgio, L. Pedrali, S. Saponaro, E. Sezenna. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 18 (2019) 29-75.
- [119] X. Fan, H. Wang, Q. Luo, J. Ma, X. Zhang. The use of 2D non-uniform electric field to enhance in situ bioremediation of 2,4-dichlorophenol-contaminated soil. *J. Hazard. Mater.* 148 (2007) 29-37.
- [120] M.J. Harbottle, G. Lear, G.C. Sills, I.P. Thompson. Enhanced biodegradation of pentachlorophenol in unsaturated soil using reversed field electrokinetics. *J. Environ. Manage.* 90 (2009) 1893-1900.
- [121] D. Huang, Q. Xu, J. Cheng, X. Lu, H. Zhang. Electrokinetic remediation and its combined technologies for removal of organic pollutants from contaminated soils. *Int. J. Electrochem. Sci.* 7 (2012) 4528-4544.
- [122] S.-H. Kim, H.-Y. Han, Y.-J. Lee, C.W. Kim, J.-W. Yang. Effect of electrokinetic remediation on indigenous microbial activity and community within diesel contaminated soil. *Sci. Total Environ.* 408 (2010) 3162-3168.
- [123] Q. Luo, H. Wang, X. Zhang, X. Fan, Y. Qian. In situ bioelectrokinetic remediation of phenol-contaminated soil by use of an electrode matrix and a rotational operation mode. *Chemosphere.* 64 (2006) 415-422.
- [124] E. Mena, J. Villaseñor, P. Cañizares, M.A. Rodrigo. Influence of electric field on the remediation of polluted soil using a biobarrier assisted electro-bioremediation process. *Electrochim. Acta.* 190 (2016) 294-304.

- [125] SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis., Ciudad de México, 2002.
- [126] J.H. Sato. Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. *Sci. Agric.* 71 (2014) 259-343.
- [127] H. Medina Gonzales, J. García Coronado, D. Núñez Acosta. El método del hidrómetro : base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Ciencias Técnicas Agropecu.* 16 (2007) 19-24.
- [128] United States Of Department Agriculture (USDA). Soil Quality Test Kit Guide. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. (1999) 88.
- [129] O.H. Elsayed-Ali, T. Abdel-Fattah, H.E. Elsayed-Ali. Copper cation removal in an electrokinetic cell containing zeolite. *J. Hazard. Mater.* 185 (2011) 1550-1557.
- [130] M. Pazos, A. Plaza, M. Martín, M.C. Lobo. The impact of electrokinetic treatment on a loamy-sand soil properties. *Chem. Eng. J.* 183 (2012) 231-237.
- [131] R. Ortiz-Soto, D. Leal, C. Gutierrez, A. Aracena, A. Rojo, H.K. Hansen. Electrokinetic remediation of manganese and zinc in copper mine tailings. *J. Hazard. Mater.* 365 (2019) 905-911.
- [132] Z. Li, J.-W. Yu, I. Neretnieks. Electroremediation: Removal of Heavy Metals from Soils by Using Cation Selective Membrane. *Environ. Sci. Technol.* 32 (1998) 394-397.
- [133] A.H. Elsayed-Ali, T. Abdel-Fattah, H.E. Elsayed-Ali. Laboratory experiment on electrokinetic remediation of soil. *J. Chem. Educ.* 88 (2011) 1126-1129.
- [134] E. Mena, J. Villaseñor, P. Cañizares, M. Rodrigo. Effect of electric field on the performance of soil electro-bioremediation with a periodic polarity reversal strategy. *Chemosphere.* 146 (2016) 300-307.
- [135] G. Lear, M. Harbottle, C. van der Gast, S. Jackman, C.J. Knowles, G. Sills, I.P. Thompson. The Effect of Electrokinetics on Soil Microbial Communities. *Soil Biol. Biochem.* 36 (2004) 1751-1760.
- [136] G. Lear, M.J. Harbottle, G. Sills, C.J. Knowles, K.T. Semple, I.P. Thompson. Impact of electrokinetic remediation on microbial communities within PCP contaminated soil. *Environ. Pollut.* 146 (2007) 139-146.
- [137] A.T. Yeung, Y.Y. Gu. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils. *J. Hazard. Mater.* 195 (2011) 11-29.
- [138] F. Parménides. Efecto del silicio en la fertilidad del suelo, en la incidencia de enfermedades y el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) var CR 4477 Código 5402-2151-8601. (2012) 61.
- [139] F. Navarro García, M.Á. Casermeiro, J. Schimel. When structure means conservation: Effect of aggregate structure in controlling microbial responses to rewetting events. *Soil Biol. Biochem.* 44 (2012) 1-8.

- [140] Y.V. Castro-Mancilla, B.I. Castro-Meza, F.R. De Garza-Requena, P. Rivera-Ortiz, L.H.-R.Y.P. Ortiz-Carrizales. Variación de las Poblaciones Microbianas del Suelo por la Adición de Hidrocarburos. *Terra Lationoamericana*. 31 (2013) 221-230.
- [141] R. Villafañe, N. DeLeón, F. Camacho, R. Ramírez, L. Sánchez. Acumulación y lavado de sales en columnas de suelo regadas con agua salina procedente de un pozo petrolero. *Agron. Trop.* 54 (2004) 1-19.
- [142] J.P. Schimel. Life in dry soils: Effects of drought on soil microbial communities and processes. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 49 (2018) 409-432.
- [143] D.O. Bennardi, G.A. Díaz, L.J.G. Millan, A.E. Pellegrini, M.E. Vázquez. Evaluación de la capacidad buffer de suelos ácidos de la región pampeana. *Cienc. Del Suelo*. 36 (2018) 30-38.
- [144] K.I. Paul, A.S. Black, M.K. Conyers. Influence of fallow, wheat and subterranean clover on pH within an initially mixed surface soil in the field. *Biol. Fertil. Soils*. 33 (2001) 41-52.
- [145] Monsalve Óscar, J. Gutiérrez, W. Cardona. Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo . Una revisión, Factors involved in the process of nitrogen mineralization when organic amendments are added to a soil. A review. *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*. 11 (2017) 200-209.
- [146] X. Yang, L. Liu, W. Tan, C. Liu, Z. Dang, G. Qiu. Remediation of heavy metal contaminated soils by organic acid extraction and electrochemical adsorption. *Environ. Pollut.* 264 (2020) 114745.
- [147] B.G. Ryu, G.Y. Park, J.W. Yang, K. Baek. Electrolyte conditioning for electrokinetic remediation of As, Cu, and Pb-contaminated soil. *Sep. Purif. Technol.* 79 (2011) 170-176.
- [148] J.S. Yang, M.J. Kwon, J. Choi, K. Baek, E.J. O'Loughlin. The transport behavior of As, Cu, Pb, and Zn during electrokinetic remediation of a contaminated soil using electrolyte conditioning. *Chemosphere*. 117 (2014) 79-86.
- [149] K.R. Reddy, R.E. Saichek, K. Maturi, P. Ala. Concentrations on Electrokinetic Remediation. 32 (2002).
- [150] B.E. Reed, M.T. Berg, J.C. Thompson, J.H. Hatfield. Chemical conditioning of electrode reservoirs during electrokinetic soil flushing of Pb-contaminated silt loam. *J. Environ. Eng. (United States)*. 121 (1995) 805-815.
- [151] R.S. Putra, A.I. Amalia, N.Z. Jannah. Assessing the effect of weak and strong acids as electrolytes in the removal of cesium by soil electrokinetic remediation. *Indones. J. Chem.* 21 (2021) 118-127.
- [152] Q. Luo, X. Zhang, H. Wang, Y. Qian. The use of non-uniform electrokinetics to enhance in situ bioremediation of phenol-contaminated soil. 121 (2005) 187-194.
- [153] S. Barba, J. Villaseñor, M.A. Rodrigo, P. Cañizares. Effect of the polarity reversal frequency in the electrokinetic-biological remediation of oxyfluorfen polluted soil. *Chemosphere*. 177 (2017) 120-127.

- [154] C. Cameselle, S. Gouveia, & S. Urréjola. Benefits of phytoremediation amended with DC electric field. Application to soils contaminated with heavy metals. *Chemosphere*. 229 (2019) 481-488.
- [155] G. Courel. Suelos Salinos y Sódicos. *Cátedra de Edafología*. 53 (2019) 1-8.