



Centro Universitario de la Defensa En la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación de la fitorremediación mejorada con corriente eléctrica para la recuperación de suelos contaminados.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Martínez de Baños Martínez de Morentin

DIRECTORES: Santiago Urréjola Madriñán

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



**Centro Universitario de la Defensa
En la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluación de la fitorremediación mejorada con corriente eléctrica para la recuperación de suelos contaminados.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La fitorremediación es una técnica diseñada para la recuperación de suelos contaminados en la que se utilizan plantas verdes que crecen directamente sobre el suelo contaminado. En esta tecnología, las plantas actúan como elemento remediador atrapando metales y degradando contaminantes orgánicos. La actividad remediadora de la planta puede mejorarse si se somete el suelo a una corriente eléctrica de baja intensidad, ya que ésta es capaz de movilizar los contaminantes y los nutrientes que son absorbidos por las raíces mejorando tanto el desarrollo de la planta como la eliminación de los contaminantes. La aplicación directa de una corriente eléctrica a un suelo húmedo va a dar lugar a una acidificación en el entorno del ánodo y una subida de pH en el entorno del cátodo, debido a la electrólisis del agua. Los cambios de pH muy pronunciados van a afectar negativamente al crecimiento de las plantas y por tanto a su capacidad remediadora. En este trabajo se va a estudiar cómo el campo eléctrico afecta a las propiedades del suelo en términos de pH y conductividad eléctrica. Se pretende determinar cuáles son las condiciones en las que se puede aplicar un campo eléctrico sin que se produzcan cambios dramáticos del pH del suelo que afecten al crecimiento de las especies: *Phalaris canariensis*, *Brassica rapa* y *Zea mays* que han sido seleccionadas como especies con capacidad remediadora de suelos contaminados con metales pesados y contaminantes orgánicos.

PALABRAS CLAVE

Electro-migración, Fitorremediación, Descontaminación, Electroodos, Diferencia de potencial, Remediación.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer estas líneas a mi tutor el sr. D. Santiago Urréjola Madriñán y al profesor titular de la Universidad de Vigo el sr. D. Claudio Cameselle Fernández por su elevada constancia y dedicación que han hecho posible la realización del presente trabajo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	2
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Introducción	5
1.2 Objetivos	9
2 Estado del arte	10
2.1 Características generales	10
2.2 Remediación Electrocinética.....	12
2.3 Técnicas de transporte.....	13
2.4 Fitorremediación	15
3 Desarrollo del TFG.....	19
3.1 Descripción inicial del proceso experimental.	19
3.2 Desarrollo experimento Número 1	20
3.3 Desarrollo experimento Número 2.....	25
3.4 Desarrollo experimento Número 3.....	27
4 Resultados	34
4.1 Resultados obtenidos de los tres procesos experimentales.	34
4.2 Resultados obtenidos del experimento Número 1.....	34
4.3 Resultados obtenidos del experimento Número 2.....	43
4.4 Resultados obtenidos del experimento Número 3.....	49
5 Conclusiones y líneas futuras	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Líneas futuras	61
6 Bibliografía.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 China, Usa, Brasil, Indonesia y Japón son los países más contaminados del mundo. [3]	6
Figura 1.4 Contaminación del suelo por causas naturales. Volcán Alcabuco. [6]	8
Figura 2.1 Tratamiento ex situ para descontaminar la tierra. [10]	10
Figura 2.2 Efecto del fluido sobre el factor de permeabilidad de distintos tipos de suelo. [8]	11
Figura 2.3 Esquema básico in situ del proceso de electro remediación del suelo. [12]	12
Figura 2.4 La electro-migración supone la base para el estudio en este campo. [8]	13
Figura 2.5 Fito-tecnologías de la planta [16]	16
Figura 3.1 Muestras de los tres tipos de suelos utilizados para el estudio experimental.	19
Figura 3.2 Disposición de las tiras de grafito sobre una de las muestras de tierra.	21
Figura 3.3 Muestra de una de las disoluciones.	22
Figura 3.4 Medición del pH aplicado a cada muestra	23
Figura 3.5 Aplicación del voltaje sobre cada una de las muestras de tierra.	24
Figura 3.6 Muestras de tierra sobre las gradillas.	25
Figura 3.7 Medición de la humedad.	26
Figura 3.8 Proceso de recogida de muestras en tubos de ensayo	26
Figura 3.9 Preparación de la mezcla sobre el cubo.	27
Figura 3.10 Vertido equitativo sobre los envases de la tierra mezclada.	28
Figura 3.11 <i>Phalaris canariensis</i> , <i>Brassica rapa</i> y <i>Zea mays</i>	28
Figura 3.12 Disposición de las tres tierras cultivadas	29
Figura 3.13 Aplicación y distribución de las semillas sobre la mezcla terrestre.	30
Figura 3.14 Desarrollo del crecimiento de la semilla durante el segundo periodo de aplicación	30
Figura 3.15 Crecimiento de la planta durante el cuarto día de aplicación del proceso de electro migración.	31
Figura 3.16 Imagen del Brassica rapa tras el quinto día experimental.	31
Figura 3.17 Crecimiento de la planta durante los últimos días que duró el experimento.	32
Figura 4.1 Gráfica comparativa del pH de los tres suelos	37
Figura 4.2 Gráfica comparativa de la conductividad de los tres suelos	38
Gráfica Figura 4.3 Comparativa en días sobre la diferencia de potencial en el suelo número 1	40
Figura 4.4 Comparativa en días sobre la diferencia de potencial en el suelo número 2	41
Figura 4.5 Comparativa en días sobre la diferencia de potencial en la tierra número 3	42
Figura 4.6 Gráfica comparativa del pH (experimento número 2)	44
Figura 4.7 Gráfica comparativa de la conductividad (experimento número 2)	45
Figura 4.8 Evolución gráfica durante una aplicación de 10 V entre ánodo y cátodo.	46

Figura 4.9 Evolución gráfica durante una aplicación de 20 V entre ánodo y cátodo.....	47
Figura 4.10 Evolución gráfica durante una aplicación de 40 V entre ánodo y cátodo.....	48
Figura 4.11 Evolución gráfica en intensidad de corriente durante el experimento	50
Figura 4.12 Gráfica comparativa del pH (experimento número 3)	51
Figura 4.13 Gráfica comparativa de la conductividad (experimento número3).....	52
Figura 4.14 Evolución diferencia de potencial del cultivo de <i>P.canariensis</i>	53
Figura 4.15 Crecimiento <i>P.canariensis</i> hasta una altura media de 11 cm	54
Figura 4.16 Evolución diferencia de potencial del cultivo de <i>B.rapa</i>	55
Figura 4.17 Desarrollo del <i>B.rapa</i> durante el último día del experimento. (Imag.1).....	55
Figura 4.18 Desarrollo del <i>B.rapa</i> durante el último día del experimento. (Imag.2).....	56
Figura 4.19 Evolución diferencia de potencial del cultivo de <i>Z.mays</i>	57
Figura 4.20 Desarrollo del <i>Z.mays</i> durante el último día del experimento.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Datos establecidos acerca de la humedad y el peso de las muestras. (exp.1)	35
Tabla 4-2 Datos experimentales de pH y conductividad de las muestras	36
Tabla 4-3 Diferencia de potencial suelo número 1	40
Tabla 4-4 Diferencia de potencial suelo número 2.....	41
Tabla 4-5 Diferencia de potencial suelo número 3.....	42
Tabla 4-6 Datos establecidos acerca de la humedad y el peso de las muestras. (exp.2)	43
Tabla 4-7 Datos experimentales de pH y conductividad de las muestras.	44
Tabla 4-8 Diferencia de potencial tierra número 3 con una aplicación de 10 V.....	46
Tabla 4-9 Diferencia de potencial tierra número 3 con una aplicación de 20 V	47
Tabla 4-10 Diferencia de potencial tierra número 3 con una aplicación de 40 V.....	48
Tabla 4-11 Datos establecidos acerca de la humedad y el peso de las muestras. (exp.3)	49
Tabla 4-12 Valores de la intensidad de corriente a lo largo de los diez días de duración del experimento.....	50
Tabla 4-13 Datos experimentales de pH y conductividad de las muestras.	51
Tabla 4-14 Diferencia de potencial del cultivo de <i>Phalaris canariensis</i>	53
Tabla 4-15 Diferencia de potencial del cultivo de <i>Brassica rapa</i>	54
Tabla 4-16 Diferencia de potencial del cultivo de <i>Zea mays</i>	56

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La contaminación se define como la introducción de sustancias físicas químicas y biológicas o de energías que atentan contra el normal funcionamiento del medio produciendo además daños que pueden llegar a ser irreversibles sobre los seres vivos que viven en él.

Los efectos más devastadores producidos a causa de la contaminación suponen no sólo un peligro toxicológico (por inhalación, ingestión o por contacto directo con la piel) para la salud humana sino que también afectan directamente a peligros físicos que puedan producirse como por ejemplo la explosión o el fuego, la degradación paisajística o incluso el daño producido a los cultivos y regadíos para el desarrollo de la actividad agrícola.

Puede producirse exclusivamente en el suelo, el aire o el agua aunque también puede darse simultáneamente en los tres ámbitos.

La contaminación del agua se produce por la incorporación en ella de productos químicos, residuos de productos industriales, vertidos de basuras o por mezcla con aguas residuales.

La contaminación del aire se produce por la incorporación dañina de gases que pueden llegar a ser tóxicos para la atmósfera y que influyen negativamente sobre el medio ambiente afectando al desarrollo tanto físico, químico y biológico de los humanos, animales y plantas. [1]

Finalmente, la contaminación del suelo se produce debido a la presencia de productos químicos, desechos tóxicos y todas aquellas sustancias extrañas vertidas por el hombre o por causas naturales pudiendo provocar un deterioro y un desequilibrio físico, químico y biológico sobre el ambiente y produciéndose efectos perjudiciales para los seres vivos que viven en él.

Las consecuencias y peligros de los suelos contaminados no tienen por qué detectarse desde el momento en el que éstos son dañados, sino que por el contrario, pueden tardar en manifestarse varios años.

La influencia de este tipo de contaminación en todo el mundo es de una magnitud muy elevada. Si tuviéramos que hacer una división entre los países desarrollados frente a los países subdesarrollados

pensaríamos que se produce una contaminación mayor en los países desarrollados ya que es allí donde se llevan a cabo un mayor número de procesos industriales y una mayor explotación de recursos disponibles. Sin embargo esto no es del todo cierto.

En los países en vías de desarrollo, al tener más limitaciones en cuanto a recursos económicos hace que no se preste tanta atención a la gestión y el tratamiento de los residuos que puedan llegar a producirse y actuar sobre los suelos; se generan por tanto en estos países unos elevados problemas ambientales que podrían ser subsanados si existiera en ellos una tecnología más avanzada capaz de evitarlos. Las tierras quedan menos cuidadas y la acumulación de los productos y sustancias extrañas al mismo se hace intratable por lo que degenera en una elevada problemática al respecto y unos efectos devastadores para la sociedad que vive en ellos. En la siguiente figura se pueden observar cuáles son los cinco países más contaminados del mundo. Como se puede observar, la contaminación es independiente de que un país se considerado o subdesarrollado. [2]

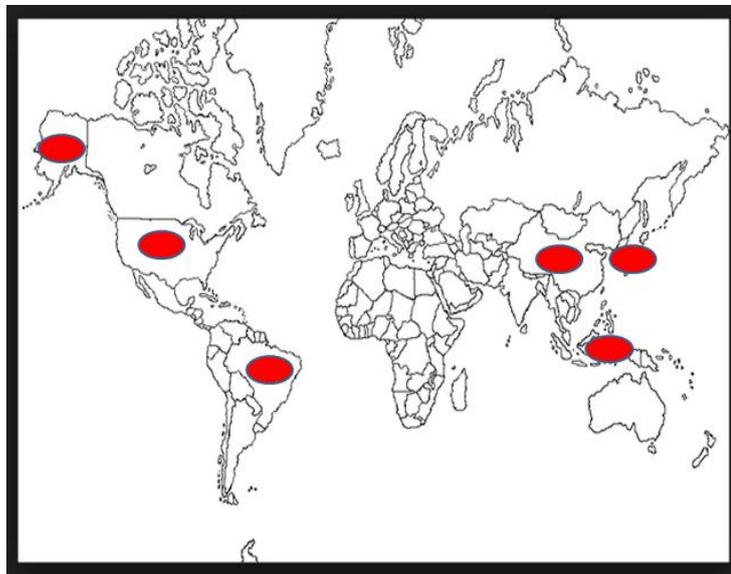


Figura 1.1 China, Usa, Brasil, Indonesia y Japón son los países más contaminados del mundo. [3]

Existe una elevada diversidad de agentes contaminantes y proceden normalmente de la actividad desarrollada por el hombre. Los agentes más influyentes que deterioran el suelo son sobre todo los metales pesados, los hidrocarburos, las partículas que son ácidas y se encuentran en suspensión o el agua de riego salina. Muchos de estos contaminantes son de tipo orgánico y a pesar de poder generar gases tóxicos y mal olor, sus características permiten que gracias a su naturaleza puedan ser gran parte de ellos biodegradables. Sin embargo, contrariamente a éstos, existen otros de naturaleza distinta como son los metales pesados, que no poseen esta capacidad y pueden permanecer inmóviles y retenidos dentro de los suelos durante largos periodos de tiempo contaminándolo y causando efectos perjudiciales de elevadas magnitudes con consecuencias nefastas para la naturaleza y los seres vivos que viven en ella.

Existen diversas alternativas que proponen una solución para poder recuperar de nuevo estos suelos contaminados.

Una de ellas, consiste en aplicar procesos que logren minimizar en la mayor medida de lo posible la concentración de los mismos haciendo posible que, a pesar de su ligera presencia, sean capaces de seguir contaminándolo.

Otra de las técnicas se basa en confinar dichos compuestos a zonas seguras en las que no se produzcan efectos perjudiciales para el medio.

Por último, la aplicación de correctas reacciones químicas sobre dichos elementos, hacen que de esta forma puedan llegar a ser estables.

La contaminación de terrenos supone uno de los mayores problemas que mayor atención han reclamado en los últimos años.

Inicialmente comenzaré evaluando los diversos factores que contribuyen a la contaminación del mismo provocados por la **acción del ser humano**. La mayoría de los agentes contaminantes proceden de actividades generadas por el hombre. Destacan notablemente los hidrocarburos, los metales pesados y las partículas ácidas que se encuentran en suspensión.

- El factor primordial es el de la contaminación a causa de los *procesos industriales*, éstos, contienen vertidos de aguas que contienen metales pesados como el plomo, cadmio o arsénico. Se hacen presentes también entre otros, la presencia de gases tóxicos que se disuelven en el agua de las precipitaciones penetrando en el suelo, los gases de los escapes y aceites sobre los suelos, el arrojado de desperdicios y residuos en el mar procedente de los buques o finalmente el almacenamiento deficiente de los compuestos químicos sobre los terrenos. [4]
- No sólo se ha de tener en cuenta el factor industrial como respuesta al proceso de contaminación de los suelos, también existen contaminantes derivados de los propios *edificios* como pueden ser por ejemplo, las pinturas y sustancias de las paredes que se van depositando sobre el mismo. [5]
- Otro factor que influye es la *actividad agrícola* y el desarrollo de procesos tecnológicos puesto que se han ido creando sustancias como los fertilizantes y pesticidas que sin ser posible su descomposición por la propia naturaleza, se han ido filtrando poco a poco sobre el suelo dañando su composición.
- Es importante nombrar también el *factor residual*. Toneladas de residuos y basuras que inevitablemente generamos en nuestra vida diaria y que no pueden ser recicladas se mantienen durante largos periodos de tiempo sobre los vertederos. Éstos residuos y basuras se van degradando lentamente por condiciones naturales ambientales pudiéndose formar sustancias altamente tóxicas que se filtran en el suelo.
- Finalmente, la *deforestación*, bien provocada por el hombre o bien provocada por causas naturales también afecta en gran medida a este proceso perjudicial para la naturaleza y los efectos que conlleva consigo. En la deforestación, las tierras quedan secas y estériles imposibilitando así su utilización y siendo más susceptible a la erosión.
- Por otra parte, se ha nombrado anteriormente la posibilidad de perjudicar los suelos por **acciones naturales** sin tener por qué influir la acción humana.
- Una de ellas es la propia acumulación de compuestos naturales en el suelo debido a desequilibrios generados por las precipitaciones del agua.
- Los terremotos, tsunamis, las erupciones volcánicas o las deforestaciones provocadas por causas naturales hacen que las tierras pierdan sus propios nutrientes imposibilitando en el caso de los tsunamis la capacidad de retener el agua.



Figura 1.2 Contaminación del suelo por causas naturales. Volcán Alcabuco. [6]

El viento, pudiendo vaporizar el agua del mar con elevadas concentraciones de sal, hacen que se formen unas pequeñas gotas que caen directamente sobre los terrenos; esto provoca la inadaptación de los mismos para la cultivación agrícola. [5]

Los estudios actuales han hecho relevancia en la gran importancia de los suelos que van más allá de perjudicar la salud de todos los seres vivos. El suelo es muy importante porque participa directamente sobre el ciclo del agua; además, se considera un recurso no renovable para el ser humano ya que su renovación se realiza a un ritmo más lento de lo que se destruye.

Existen hoy en día muchos avances significativos que se han centrado en aplicar técnicas que aseguren disminuir en el mayor grado posible la contaminación producida sobre los suelos. No obstante, la mayor parte de los estudios han sido de carácter experimental y de laboratorio. Poco a poco se está llevando a cabo la aplicación de dichas técnicas a los terrenos naturales y ambientales.

1.2 Objetivos

La existencia de la elevada diversidad de técnicas de electro-remediación para la descontaminación de suelos ha permitido desarrollar, como objetivo del presente trabajo, un estudio analítico-experimental sobre la influencia que tiene la aplicación de la técnica de transporte por electro-migración sobre el flujo de iones, que se encuentran internos en el suelo, para llevar a cabo la tecnología de la fitorremediación ejercida por las plantas.

El estudio del tipo de suelo a emplear, del potencial que ha de aplicarse sobre el mismo respondiendo de la manera más beneficiosa a la combinación de la electro-migración para hacer efectiva la fitorremediación y, por último, el tipo de cultivo que mejor responde a los objetivos descontaminantes que se pretenden mediante la aplicación de estas técnicas, son los factores fundamentales que se han llevado a cabo en la realización del presente trabajo.

Los cultivos que se decidieron escoger para realizar el análisis experimental fueron el *P.canariensis* (alpiste), el *B.rapa* (grelos) y por último el *Z.mays* (maíz) puesto que debido a sus propiedades naturales el desarrollo de sus semillas debía ser más precoz que el de otro tipo de cultivos.

El presente trabajo establece las bases sobre las que se asienta, dentro del ámbito militar, el estudio del efecto que tendría el cultivo de la semilla que mejor se adaptara al proceso analítico-experimental sobre los tipos de suelo que hay en los campos de tiro. Estos suelos se caracterizan por poseer una elevada diversidad de contaminantes al contener la pólvora residuos de nitratos de amonio, nitratos de potasio o azufre cuya combinación de los mismos producen efectos nocivos sobre el medioambiente al combinarse con el aire. [7]

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Características generales

Actualmente, existen una gran cantidad de técnicas de aplicación y estudio para descontaminación suelos y de las aguas subterráneas que contienen. En los últimos años, el tratamiento relacionado con la recuperación de suelos ha sido un tema de elevado interés y hoy en día existen diversas tecnologías de elevado coste para la remediación de estos suelos mediante procesos físicos, químicos y biológicos logrando tanto la degradación como la eliminación de todas aquellas sustancias que son dañinas para el medio ambiente. A pesar de existir una gran variedad de técnicas de descontaminación de suelos, es preciso saber que no todas son aplicables a cualquier tipo de suelo. La técnica que se deberá aplicar dependerá del tipo de contaminantes que se hagan presentes en él. [8]

La clasificación de los contaminantes de los suelos se puede agrupar según la Agencia de Protección Estadounidense en compuestos orgánicos y en compuestos inorgánicos. Además, se pueden clasificar en función del estado en el que se encuentren presentes en el suelo: sólido, líquido, fase líquida no acuosa y vapor. Las técnicas de tratamiento y estudio de suelos se clasifican en función de la ubicación del suelo durante el tratamiento. Éstas técnicas son *in situ*, las cuales se aplican directamente sobre la zona superficial del terreno sobre el que se trabaja, y las técnicas *ex situ*, que se llevarán a cabo mediante la excavación del suelo. Se intentará siempre la aplicación de la técnica *in situ*, ya que supone un menor coste. No obstante, la técnica *in situ* requiere más tiempo para su desarrollo y su eficacia es más difícil de verificar. [9]



Figura 2.1 Tratamiento ex situ para descontaminar la tierra. [10]

Según la naturaleza del tratamiento, éstos se pueden clasificar en Biológicos, Físico-Químicos y en Térmicos. [8]

- Los tratamientos *Biológicos* se utilizan para la eliminación de todos aquellos contaminantes que son susceptibles de ser biodegradados por la acción de microorganismos.
- Los tratamientos *Físico-Químicos* tienen como objetivo eliminar los contaminantes que son tóxicos, nocivos y persistentes a la acción de los microorganismos. Para ello transforman dichos contaminantes nocivos en compuestos menos peligrosos.
- Por último, los tratamientos *Térmicos* pretenden aumentar la velocidad de volatilización de los contaminantes semi-volátiles mediante el calentamiento a elevadas temperaturas del subsuelo.

Sin embargo, las tecnologías utilizadas y los experimentos realizados en los laboratorios para llevar a cabo esta limpieza y descontaminación no han llegado a obtener el éxito que inicialmente se esperaba ya que los valores buenos y optimistas que se pretendían obtener no han llegado a establecerse.

Un factor importante que ha impedido la obtención de buenos resultados es el de la baja permeabilidad que muchos suelos poseen. La permeabilidad del suelo es la capacidad del mismo que hace posible el paso de un fluido a través de él sin que se vea alterada su propia estructura interna.

La medición de dicha propiedad se realiza a partir de la imposición de un gradiente hidráulico sobre una parte del terreno y a lo largo de una trayectoria determinada. Los factores que determinan la permeabilidad del suelo son la Granulometría, es decir, la disposición del tamaño del grano en los suelos (de forma que conforme menor es el tamaño del grano, menor permeabilidad existirá) y por otra parte la composición y naturaleza mineralógica del material. [9]

A parte de la baja permeabilidad de muchos terrenos, la estratificación del suelo también dificulta la aplicación de técnicas remediadoras. La estratificación se basa en la cualidad de heterogeneidad que posee el suelo influyendo por tanto en el recorrido y en la velocidad que siga el fluido a través del mismo. La presencia de diversos tipos de contaminantes como son los compuestos orgánicos recalcitrantes y los cationes y aniones inorgánicos (metales pesados) dificulta también la obtención de resultados buenos.



Figura 2.2 Efecto del fluido sobre el factor de permeabilidad de distintos tipos de suelo. [8]

Surgió en los años 90 una técnica innovadora capaz de hacer frente a los problemas descritos anteriormente. El objetivo por tanto era conseguir que ni la baja permeabilidad ni la elevada estratificación del suelo ni la presencia de ciertos compuestos químicos contaminantes pudieran impedir la remediación que se necesitaba.

2.2 Remediación Electrocinética

La remediación electrocinética es una técnica capaz de eliminar los contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos independientemente de la permeabilidad que existiese. Además, también es aplicable no solo para la restauración de los mismos sino también para la restauración de ciertos sólidos contaminados con compuestos iónicos. La aplicación de este tipo de tratamiento ha tenido un gran auge en diversos centros de investigación y en multitud de empresas debido a las ventajas y al carácter exclusivo que posee respecto al uso de otro tipo de tecnologías.

La técnica electrocinética se basa en la eliminación de los contaminantes existentes mediante la aplicación de electrodos. Dichos electrodos se ponen en contacto directo con el suelo escavado que se desea descontaminar y posteriormente se aplica una corriente eléctrica de una intensidad baja. El efecto producido es que los contaminantes existentes son transportados hacia uno de los electrodos los cuales se concentran para su posterior extracción. Posteriormente, una vez que han sido extraídos gracias a la acumulación en uno de los electrodos por diferencia de potencial entre ellos, siguen un proceso de tratamiento para separar y estabilizar dichos contaminantes que finalmente podrán volver a ser depositados. [11]

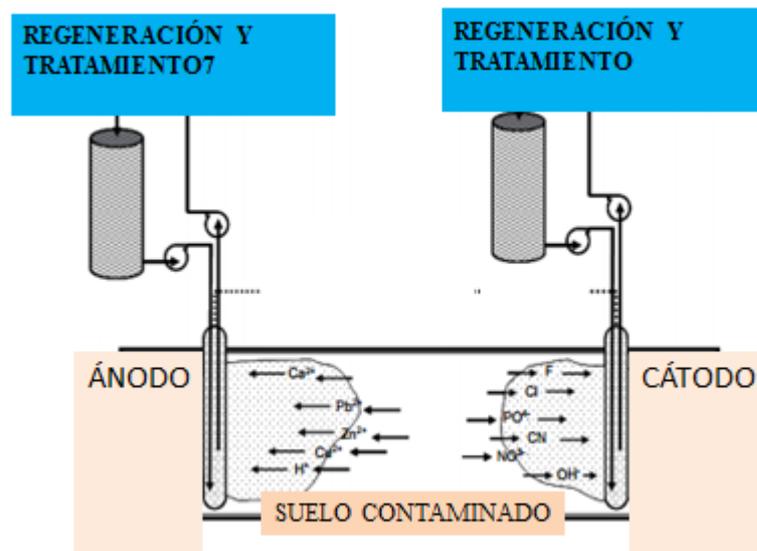


Figura 2.3 Esquema básico in situ del proceso de electro remediación del suelo. [12]

El proceso de electro remediación podrá llevarse a cabo correctamente a partir del conocimiento profundo de las características y la naturaleza del suelo que se desea tratar. De esta forma, se podrá

seleccionar qué proceso de transporte y qué reacciones químicas se deberán aplicar para garantizar la máxima eficacia del tratamiento.

Los procesos de transporte para lograr la eliminación de los contaminantes hacen posible el movimiento de los iones (tanto positivos como negativos) disueltos en el agua a través de los poros del suelo hacia uno de los posibles electrodos. Dichos procesos pueden ser la electro-migración, la electroósmosis, la electroforesis y por último la difusión.

2.3 Técnicas de transporte

El fenómeno de **Electromigración** fue descubierto hace más de 100 años por el científico francés Gerardin y es el principal mecanismo de transporte que sienta las bases para todo el proceso de investigación dentro de éste área.

Las especies iónicas ya disueltas con el agua interna del terreno se desplazan a través del campo eléctrico hacia aquel electrodo de carga opuesta, de forma que los aniones, que poseen carga negativa (por ejemplo, Flúor, Óxido Nítrico o Arsénico) se desplazan hacia el electrodo positivo o ánodo y por otra parte, los cationes, que poseen carga positiva (por ejemplo, Cobre, Sodio o Potasio) se desplazan hacia el electrodo negativo o cátodo. [13]

La electro-migración depende de la conductividad del suelo, de su porosidad, de su pH, del potencial eléctrico aplicado y de la concentración inicial de los iones. La velocidad a la que se desplazan es directamente proporcional a la fuerza del campo eléctrico y a la movilidad del ión o partícula. [11]

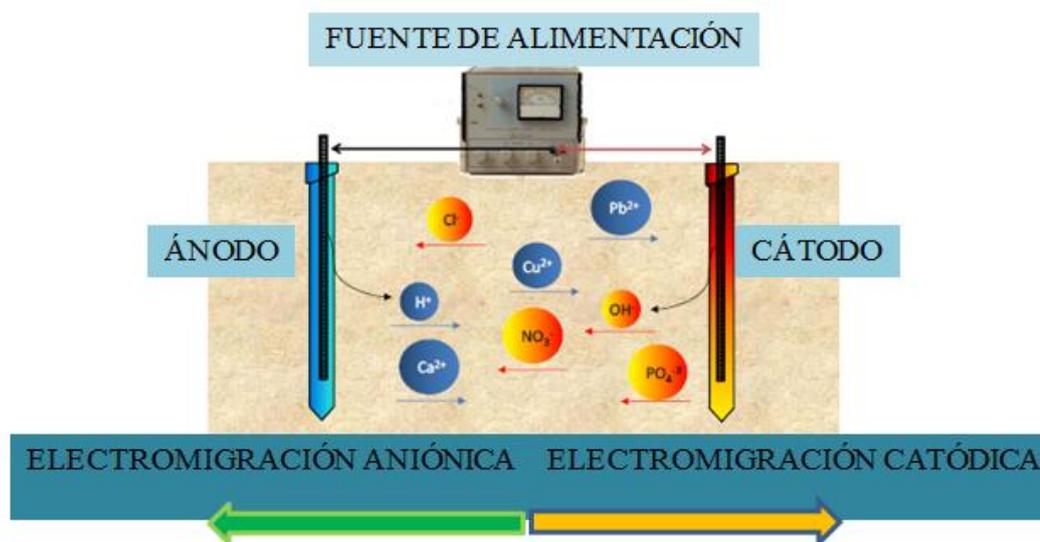


Figura 2.4 La electro-migración supone la base para el estudio en este campo. [8]

Otro de los fenómenos es el de la **Electro-ósmosis**. La electroósmosis se comenzó a desarrollar a finales del siglo XIX gracias a los trabajos llevados a cabo por Helmholtz. La teoría se fue modificando y mejorando conforme los avances tecnológicos se hacían cada vez mayores. En 1914, la figura de

Smoluchowski precisó la teoría extraída por Helmholtz y la combinación de ambas la convirtieron en lo que a día de hoy se conoce por electroósmosis. Este fenómeno se define como el movimiento del fluido intersticial en los poros del suelo hacia uno de los electrodos; la aplicación del mismo es muy eficiente para contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos que se encuentran en disolución, suspensión o emulsión. [14]

El suelo internamente posee unas partículas que se encuentran cargadas eléctricamente. El proceso consiste en aplicar sobre dichas partículas unas cargas opuestas que se encarguen de contrarrestar el valor de dichas cargas. Estas cargas aplicadas se encuentran en la zona difusa de la doble capa eléctrica adyacente a la superficie de la partícula del suelo. Posteriormente, tras aplicar un potencial eléctrico sobre el terreno, las partículas sobrantes que no han interactuado, se desplazan hacia el electrodo de carga opuesta produciéndose además el movimiento de las moléculas formadas por solvatación en la misma dirección que chocan contra las restantes moléculas de agua debido a la interacción de sus dipolos hasta llegar al centro del poro. [8]

La carga que poseen los suelos por defecto suele ser electronegativa, es por eso que las cargas que se van a aplicar al mismo deberán ser positivas para que así de esta forma se produzca la neutralización que es lo que se pretende. El flujo electro osmótico se desplazará hacia el electrodo más electronegativo o cátodo. [8]

En este proceso, la velocidad electro osmótica depende del potencial que se aplique a los electrodos, del potencial, de la constante dieléctrica del fluido y de la viscosidad.

-La **Electroforesis** es otro de los procesos de transporte para la eliminación de los contaminantes que pueda haber en el suelo. Fue a principios del siglo XIX cuando un físico de origen ruso llamado Alexander Reuss hizo los primeros descubrimientos y las primeras observaciones sobre dicho proceso. El experimento que realizó para lograr tal descubrimiento fue llevado a cabo a través del estudio del comportamiento en suspensión de una partícula en agua. Tras la aplicación de un campo eléctrico, observó cómo las partículas de arcilla podían separarse del agua y aquellas que estaban cargadas positivamente se dirigían hacia el electrodo más electronegativo mientras que las que estaban cargadas negativamente se dirigían hacia el electrodo más electropositivo. Más tarde, a finales del siglo XIX, continuó con el desarrollo de la teoría Faraday mientras que ya adentrados en mitad del siglo XX, fue el bioquímico sueco Arne Tiselius el que trabajó sobre ella a partir de experimentos realizados mediante la separación de las proteínas de una mezcla. [15]

La electroforesis consiste en el estudio del desplazamiento de partículas coloidales que se encuentran cargadas en suspensión mediante la aplicación de un campo eléctrico. La aplicación de ésta técnica de transporte, difiere en las anteriores en que no es adecuada para aquellos suelos donde la permeabilidad es baja. No obstante, es muy importante su aplicación en medios que se encuentran en suspensión y se utiliza mucho su aplicación cuando lo que se pretende es el transporte de bio-coloides entre las que se integran por ejemplo las bacterias. Además, es aplicable cuando el transporte se produce no solo a través de poros grandes sino que también es de buen uso sobre poros de menor tamaño. [15]

-Por último se encuentra el modelo de transporte por **Difusión**. Una técnica referida al movimiento y al transporte molecular de los contaminantes mediante gradientes de concentración. Para que exista éste fenómeno, la distribución de las moléculas no debe ser homogénea. [2]La fórmula de la difusión fue desarrollada a mitad del siglo XIX por un fisiólogo alemán llamado Adolf Fick. La difusión depende directamente del factor de difusividad que expresa la velocidad y la temperatura de transformación que sufre la sustancia con el objetivo de lograr el equilibrio térmico. [11]

$$J = -D \times \Delta c$$

J= flujo de masa sobre la que se trabaja. D=difusividad c= gradiente de concentración

2.4 Fitorremediación

Otro de los métodos que se han utilizado para la descontaminación de los suelos es la **fitorremediación**. Actualmente, existen diversos métodos aplicados que tienen por objetivo conseguir descontaminar el suelo en el mayor grado posible. Sin embargo, muchos de estos métodos como pueden ser el uso de diversas sustancias químicas, de tecnologías que pueden provocar la variación de las propiedades físico-químicas del mismo o de invertir gran cantidad de energía puede suponer que no se consiga la eficacia ni los efectos que se inicialmente se pretendían. Dichos métodos no se caracterizan sólo por tener un elevado coste sino que también puede ocurrir que ni siquiera sean capaces ni de destruir ni de eliminar las sustancias contaminantes existentes pudiendo permanecer allí durante largos periodos de tiempo. El hecho de verter sobre los suelos sustancias químicas en grandes cantidades puede provocar además que se pierda la viveza del propio suelo imposibilitando así que se pueda producir el crecimiento de las plantas u otros seres vivos. Todo ello hay que tener en consideración además, el elevado coste que puede suponer. [11]

La fitorremediación se desarrolló a principios de los años 90 y desde entonces se continúa trabajando en dicho campo para lograr conseguir una mejor evolución del proceso supone una solución a estos problemas puesto que no sólo es considerada una alternativa eficaz tanto energéticamente como medioambientalmente para la recuperación de los suelos sino porque también debido a la naturalidad de su aplicación, es capaz de mantener las características iniciales terrestres sin producirse apenas ningún tipo de variación sobre el hábitat que permanece en él. Ésta tecnología, a diferencia de otras posibles técnicas de descontaminación no supone un elevado coste.

La fitorremediación es una técnica avanzada que se continúa desarrollando hoy en día debido a su carácter natural, eficiente, poco costoso y cuya aplicación garantiza la uniformidad de los suelos.

La fitorremediación es un tipo de tecnología que consiste en lograr mediante el uso diversas técnicas en degradar o incluso eliminar las sustancias contaminantes que se encuentran en el suelo. Mediante el cultivo de ciertas plantas (adecuadas al tipo de suelo que se desee descontaminar) es posible que, gracias al propio crecimiento natural de las mismas en las que influyen en su desarrollo las condiciones climatológicas (luz solar, viento...) o la fertilidad del propio suelo, es posible lograr hacer desaparecer o degradar las sustancias perjudiciales y contaminantes presentes en él. Por tanto, son las propias plantas las que se encargaran de degradar y de eliminar los contaminantes.

La fitorremediación posee una serie de fito-tecnologías en las que cada una de ellas ejerce una función diferente en la actuación sobre los suelos.

Una de ellas es la *Fitoacumulación*; en ella, las raíces de la planta se encargan de absorber las sustancias inorgánicas y los metales para transportarlos hasta sus propios tejidos como pueden ser por ejemplo las hojas o los tallos. Una vez quedan acumuladas dichas sustancias sobre los tejidos, se procede a su tratamiento y estudio. Por ello, es más fácil que la acumulación se produzca sobre las capas más superficiales que sobre las capas más internas donde se encuentran las raíces. [2]

La *Rizofiltración*, otra de las Fito-tecnologías existentes, tiene un efecto similar a la *Fitoacumulación* solo que la acumulación y degradación de los contaminantes próximos a la raíz, se produce sobre la misma sin llegar a ascender por los tejidos de la planta.

La *Fitoestabilización* consiste en inmovilizar los contaminantes que hay por los alrededores de la planta mediante la absorción de los mismos por las propias raíces. Los suelos más propios para aplicar la *Fitoestabilización* son aquellos en los que escasea la vegetación natural. Se cultivan por tanto plantas que son capaces de restaurar la vegetación y absorben gran cantidad de contaminantes orgánicos.

Otra de las Fito-tecnologías es la del tratamiento de los suelos mediante la *Fitodegradación*, un tipo de tratamiento por el cual mediante la acción de la propia actividad natural y metabólica de la planta como por la segregación de enzimas segregados por la misma, es capaz de descomponer los contaminantes orgánicos que se encuentran a su alrededor.

La *Rizodegradación* es la biodegradación de las sustancias contaminantes gracias a la liberación de los enzimas y de la energía de la planta que hacen posible que las bacterias y hongos que se encuentran en las inmediaciones de la raíz actúen en la degradación de los mismos.

Por último, se encuentra la *Fitovolatilización*; en ella las plantas que absorben los compuestos orgánicos que se encuentran en las inmediaciones de la misma son capaces de liberarlos al exterior en estado gaseoso gracias a la acción de las propias hojas. No obstante, los compuestos orgánicos liberados por las hojas se dispersan por la atmósfera. [11]

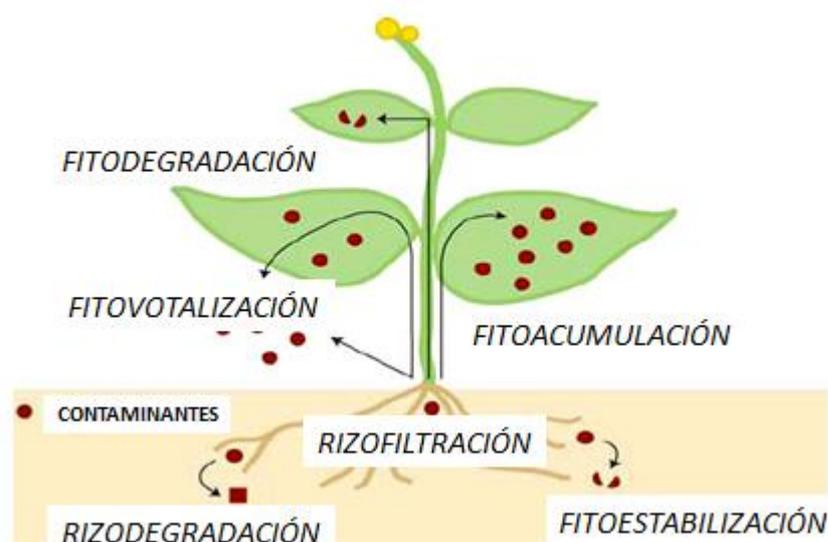


Figura 2.5 Fito-tecnologías de la planta [16]

A pesar de que la fitorremediación contiene una elevada cantidad de ventajas, es necesario destacar los efectos negativos que su aplicación puede suponer.

En primer lugar, para aplicarse ésta técnica es necesario tener en cuenta la dependencia que tienen las plantas con el medioambiente en el que viven. La luz solar, la lluvia o el viento son alguno de los factores que influyen en el éxito o el fracaso del mismo.

Otro de los factores existentes es la dependencia que las plantas tienen sobre el suelo en el que se desarrollan. Es necesario que para que se produzca la fitorremediación exista un determinado número de nutrientes que favorezcan el crecimiento normal de la planta para garantizar el éxito del proceso.

El estudio de las características del suelo que se encuentra contaminado supondrá el cultivo de un tipo de planta u otro logrando de esta forma la mayor efectividad posible.

La fitorremediación es muy efectiva cuando las concentraciones de contaminantes no son muy elevadas y cuando la profundidad de los mismos puede ser alcanzada por las propias raíces. A pesar de que puedan existir condiciones favorables tanto ambientales como terrenales para producirse la fitorremediación, es posible que ésta no dé lugar debido a la elevada profundidad de los contaminantes que son incapaces de ser absorbidos por las raíces. [11]

Un inconveniente importante es el factor de la velocidad, la rapidez en la que se produce el proceso. Puede ocurrir que se tarden largos periodos de tiempo hasta que la fitorremediación de los suelos comience a producirse.

.Existen plantas llamadas hiperacumuladoras que por sus características naturales son capaces de acumular altas concentraciones de metales pesados respondiendo así de forma exitosa a las distintas técnicas Fito-tecnológicas. Por tanto es lógico que tarden menor tiempo en ejecutar el proceso Fito-tecnológico.

La diversidad de soluciones para conseguir una acumulación de los contaminantes procedentes de los suelos en las proximidades de las raíces de las plantas es muy variada. Una de ellas consiste en combinar la fitorremediación con la remediación electrocinética, concretamente la electro-migración.

Si se aplica un campo eléctrico de una intensidad no muy elevada sobre el suelo que se desea contaminar, se producirá una alteración del mismo que provocará no sólo variaciones en el pH o en la conductividad sino también en el traslado de los contaminantes existentes hacia las plantas sobre las que se desea aplicar la fitorremediación para poder ser éstos eliminados. Con la aplicación de un potencial, se acelera el proceso y aumenta la propia actividad de la planta puesto que contienen más contaminantes a sus alrededor capaces de ser eliminados o degradados. La combinación de ambas técnicas no supone un coste elevado ni tampoco modifican las propiedades más efectivas y naturales del propio suelo. El objetivo de aplicar el proceso de transporte por electro-migración, permite además acercar los metales pesados y cualquier otro contaminante hacia las proximidades de las raíces de las plantas para llevar a cabo el proceso de fitorremediación; con ello, se soluciona el inconveniente que inicialmente existía en el proceso puesto que a pesar de que se pudieran encontrar los contaminantes en lo más profundo de los suelos, con la introducción de un ánodo y un cátodo así como con la aplicación además de un campo eléctrico que cree una diferencia de potencial entre ambos ya es posible lograr la efectividad que se pretendía. [11]

Se ha demostrado científicamente mediante los trabajos desarrollados a principios del presente siglo que la aplicación de una corriente eléctrica entre dos electrodos mejora en gran medida el éxito de la fitorremediación.

El principal inconveniente que existe con la combinación de ambos procesos es la posibilidad de que la elevada acumulación de sustancias contaminantes sature a la propia planta y conlleve consigo efectos negativos. Por ello, la solución propuesta consiste en evaluar la situación y evitar estar constantemente aplicando un campo eléctrico entre ambos electrodos para de esta forma lograr estabilizar el proceso sin que la planta llegue a sobresaturarse. [11]

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción inicial del proceso experimental.

La realización del presente trabajo fue dividida en tres partes. En la primera parte del trabajo, se llevó a cabo un proceso experimental de análisis sobre tres tipos de suelos distintos. Las características de cada uno de ellos son las siguientes:

- El suelo número 1 es una tierra vegetal de uso comercial para el cultivo de plantas. Se caracteriza por un alto contenido en materia orgánica y nutricional, y una estructura muy esponjosa.

- El suelo número 2 es un suelo tomado de una explotación agrícola que se caracteriza por un contenido significativamente alto de materia orgánica y nutrientes. Su alto contenido en arcilla que hace que este suelo tienda a apelmazarse.

- El suelo número 3 es un suelo básicamente arcilloso con una pequeña fracción de arena y sin materia orgánica. La ausencia de materia orgánica hace que también sea un suelo sin contenido significativo de nutrientes necesario para el crecimiento de plantas.



Figura 3.1 Muestras de los tres tipos de suelos utilizados para el estudio experimental.

Se ha realizado un estudio intensivo y obteniéndose una serie de conclusiones experimentales desarrolladas más adelante en el trabajo sobre la influencia que ha tenido la aplicación de diferencia de potencial en cada uno de los extremos de las muestras de tierra en la variación del potencial, pH, conductividad, humedad y temperatura.

Con el análisis en el laboratorio con estas muestras de suelo durante cuatro semanas y media se ha permitido obtener una sólida valoración acerca del comportamiento diario que sufren los suelos del medio que nos rodea y de los factores que influyen sobre él. La fase experimental durante la primera semana de trabajo consistió fundamentalmente en familiarizarse con los diferentes equipos que se iban a necesitar en los laboratorios tanto de Química como de Ingeniería de Materiales ubicados en el edificio Isaac Peral de la Escuela Naval Militar. El objetivo no sólo era el de conocer los equipos, sino también era el de comenzar a emprender una rutina de trabajo que iba a ser necesaria aplicar en la sucesivas semanas. Para ello, se trabajó con una muestra de tierra de cultivo y se hicieron exactamente todos los cálculos experimentales que iban a realizarse posteriormente en las prácticas reales. De esta forma, todos los errores en medición que se iban cometiendo, el desconocimiento de los equipos, todas las irregularidades que inicialmente podían aplicarse y todos los posibles peligros experimentales a los que hubo que enfrentarse, fueron subsanados de una forma continua con el objetivo de emprender durante las siguientes semanas las verdaderas prácticas exhaustivas y precisas que permitirían obtener de esta forma los datos que conllevarían consigo el análisis de las posteriores conclusiones determinantes.

A pesar de que pudiera parecer que esa semana no sirvió de mucho puesto que los datos hallados no se utilizaron en el trabajo, eso no es del todo correcto. Sin un conocimiento previo del modo en el que se debía trabajar, de los cuidados que se debían de tener, de las precisiones en la obtención de las medidas que se debían tomar y de las disoluciones que debían crearse, nunca se podría haber logrado desarrollar correctamente el trabajo y garantizar el éxito de las conclusiones finales extraídas.

No fueron complicados estos días, simplemente había que adaptarse al tiempo que iba a desempeñarse en el laboratorio y a organizarse sobre las veces que se debía acudir al mismo.

A continuación se detalla la segunda semana en la que se comenzó a realizar lo que iba a ser el primero de los tres experimentos que se llevaron a cabo.

El interés esencial de los tres experimentos consistía en hacer un estudio exhaustivo sobre el comportamiento terrestre tras la aplicación de la técnica de transporte por el método de electro migración. Las variables sobre las que se fueron obteniendo las conclusiones finales de interés fueron el pH, la conductividad, la humedad, la diferencia de potencial entre los electrodos, la intensidad en el experimento nº3 y por último la temperatura que poseían los electrodos durante todo el proceso.

Todos los experimentos fueron llevados a cabo tanto en el laboratorio de química como en el laboratorio de Materiales del edificio Isaac Peral de la Escuela Naval Militar.

3.2 Desarrollo experimento Número 1

El experimento tuvo una duración de cinco días, de lunes a viernes. El lunes se preparó el experimento y se calcularon los datos iniciales de algunas de las variables que iban a ser objeto de comparación con los datos finales de las mismas variables pero tras la finalización del experimento que sería el viernes.

Preparación del suelo

Inicialmente, sobre tres celdas de plástico de dimensiones 31,5 cm x 17,5 x 10 cm se fueron introduciendo cada una de las tres muestras de suelo que se disponían y eran objeto de estudio. El relleno de tierra que conformaba el suelo en cada molde debía estar perfectamente distribuido de forma que se pudiera garantizar uniformidad en el mismo. Lo primero que se debía saber era conocer el peso de cada una de ellas.

Se enumeraron las celdas que contendrían cada uno de los suelos para evitar confusiones a la hora de tomar diferentes muestras y mediciones. El siguiente paso fue crear los electrodos. El material que se utilizó para crearlos fue la mina de grafito, caracterizado por ser un material que posee conductancia eléctrica sin transferencia substancial de masa. Se recortaron siete tiras por cada muestra de tierra con la que se iba a comenzar a trabajar. Dos de las tiras recortadas debían ser más anchas que las otras, puesto que conformarían el ánodo y el cátodo respectivamente. Las tiras se fueron colocando perpendicularmente sobre el suelo de forma que lo fuera troceando en secciones equidistantes de 5 cm en la dirección del ánodo hacia el cátodo.



Figura 3.2 Disposición de las tiras de grafito sobre una de las muestras de tierra

Medición de la humedad, el pH y de la conductividad iniciales

Mediante tres tubos de ensayo fueron seleccionadas tres pequeñas muestras de tierra; una vez ya vertidas sobre cada uno de las celdas y se introdujeron individualmente sobre un psicómetro para hallar la humedad de cada una de ellas. Ese es el primer dato que se debía de obtener para compararla posteriormente con el segundo dato de humedad de cada muestra que se obtendría tras la finalización de la aplicación de la diferencia de potencial. Los datos obtenidos acerca de la diferencia de potencial se fueron calculando diariamente y durante la primera hora lectiva de la mañana para evitar así que existiese una variedad temporal en cuánto al momento en el que las medidas eran tomadas. El procedimiento para calcular los valores tanto del pH como el de la conductividad fue el siguiente: inicialmente se depositaron sobre los tubos de ensayo 1´5 gramos de cada una de las tierras y posteriormente se añadieron cuidadosamente desde un frasco lavador 2,5 ml de agua destilada para crear así la pequeña disolución.

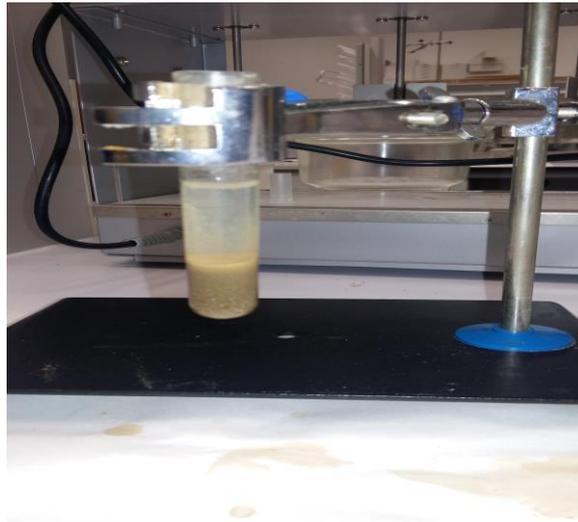


Figura 3.3 Muestra de una de las disoluciones

Una vez realizada la disolución se depositaron los tubos de ensayo sobre una gradilla y manualmente se agitaron durante unos 45 minutos aproximadamente. Tras acabar la agitación, había que esperarse unos segundos hasta que se produjera la decantación y para posteriormente medir el pH y la conductividad.

Para medir el pH necesitaría un electrodo nuevo que el Centro Universitario de la defensa acababa de disponer. Dicho electrodo tenía la capacidad de calcular no solo valores de pH sino de tomar datos también directamente relacionados con la conductividad. Tenía un pequeño defecto y es que resultaba ser un poco aparatoso puesto que había que estar constantemente cambiando los cables del mismo para hallar los distintos datos. Por ello, se compararon los datos de pH obtenidos con el pH-metro nuevo con los datos de pH del pH-metro corriente y más sencillo que se disponía en el laboratorio de química para determinar si podía ser posible trabajar con dos equipos distintos para cada uno de los valores que pretendíamos hallar.

El resultado comparativo tenía variaciones bastante determinantes. Por tanto, descartamos finalmente el uso del pH-metro sencillo para utilizar el más riguroso. El nuevo electrodo que se disponía, permitía hallar además los valores de la conductividad.

Todos los tubos de ensayo que contenían las disoluciones fueron sujetadas con un soporte.

Tanto el pH-metro como el conductímetro fueron sostenidos por el soporte universal en el momento de realizar las medidas para obtener así una mejor precisión de los datos.



Figura 3.4 Medición del pH aplicado a cada muestra

La medición del voltaje se realizó en el laboratorio de Materiales del edificio Isaac Peral. Se trasladaron por ello las muestras, pues era un lugar más cómodo para trabajar puesto que había un espacio mayor que en el laboratorio de química.

Se conectaron los tres moldes llenos de tierra a una fuente de alimentación y se aplicó un voltaje de 30 V que permanecerían inamovibles durante los cinco días en los que se iban a hallar los datos. Uno de los cables (rojo) iría directamente conectado desde la fuente de alimentación al ánodo mientras que el otro cable (negro) se conectaría de la misma forma al cátodo.

Durante todas las mañanas a las 0830 horas era necesario acudir al laboratorio de materiales para tomar las medidas con el voltímetro acerca de la diferencia de potencial existente entre las distintas zonas terrestres.

Durante los tres primeros días se acudió además por la tarde a tomar de nuevo los datos pero mediante la comparación de los datos obtenidos, que con tan poca diferencia de horas apenas ocurría una variación resaltable entre ellas como para considerarlas importantes.

Los resultados que se obtuvieron se mantuvieron dentro del ámbito de la coherencia que se pretendía. Aquellos que no lo eran, generalmente era por un fallo manual de medición. La solución por tanto era repetirlos de una forma más atenta y cuidadosa con el objetivo de que se adecuasen al resto de datos.



Figura 3.5 Aplicación del voltaje sobre cada una de las muestras de tierra.

Con un Voltímetro se fueron hallando diariamente la diferencia de potencial entre cada dos tiras de grafito colocadas sucesivamente sobre la tierra y se fueron obteniendo los valores que serían la base del posterior estudio y de las conclusiones que serán detalladas más adelante.

Transcurridas las mediciones durante los cinco días, antes de finalizar el primero de los tres experimentos que se realizaron, se desconectó la fuente de alimentación que proporcionaba potencial a la tierra y se recogieron siete muestras en tubos de ensayo de cada uno de los tres tipos de tierra de forma que cada muestra recogida se encontraría junto al lado de cada una de las tiras de grafito. En total 21 muestras.

El objetivo era calcular como el proceso de electro migración había afectado a cada una de las muestras recogidas en cuanto a valores de pH y de conductividad y los efectos que en ellas se habían producido.

Una vez recogidas las muestras y estando perfectamente clasificadas, se prepararon las disoluciones de cada una de ellas mezclándolas con agua en las proporciones detalladas anteriormente y se fueron colocando una a una sobre las gradillas. Una vez se tuvieran todas las disoluciones y tras un proceso constante de agitación de la disolución de unos 45 minutos aproximadamente, se comenzaron a calcular los valores de pH y conductividad. El proceso conllevó bastante tiempo puesto que había que ser riguroso ante las pequeñas variaciones que en algunas de las muestras se producían.



Figura 3.6 Muestras de tierra sobre las gradillas

Finalmente, tras finalizar la toma de datos, se calcularon las humedades finales de las tres tierras y se compararon con los valores iniciales que se habían obtenido.

La temperatura también fue calculada a lo largo de todo el experimento. Cada vez que se acudía al laboratorio y una vez tomados los datos referentes a la diferencia de potencial sobre las tiras de grafito, se hallaba también la temperatura apuntando directamente con la cámara termo gráfica sobre las mismas.

Los resultados obtenidos no fueron muy relevantes puesto que durante esos días, la temperatura permaneció invariable prácticamente (entre los 25 °C y los 27 °C). Además, no se apreciaba una diferencia de temperatura entre los electrodos puesto que prácticamente era la misma ni tampoco existía una diferencia de temperatura entre los distintos tipos de suelo.

Los cálculos de pH, de humedad, de conductividad, de temperatura y por último de diferencia de potencial habían concluido para el primer experimento.

3.3 Desarrollo experimento Número 2

Para llevar a cabo la realización del segundo experimento fue necesario escoger una de los tres tipos de suelo. La elección del mismo se obtuvo de acuerdo a un previo análisis sobre los datos obtenidos de cada tierra durante la ejecución del experimento número uno. Finalmente se llegó a la conclusión de que la mejor tierra de las tres era la n°3 ya que era la que mejor reunía las condiciones para eliminar las sustancias contaminantes (tras la aplicación del proceso de electro migración) internas del suelo. El experimento tuvo una duración de cinco días, similar al realizado anteriormente y se realizó siguiendo exactamente los mismos pasos que se habían utilizado en el experimento 1.

Lo primero que se hizo fue limpiar la tierra manualmente eliminando todo aquello que pudiera afectar a la posterior aplicación de potencial para que se efectúe el proceso de electro migración de la mejor forma posible; esto sería piedras y pequeñas ramas que podían estropear el proceso ligeramente.

Posteriormente se fueron dividiendo todos los suelos seleccionados en cada una de las celdas de plástico de forma que pesaran aproximadamente lo mismo y garantizando además la uniformidad de distribución de la tierra que conformaba el suelo sobre las mismas.

El siguiente paso fue calcular la humedad inicial de la tierra; para ello, se escogieron 2 gramos aproximadamente de cada una de las tierras y se depositaron sobre las cápsulas de Petri. Al acabar, se vertieron individualmente cada uno de los suelos sobre un psicómetro para medir de esta forma el valor de la humedad. De los tres tipos de suelo, era el más seco de todos y poseía un porcentaje inicial de humedad de un 20% aproximadamente.

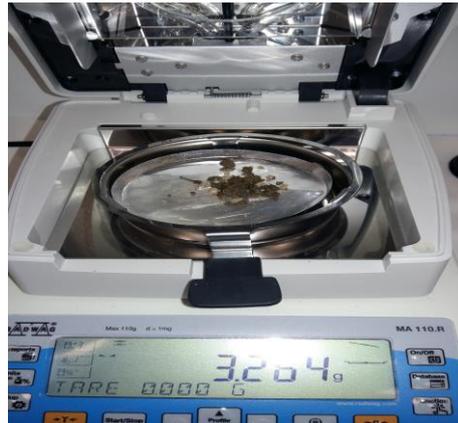


Figura 3.7 Medición de la humedad

Una vez dividido el suelo seleccionado sobre los tres recipientes de plástico y tras la realización del montaje para comenzar a medir, el potencial que se iba a aplicar sobre cada suelo iba a ser distinto.

Los valores fueron de 40 V, 20 V y 10 V respectivamente sobre las celdas uno, dos y tres. El objetivo ahora era una vez escogida la mejor tierra, analizar cuál debía ser el mejor potencial a aplicar para obtener los mejores resultados que cumplieran mejor la técnica de electro migración. Los resultados se encuentran detallados en el siguiente apartado del presente trabajo.

El último paso antes de dar por finalizado la segunda parte del proceso experimental y una vez calculados los valores finales de humedad, fue el de recoger de nuevo con los tubos de ensayo las 21 muestras en total de las tres tierras y calcular con la mayor precisión posible los valores de pH y de conductividad en el laboratorio de química.



Figura 3.8 Proceso de recogida de muestras en tubos de ensayo

Durante ese mismo día, fue preparado el que iba a ser el tercer y último estudio a realizar para dar por concluido el proceso experimental.

3.4 Desarrollo experimento Número 3

La finalidad de este experimento era realizar un análisis sobre la forma en que afectaba el desarrollo de las plantas según se colocaran en diversos puntos del medio terrestre que se disponía.

Si en una zona se observaba un mayor crecimiento de la semilla plantada que en otra, se entendía que esa zona era más apta para el cultivo y por tanto menos contaminada que en la otra bien porque el proceso de electro-migración así lo hubiese establecido o bien porque su efecto había supuesto la pérdida de nutrientes que pudiesen afectar al desarrollo de la planta.

Por otra parte, esta última parte del proceso experimental se alejó en parte de las bases asociadas a los dos estudios anteriores. Suponía la base de un nuevo proyecto experimental basado en el tratamiento por fitorremediación por el cual era posible mediante la acción de una planta, degradar y eliminar la presencia de los contaminantes que puedan tener los suelos internamente.

- **Día 1**

Durante el primer día, se realizó la preparación del experimento y se procedió además a la toma de los primeros datos.

El primer paso fue preparar la tierra que se iba a utilizar; para ello, se vertió sobre un cubo toda la tierra 3 que se disponía y que se iba a reutilizar del experimento anterior (utilizada en el experimento 2 por presentar mejores condiciones experimentales que las otras) con un 10% aproximadamente de la tierra 1 puesto que éste tipo de tierra era vegetal y por consecuencia más apta para el crecimiento de plantas al poseer nutrientes que facilitarían el desarrollo de las mismas. En total, y una vez realizada la mezcla y tras haberse removido bien, la cantidad que utilizamos fueron 5,3 kg. Ésta cantidad fue humedecida posteriormente con medio litro de agua.



Figura 3.9 Preparación de la mezcla sobre el cubo.

Posteriormente, con la ayuda de la balanza analítica, quedó dividida y distribuida de una forma equitativa a lo largo de las tres bases de plástico que se disponía, es decir, 1,7 kg por cada una de las celdas de soporte.



Figura 3.10 Vertido equitativo sobre los envases de la tierra mezclada.

Sobre cada base se aplicó un tipo de cultivo distinto cuyas características naturales de crecimiento no debían ser muy tardías debido a la limitación de tiempo que se disponía. Éstos fueron, *Phalaris canariensis* (alpiste), *Brassica rapa* (grelos) y *Zea mays* (maíz).



Figura 3.11 *Phalaris canariensis*, *Brassica rapa* y *Zea mays*

En la bases número 1,2 y 3 se distribuyó un total de 6 g de *Phalaris canariensis*, 5 g de *Brassica rapa* y 39 granos de *Zea mays* respectivamente de forma que quedaron perfectamente distribuidos a lo largo de la mezcla de tierra humedecida.

Ésta vez fueron colocadas menos tiras de mina de grafito sobre los suelos. En vez de cinco, se colocaron tres teniendo en cuenta la adicción posterior del ánodo y del cátodo. No obstante la equidistancia entre ellas se debía mantener, por ello, se fueron colocando perpendicularmente sobre el suelo de forma que lo fuera troceando de nuevo en secciones equidistantes de 7,5 cm en la dirección del ánodo hacia el cátodo. Exactamente de la misma forma que en los dos experimentos anteriores.



Figura 3.12 Disposición de las tres tierras cultivadas

Existía una curiosidad de saber no sólo cuáles iban a ser las zonas más adecuadas para el crecimiento de la planta sino de saber también cuál de los tres tipos de cultivo crecería más rápido que los otros respondiendo así mejor al proceso de fitorremediación.

Mediante la fuente de alimentación se aplicó un potencial intermedio de 20 V a los tres suelos y se comenzaron a hallar (con ayuda del voltímetro) los primeros datos tanto del potencial como de la intensidad, un nuevo factor que se introdujo para este experimento.

Se fue acudiendo diariamente al laboratorio para calcular las variaciones de los valores que se iban produciendo, pero también se debía observar cómo iban creciendo las plantas a lo largo de los días; además, no había que olvidarse de humedecer las tierras con agua para que no murieran las plantas.

La semilla que creció más precozmente fue la de *Phalaris canariensis*, en tan sólo un día ya se podían observar muestras de crecimiento. Por contra, el *Zea mays* fue el más lento. Las características y el estudio de los efectos producidos se detallarán en el siguiente apartado con mayor rigurosidad. A continuación se muestran figuras que reflejan cómo fue desarrollándose a lo largo de todo el estudio experimental el crecimiento de cada una de las plantas.

Cada dos días se humedecía la tierra para facilitar el desarrollo de las semillas. La tierra era muy propensa a retener la humedad y por tanto tardaba bastante tiempo en secarse.

- DIA 1



Figura 3.13 Aplicación y distribución de las semillas sobre la mezcla terrestre.

Inicialmente, permanecieron las semillas sobre el terreno y se aplicó una diferencia de potencial de 20 V sobre las tiras de grafito que sirvieron de ánodo y de cátodo.

- DIA 2



Figura 3.14 Desarrollo del crecimiento de la semilla durante el segundo periodo de aplicación

Como se observa, el cultivo del *Brassica rapa* correspondiente a la segunda imagen de la figura comenzó a desarrollarse y a crecer antes que el resto de los cultivos. A pesar de estar aplicando el proceso de transporte por electro-migración, todavía no se pudo apreciar una zona clara terrestre en la que existiera un mayor crecimiento que en otra. Por otra parte, el *Phalaris canariensis* mostraba

síntomas de crecimiento pero muy leve. Con respecto al cultivo de *Zea mays* apenas se podía distinguir una mínima muestra de crecimiento respecto del día anterior.

- **DIA 3**



Figura 3.15 Crecimiento de la planta durante el cuarto día de aplicación del proceso de electro migración.

El *Brassica rapa* continuó con su precoz proceso de crecimiento llegando a medir una altura de 3 cm; además, se podía apreciar que en la zona en la que se encontraba el ánodo existía una mejor respuesta cuantitativa al proceso experimental de electro remediación que en la zona del cátodo.

El *Phalaris canariensis* continuó creciendo también aunque más sutilmente. Apenas se podía distinguir todavía la zona en la que mayor efecto se producía. Por otra parte, por fin se podía visualizar el breve crecimiento del *Zea mays*. Los tallos comenzaron a salir aunque de una forma muy discreta.

A continuación, se puede observar en la figura una muestra evidente de que la diferencia de potencial produce el efecto de electro remediación sobre la tierra que se pretende. En la zona del ánodo, el crecimiento del *Brassica rapa* era mayor que en la zona del cátodo; las condiciones por tanto en ésta zona eran más adecuadas para éste tipo de cultivo. La figura describe el estado del *Brassica rapa* tras el quinto día desde su cultivo. Los tallos tenían ya una altura media en la zona del ánodo de unos 5,5 cm aproximadamente creciendo además de un modo muy satisfactorio. Por otro lado, en la zona terrestre donde se encontraba el cátodo, los pocos tallos que crecían, mostraban un aspecto más pálido y menos colorido que los del ánodo. Este efecto producido es otra de las muestras justificativas de que esa zona no era muy fructífera.

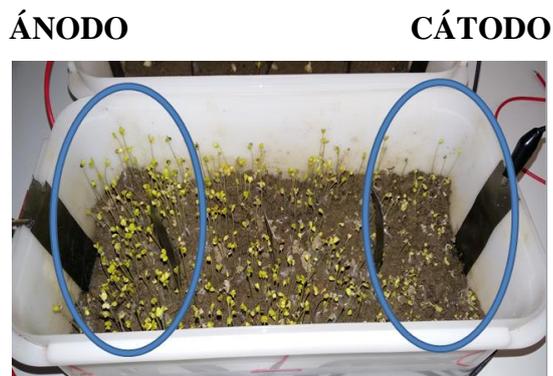


Figura 3.16 Imagen del Brassica rapa tras el quinto día experimental.

- DIA 6



Figura 3.17 Crecimiento de la planta durante los últimos días que duró el experimento.

El *Brassica rapa* es el que mejor respondió al proceso de electro-migración y fitorremediación; en tan sólo una semana consiguieron desarrollarse sus tallos hasta llegar a obtenerse una altura de 12 cm aproximadamente. Este efecto indica que era propenso y productivo el hecho de aplicarle este proceso de transporte para poder llevar a cabo la posterior fitorremediación. La plantación del *Brassica rapa* en un tipo de suelo que se encuentra contaminado podría ser beneficiosa para conseguir la eliminación o degradación de todas aquellas sustancias perjudiciales para el medio.

Llama la atención además el hecho del que se haya tenido un crecimiento tan rápido sin existir condiciones de aireamiento ni de luminosidad adecuadas, condiciones actuales que son necesarias para el desarrollo de una planta.

El cultivo de *Phalaris canariensis* tuvo un efecto totalmente diferente. Se observa cómo se produjo un crecimiento desigual del mismo a lo largo del suelo. Además, no era tan abundante como el cultivo de *Brassica rapa*.

El *Zea mays* muestra claras evidencias de que no respondía bien a la electro-migración ni a la Fito remediación. Apenas su desarrollo se ha llevado a cabo; es más exigente a las condiciones de desarrollo y por ello menos fructífero.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados obtenidos de los tres procesos experimentales.

En este trabajo se ha realizado un estudio de la influencia de un campo eléctrico sobre las propiedades de tres suelos con diferentes características. En una primera etapa se ha estudiado cómo una diferencia de potencial 20 V de corriente continua puede afectar al pH y a la conductividad eléctrica de cada uno de los suelos en un período de tratamiento de 4 d. Los resultados de esta primera etapa permitieron seleccionar aquel suelo que se veía menos afectado por la aplicación del campo eléctrico. Sobre este suelo se realizaron tres nuevos experimentos para determinar como se ven afectadas las propiedades del suelo (pH y conductividad eléctrica) en un rango de diferencia potencial que varió entre 10 y 40 V en el suelo seleccionado en la primera etapa. De esta segunda etapa se seleccionó la diferencia de potencial eléctrico para estudiar el crecimiento de tres especies de plantas: *Phalaris canariensis* (alpiste), *Brassica rapa* (grello) y *Zea mays* (maíz) que han sido seleccionadas como especies con capacidad remediadora de suelos contaminados con metales pesados y contaminantes orgánicos.

Los resultados expuestos a continuación se han llevado a cabo desde la mayor rigurosidad posible, estableciendo una línea lógica de experimentación donde los resultados de cada etapa experimental se emplean en el diseño de la siguiente etapa, estableciéndose una relación de dependencia entre los resultados obtenidos en cada una de ellos para poder presentar un trabajo sólido en todo su conjunto.

4.2 Resultados obtenidos del experimento Número 1

A continuación, se irán exponiendo sobre tablas y gráficas los valores obtenidos experimentalmente en cada uno de los tres tipos de suelo.

Humedad y peso.

Número de muestra	1	2	3
Peso	1091 gr	1421 gr	1777 gr
Humedad inicial	68,91%	26,92%	14,63%
Humedad final	72,22%	30,58%	14,83%

Tabla 4-1 Datos establecidos acerca de la humedad y el peso de las muestras. (exp.1)

Los valores que se observan en la tabla 4.1 y que se refieren al peso son los obtenidos momentos antes de comenzar a aplicar la diferencia de potencial sobre cada tipo suelo. Se midieron sobre la balanza teniendo en cuenta el peso de las propias celdas que contenían a cada uno de los suelos y cuyo valor de los mismos era de 810 g.

Por otra parte, con respecto a las humedades obtenidas en las muestras, apenas varían. Se mantuvo un refresco diario y constante sobre cada uno de los suelos mientras la aplicación de diferencia de potencial se llevaba a cabo. Finalmente, se observó que las muestras tras el experimento poseían un porcentaje de humedad sustancialmente mayor que el que existía inicialmente. Estos suelos al contener cierto porcentaje de humedad podrían experimentar la técnica de transporte por electroósmosis.

Si nos centrásemos en ese proceso, al aplicarse una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo se observaría a lo largo de unos días que una de las zonas terrestres más próximas a uno de los electrodos, tendría un mayor contenido de agua que el otro.

Finalmente, con los resultados obtenidos concluimos que el suelo número dos fue el que mayor porcentaje de humedad tuvo tanto al inicio como al final del experimento. Por otra parte, la humedad de la tierra número 3 fue la que tuvo un valor menor en ambos casos sin llegar a alcanzar ni siquiera el 15% del total y sin experimentar apenas variación.

El valor de la temperatura fue de 25,6 °C y permaneció con sutiles variaciones en todas las muestras tomadas durante los cinco días experimentales.

pH y Conductividad.

A pesar de que pudiera parecer que la técnica de electro migración es demasiado simple de entender, es importante saber que se ve afectada por una serie de factores que contribuyen de una forma muy notable sobre los contaminantes que se desplazan hacia cualquiera de los electrodos. Estas variables fundamentales utilizadas para analizar los experimentos llevados a cabo son el pH y la conductividad eléctrica que pueden experimentar variaciones en el suelo sometido a una corriente eléctrica.

Mediante el estudio de la diferencia de potencial aplicada sobre los suelos y el efecto que ésta tiene en la variación del pH, pueden obtenerse soluciones sobre cuáles son las zonas terrestres que se

encuentran en mejores condiciones y que son más ajenas a la contaminación existente. La zona ácida y tras la aplicación de la diferencia de voltaje, se corresponde con el ánodo mientras que la más básica se correspondería con el cátodo.

El estudio de la conductividad es el otro factor importante que nos puede permitir estudiar la influencia que existe sobre los suelos sometidos a una corriente eléctrica. Conforme mayor es la conductividad, mayor movimiento interno de los iones existirá hacia un electrodo u otro; esto es debido a que disminuye la resistencia eléctrica del propio sistema permitiendo así otorgar una mayor libertad en el movimiento de los iones.

En cuanto a su relación con el pH, pequeñas variaciones del mismo pueden afectar en gran medida a los valores de conductividad.

Las mejores condiciones del suelo para el crecimiento sostenible de las plantas son aquellas en las que se establece una uniformidad en el pH a lo largo del tiempo. Variaciones suaves de pH garantizan una estabilidad mayor sobre el mismo y en consecuencia una mejor amortiguación.

En el trabajo realizado, se aplicó sobre cada uno de los suelos una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo de 30 V, cumpliéndose de esta forma el efecto de transporte por electro-migración que transporta aniones y cationes a través del suelo.

Se pueden observar en las siguientes tablas los datos de pH y conductividad para los tres tipos de suelo determinados tanto al inicio como al final del experimento una vez transcurridos los cuatro días.

Las muestras de tierra escogidas para calcular tanto el valor de pH como el de la conductividad, fueron extraídas en las proximidades de los electrodos de grafito colocados equidistantes cada 5 cm, comenzando a tomarlas desde el ánodo y finalizando en el cátodo.

	SUELO 1		SUELO 2		SUELO 3	
	pH	λ	pH	λ	pH	λ
DATOS INICIALES	5,8	2,3 ms/cm	5,9	1,2 ms/cm	6,5	1392 μ s/cm
MUESTRA ÁNODO	1,9	1212 μ s/cm	2,1	1020 μ s/cm	7,7	239 μ s/cm
MUESTRA 1	4,7	1051 μ s/cm	5,5	916 μ s/cm	6,9	231 μ s/cm
MUESTRA 2	5,9	1372 μ s/cm	6,2	355 μ s/cm	6,6	307 μ s/cm
MUESTRA 3	5,8	1817 μ s/cm	6,0	858 μ s/cm	6,9	116,6 μ s/cm
MUESTRA 4	6,5	502 μ s/cm	6,7	184,3 μ s/cm	7,1	76,8 μ s/cm
MUESTRA 5	6,9	121 μ s/cm	6,9	107,1 μ s/cm	7,2	40,2 μ s/cm
MUESTRA CÁTODO	9,3	1071 μ s/cm	10,7	1195 μ s/cm	9,6	209 μ s/cm

*ms/cm= mili siemens/cm

* μ s/cm=micro siemens/cm

Tabla 4-2 Datos experimentales de pH y conductividad de las muestras

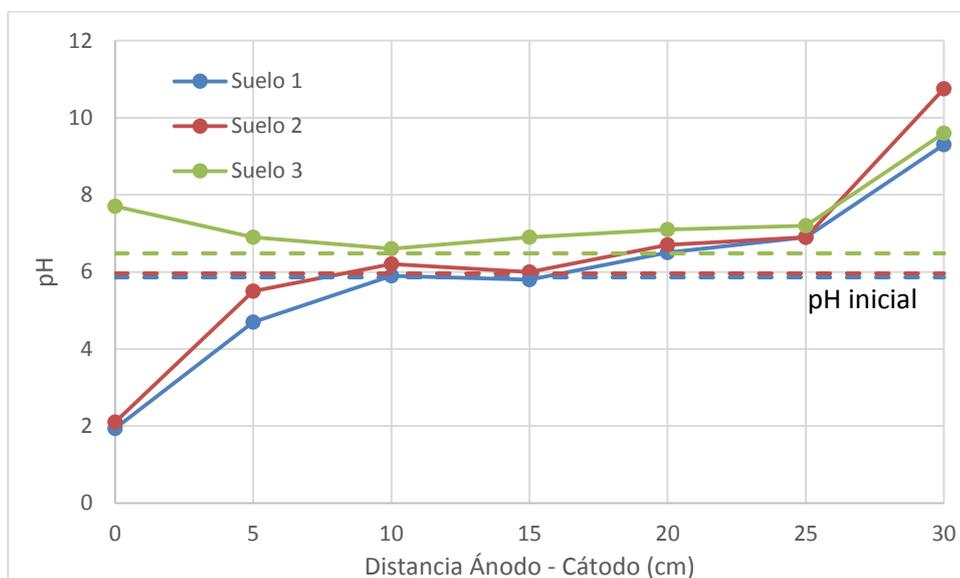


Figura 4.1 Gráfica comparativa del pH de los tres suelos

Las líneas discontinuas de las gráficas 4.1 y 4.2 representan los valores iniciales tanto de pH como de conductividad calculados al inicio del proceso mientras que las continuas reflejan los valores finales. Inicialmente y haciendo referencia a los datos del pH, los valores de los tres tipos de suelo se mantienen en valores muy próximos entre ellos caracterizándose por ser ácidos pero siendo muy próximos al pH neutro.

Los suelos uno y dos tienen un comportamiento muy similar. En referencia al pH, la acidez se hace muy notable en ambos ánodos teniendo valores próximos a 2. Conforme se va avanzando en distancia hacia el cátodo, el valor del pH va siendo cada vez menos ácido y se llega a experimentar cierta estabilidad cuando ya se encuentra una equidistancia entre los ánodos y los cátodos de los suelos respectivos. Al final del recorrido experimental hacia la zona en la que se encuentra el cátodo, las muestras superan el umbral de la neutralidad en pH experimentando un importante salto para llegar a la basicidad que se hace evidente en el cátodo.

Por otra parte, el comportamiento del suelo número tres es diferente al de los dos anteriores. Desde el principio y comenzando con las muestras escogidas próximas al ánodo, el pH ya es básico. Sufre una variación mínima manteniéndose prácticamente constante a lo largo de todo el proceso. No obstante sí que aparece un ligero decremento del mismo conforme se va aproximando hacia el cátodo pero sin perder nunca el carácter básico. En el último tramo se produce un aumento del pH de las mismas magnitudes que los dos suelos anteriores; esto garantiza que se cumple la teoría de que el ánodo es más ácido que el cátodo.

La zona del ánodo o lugar en el que se encuentran los protones, es la más ácida; esto implica la liberación de las sustancias que son nocivas y por tanto perjudiciales para los organismos y plantas que viven en el suelo; por otra parte, la zona del cátodo es la más básica de todas, ésta contribuye a la fijación de los contaminantes en el suelo. [8].

El agua presente en el suelo sirve como disolvente y ayuda gracias a la aplicación de un potencial determinado al transporte de los contaminantes a través de la estructura porosa del suelo.

La electrólisis del agua en la que se produce la reacción de oxidación en el ánodo y la reacción de reducción en el cátodo, es la que influye en el descenso del pH en el ánodo y en el ascenso del mismo en el cátodo. Los iones del agua H^+ y OH^- al sufrir el proceso de electromigración a través del suelo dirigiéndose a los electrodos opuestos, provocan una variación en el valor del pH. En el ánodo, el pH será ácido y en el cátodo será alcalino. Los valores diversos del pH a lo largo del suelo dependerán del grado de magnitud de transporte que hayan afectado a los iones del agua. [2] [17]

El mejor comportamiento para el crecimiento de las plantas es aquel en el que la variación del pH a lo largo del terreno se mantiene lo más constante posible. Las plantas necesitan para su crecimiento un pH estable y no es conveniente que tenga ni valores muy altos ni valores muy bajos.

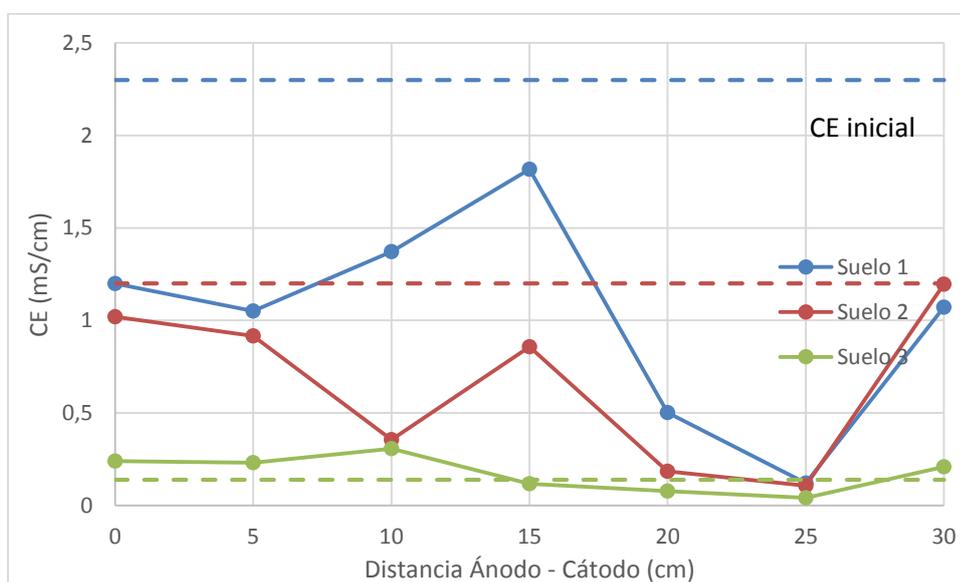


Figura 4.2 Gráfica comparativa de la conductividad de los tres suelos

Con respecto a la conductividad o medida de la capacidad de conducir la corriente eléctrica, en estos procesos conforme mayor es el valor de la misma menor resistencia eléctrica ofrece el suelo y por tanto se facilita la movilidad de los iones. A medida que más cantidad de iones se encuentran disueltos en el agua intersticial, mayor facilidad existirá para hacer frente a la propia resistencia eléctrica. Pequeños cambios en el pH pueden provocar una gran variación en el valor de la conductividad. En este caso, al no existir una elevada proporción de humedad en los suelos sobre los que se ha trabajado, los valores en conductividad tras aplicar el potencial no son muy elevados.

En el experimento se han obtenido resultados similares entre los suelos uno y dos. Hay que destacar que a una altura equidistante entre los electrodos, se ha producido un ligero ascenso de conductividad que se encontraba en decadencia. Este hecho se ha repetido al tomar las muestras próximas al cátodo.

Sin embargo, en el suelo número tres no solo los valores de la conductividad son mucho menores que en los anteriores suelos sino que también se observa una mayor uniformidad en el comportamiento

a lo largo del camino recorrido para llegar desde el ánodo hasta el cátodo. Esto cumple con las expectativas y la coherencia puesto que un desarrollo poco variable en el pH, se ha traducido también en la constancia en la conductividad.

Diferencia de Potencial.

La diferencia de potencial que se aplicó mediante la fuente de alimentación a los tres suelos en este experimento fue de 30 V. La aplicación del potencial es fundamental puesto que sin él, el proceso de transporte por electro-migración habría sido imposible. **Se define como la diferencia de potencial entre dos puntos. En este caso, se considera por punto a cada una de las tiras de grafito que se utilizaron en la elaboración de los tres procesos que se realizaron.**

El efecto que produce la aplicación del mismo sobre el terreno es provocar una separación de los protones y de los electrones que se encuentran disueltos en el agua en los interiores de la tierra para dirigirse a cada uno de los electrodos. A medida que mayor es el potencial que se aplique, el proceso de traslado de los iones se acelera.

La diferencia de potencial solo dependerá de la diferencia de potencial que se decida aplicar mediante la fuente de alimentación.

Durante el estudio se observó que existía cierto margen de error en cuanto a las mediciones de cada uno de los potenciales. Este margen de error se hizo evidente en todos los experimentos. Si aplicamos una diferencia de potencial un determinado valor entre el ánodo y el cátodo principal, debería producirse que la suma resultante de todas las mediciones individuales de cada una de las diferencias de potenciales medidas entre las porciones en las que se dividió el suelo (mediante las tiras de grafito), debería de ser similar. Sin embargo esto no fue así. Por tanto, el hecho de la variación de la diferencia de potencial a lo largo del experimento puede deberse a dos factores:

- Por una parte, la fuente de alimentación sufría a lo largo de los días ligeras variaciones en cuanto al potencial que se deseaba aplicar inicialmente; éste hecho viene a concluir que el funcionamiento de la fuente no fuera del todo preciso.
- Por otra parte, existe el error accidental cometido por causas humanas. En éste caso y asegurando la dedicación rigurosa en cada una de las mediciones, es posible que se produjese la mala lectura de los mismos o el poco equilibrio a la hora de medir con el voltímetro.

A pesar de ello, ambos factores no han supuesto un impedimento en el momento de obtener conclusiones experimentales.

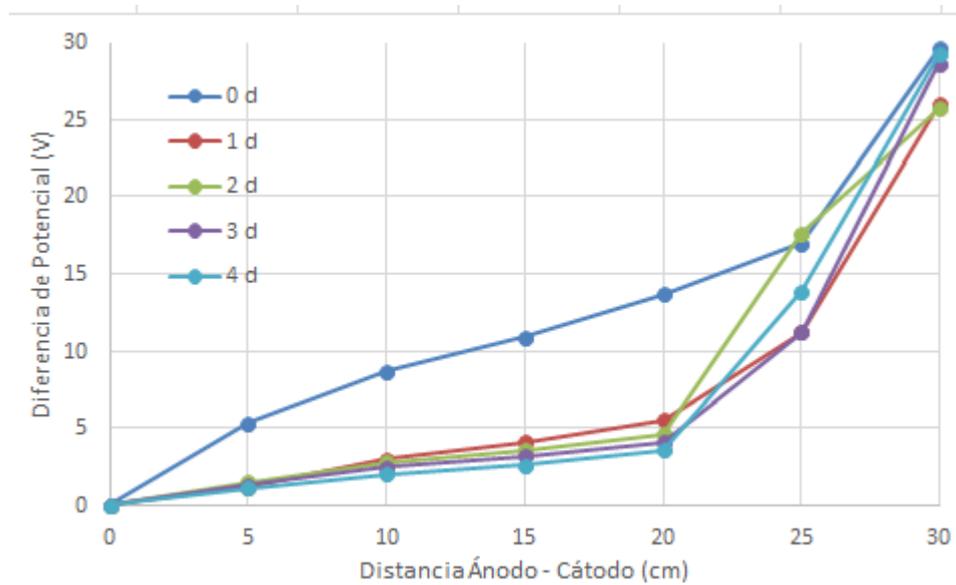
A continuación se exponen todos los datos obtenidos del experimento sobre tablas y gráficas tras aplicar una diferencia de potencial sobre cada uno de los suelos de 30 V.

Suelo nº 1	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
Anodo-5 cm	5,3	1,2	1,5	1,3	1,1
5-10 cm	3,4	1,8	1,3	1,2	0,9
10-15 cm	2,2	1,1	0,8	0,7	0,6
15-20 cm	2,8	1,4	1	0,9	1
20-25 cm	3,3	5,7	13	7,1	10,3
25 cm-Cátodo	12,6	14,8	8,1	17,4	15,2

Tabla 4-3 Diferencia de potencial suelo número 1

Un ejemplo claro de error experimental puede obtenerse en el día 2 del experimento (ver tabla 4-3) se puede observar que la suma total de todos los valores no es de 30 V como debería esperarse sino que se obtiene como resultante un valor de 25,7 voltios.

Éste margen de error obtenido no fue constante, existían mediciones de las cuales sí se obtenía el valor esperado mientras que en otras no, pero en cualquier caso, el error cometido no se considera significativo y se pueden obtener conclusiones claras del comportamiento de cada suelo.



Gráfica Figura 4.3 Comparativa en días sobre la diferencia de potencial en el suelo número 1

A excepción del día 0 en el cual la aplicación inicial de diferencia de potencial entre ambos electrodos difiere notablemente del resto de días, el resto de días poco a poco va estableciéndose una coherencia en cuanto a los datos esperados en cada una de las porciones del suelo.

Conforme pasan los días, los valores de potencial entre el ánodo principal y los 5 primeros centímetros van disminuyendo hasta llegar al valor de 1,1 V (inicialmente era de 5,3 V). Por otra parte, ocurre el efecto contrario en las mediciones realizadas entre los 25 últimos cm y el cátodo principal.

Como conclusión experimental a este primer experimento se concluye que conforme pasan los días, el potencial aplicado tiende a agruparse mayoritariamente en la zona donde se encuentra el cátodo en contra de la del cátodo pero a pesar de ello la distribución del potencial es uniforme.

Suelo nº 2	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
Anodo-5 cm	6	2,8	2,4	2,1	2
5-10 cm	2,6	1,1	1	0,8	0,7
10-15 cm	3,1	1,4	1,1	1	1
15-20 cm	2,7	1,2	1	1,2	4,5
20-25 cm	2,3	1,1	6,4	9,6	11,5
25 cm-Cátodo	12,8	21,8	17	13,2	9,7

Tabla 4-4 Diferencia de potencial suelo número 2

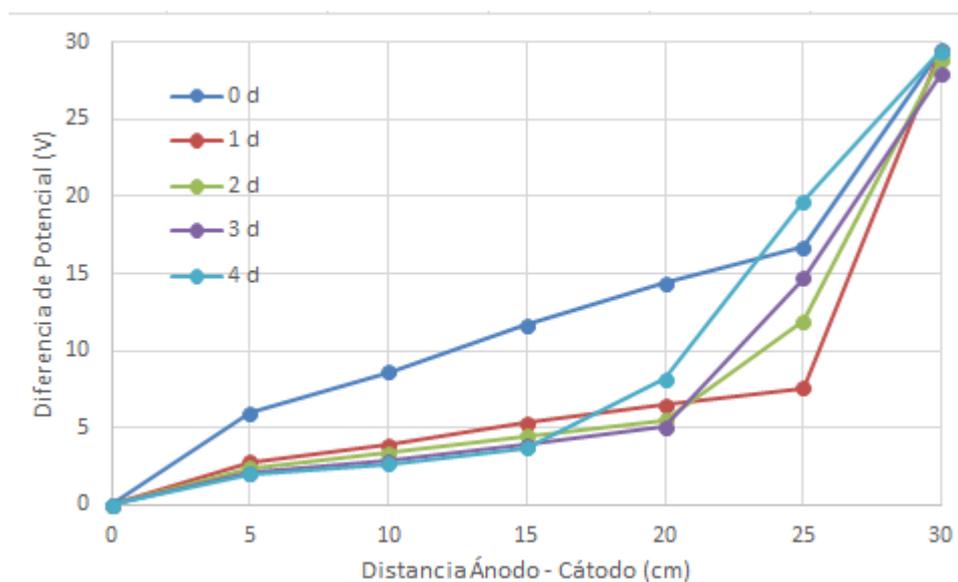


Figura 4.4 Comparativa en días sobre la diferencia de potencial en el suelo número 2

Los resultados expuestos cumplen un comportamiento similar al del suelo número 1. Hay un crecimiento importante de variación de potencial en el tramo 20-25 cm en los días 1 y 2.

De nuevo, se vuelve a aglutinar el potencial en el electrodo negativo (cátodo).

El hecho de que exista al inicio tanta diferencia de potencial entre la gráfica correspondiente al día 0 y el resto de gráficas se debe a que es necesario el transcurso de un ligero periodo de tiempo para que se establezca el proceso y se mantenga el comportamiento sin fuertes variaciones. No obstante, en el último recorrido sí que se asemejan más.

Suelo nº 3	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
Anodo-5 cm	6	3,6	2,9	3	2,8
5-10 cm	3,4	2,3	1,9	2	2
10-15 cm	3	1,2	1,4	1,5	1,7
15-20 cm	3,1	2,1	2,4	2,7	8,1
20-25 cm	2	1,3	6,9	9,2	6,7
25 cm-Cátodo	11,6	18,5	13,4	9,7	7,3

Tabla 4-5 Diferencia de potencial suelo número 3

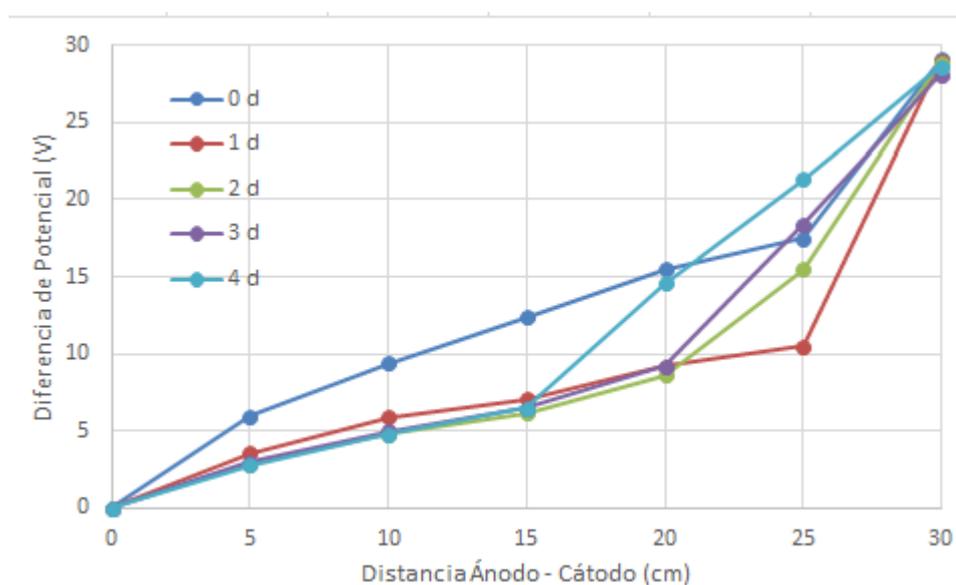


Figura 4.5 Comparativa en días sobre la diferencia de potencial en la tierra número 3

Como puede observarse, el comportamiento de este suelo difiere al de los dos anteriores no solo en cuanto a valores de pH y conductividad sino también en cuanto al comportamiento del campo eléctrico.

La variación de potencial en el día 0 respecto del resto de días es evidente pero mucho menos marcada que en los anteriores experimentos.

El proceso sigue el mismo comportamiento esperado que en los anteriores (en el cual el potencial se va acumulando en el cátodo) pero en este caso no existe tanta variación en cuanto al potencial existente entre el ánodo y el cátodo. Es importante además destacar el salto producido en potencial entre la zona de los 15-20 cm y su zona contigua.

El suelo que se decidió escoger para realizar el siguiente experimento fue el número 3 ya que era el que mejor reunía los requisitos que se pretendían al producirse sobre él un menor número de cambios tanto en pH como en conductividad. A continuación se detallan los resultados obtenidos del suelo número 3. En la segunda etapa experimental, se utilizó el suelo 3 para estudiar el efecto de la corriente eléctrica sobre sus propiedades (pH y conductividad eléctrica) en un rango de voltaje entre 10 y 40 V. De la misma forma que en el anterior experimento, se expondrán sobre tablas y gráficas los datos calculados y se establecerán las conclusiones obtenidas de este estudio.

4.3 Resultados obtenidos del experimento Número 2

Humedad y peso.

MUESTRA	1	2	3
PESO	1671 gr	1328 gr	1392 gr
HUMEDAD INICIAL	20,86%	20,86%	20,86%
HUMEDAD FINAL	30,21%	21,7%	21,12%

Tabla 4-6 Datos establecidos acerca de la humedad y el peso de las muestras. (exp.2)

Para realizar el experimento y obtener los resultados que se detallan a continuación, se empleó el suelo número 3. Los pesos se midieron teniendo en cuenta las celdas. Los porcentajes en humedad coinciden al inicio ya que se trata del mismo suelo. Respecto al porcentaje en humedad final de la muestra 1, se observa que posee un 10% más que las dos muestras posteriores. La causa es debida a que tras limpiar el envase de plástico, no fue secado tan bien como los otros 2, de ahí su valor. En cambio, las muestras 2 y 3 apenas difieren su valor y se mantienen próximas al 20%.

pH y Conductividad.

	SUELO 3 (10 v)		SUELO 3 (20 v)		SUELO 3 (40 v)	
	pH	λ	pH	λ	pH	λ
DATOS INICIALES	7,5	139,2 $\mu\text{s/cm}$	7,5	139,2 $\mu\text{s/cm}$	7,5	139,2 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA ÁNODO	5,8	42,3 $\mu\text{s/cm}$	5,1	127,2 $\mu\text{s/cm}$	3,6	517 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 1	5,9	25 $\mu\text{s/cm}$	6,3	49,4 $\mu\text{s/cm}$	5,9	151 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 2	5,8	26,1 $\mu\text{s/cm}$	6,5	85,5 $\mu\text{s/cm}$	5,8	196,5 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 3	5,8	24,2 $\mu\text{s/cm}$	6,7	45,4 $\mu\text{s/cm}$	5,9	73,9 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 4	5,9	45,2 $\mu\text{s/cm}$	6,7	21,7 $\mu\text{s/cm}$	6,6	56,6 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 5	5,9	20 $\mu\text{s/cm}$	6,8	101,9 $\mu\text{s/cm}$	5,8	27,2 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA CÁTODO	6,0	82,8 $\mu\text{s/cm}$	5,7	104,7 $\mu\text{s/cm}$	7,2	22,8 $\mu\text{s/cm}$

* $\mu\text{s/cm}$ =micro siemens/cm

Tabla 4-7 Datos experimentales de pH y conductividad de las muestras.

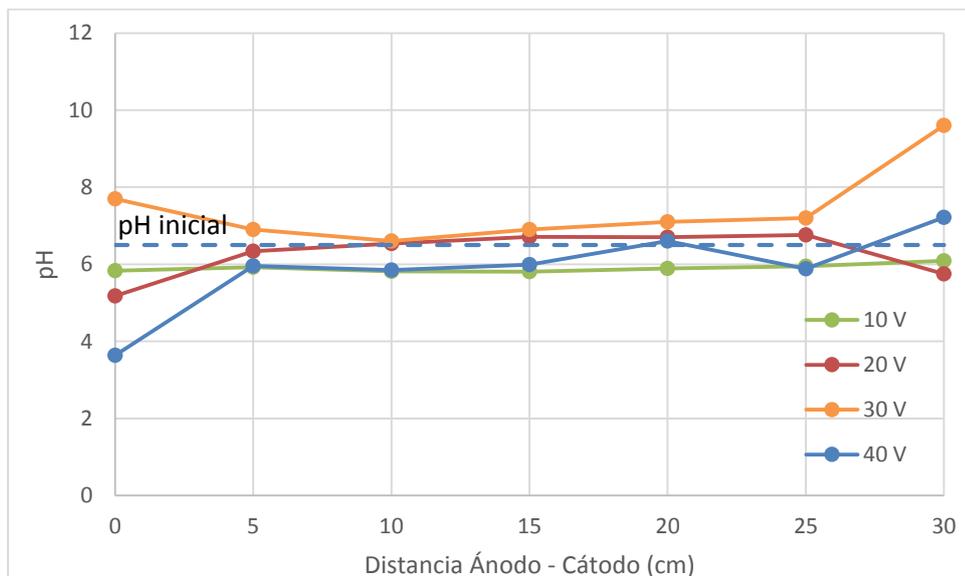


Figura 4.6 Gráfica comparativa del pH (experimento número 2)

Se puede observar que existe cierta variación al aplicar diferentes potenciales sobre este tipo de tierra. La recta referente a los 30 V hace referencia al pH que se obtuvo en el anterior experimento. Sin

embargo, puede verse que los pH de los tres suelos que se encuentran en el ánodo son ácidos (a diferencia que en el experimento número uno) pero con valores muy próximos al neutro. A medida que se van seleccionando diversas muestras, el pH de las mismas y el del experimento anterior, se van igualando y siguen de nuevo un equilibrio sin experimentar apenas saltos variables.

Sin embargo, a pesar de las ligeras variaciones, el experimento sobre el cual se aplicaron 40 V se acidifica más que los anteriores lo cual hace que se genere una variación más alta en las características del suelo.

Una aplicación de 10 V apenas varía el valor del pH por lo tanto el hecho de aplicar un potencial de valor tan pequeño tampoco supone una gran ayuda para el objetivo que se pretende.

La aplicación de 20 V o de 30 V supone las mejores condiciones puesto que el comportamiento que se observa supone un término intermedio entre los 10 V y los 40 V.

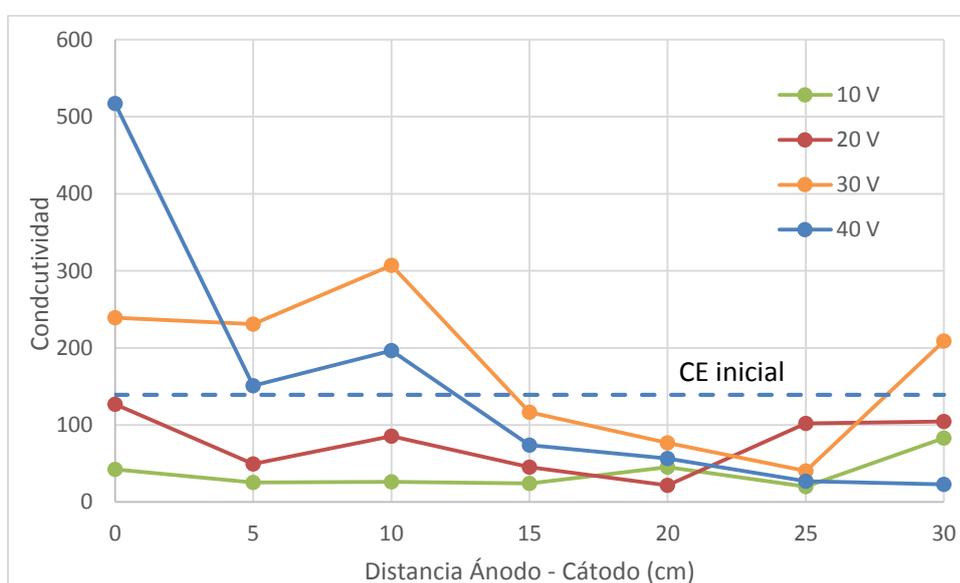


Figura 4.7 Gráfica comparativa de la conductividad (experimento número 2)

La recta referente a los 30 V, de la misma forma que en la gráfica anterior en pH, representa el valor en conductividad que se obtuvo en el anterior experimento. Son valores de conductividad bastante pequeños pero esto es comprensible si se observa la poca cantidad de humedad que contenía la tierra en cuestión.

La recta discontinua observada en la gráfica, se corresponde con la medición en conductividad de la muestra terrestre antes de la aplicación de las diferencias de potencial.

La recta sobre la cual se aplicó un potencial de 20 V, comienza en el ánodo teniendo un valor en conductividad bastante alto en relación con las demás. Posteriormente disminuye su valor inicialmente de una forma bastante acentuada que se sigue llevando a cabo aunque más ligeramente hasta su llegada al cátodo a pesar del aumento experimentado entre los 5 cm y los 10 cm.

Las gráficas de los potenciales de 10 V y 20 V, apenas sufren una variación relevante según se va avanzando hacia el cátodo desde el ánodo.

Diferencia de Potencial.

Suelo nº 3 (10v)	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
Anodo-5 cm	3,5	3	3,5	3,6	4
5-10 cm	5,2	4,1	5,2	5,3	5,6
10-15 cm	5,8	4,5	5,6	6,1	6,4
15-20 cm	6,3	5	6	6,8	7
20-25 cm	6,7	5,3	6,2	7,4	7,5
25 cm-Cátodo	8,7	7,2	8,4	9,6	9,6

Tabla 4-8 Diferencia de potencial tierra número 3 con una aplicación de 10 V.

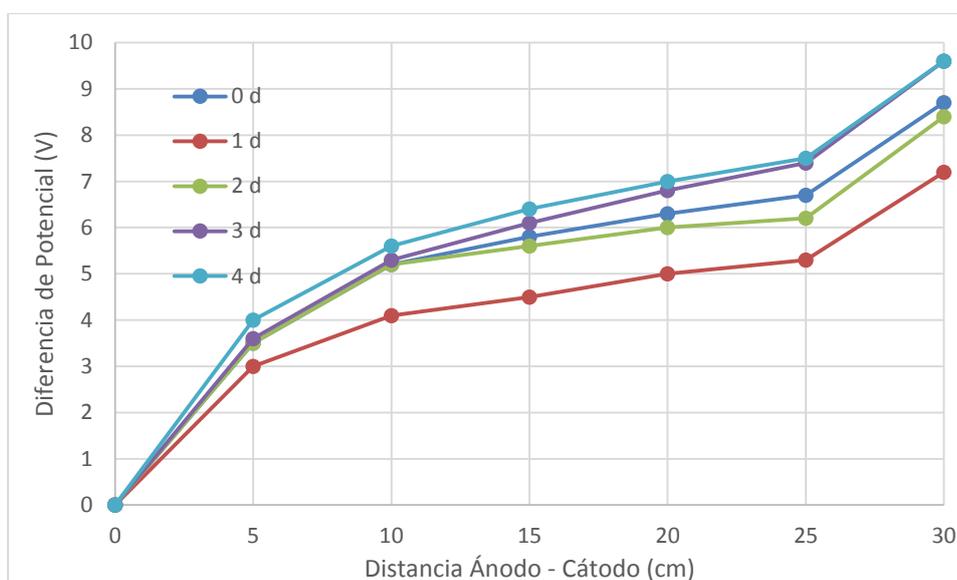


Figura 4.8 Evolución gráfica durante una aplicación de 10 V entre ánodo y cátodo

Con una aplicación de 10 V, los valores de diferencia de potencial en cualquiera de los días van creciendo cada vez más entre el ánodo y el cátodo. No obstante, la variación producida es minúscula.

La diferencia de potencial al aplicarse un potencial de 10 V va variando en orden creciente pero de una forma muy ligera llegando a obtenerse prácticamente valores similares en los días 3 y 4. Esto concluye que conforme pasan los días, el proceso se va estabilizando cada vez más.

La diferencia de potencial más pequeña se encuentra en el día 1 y desde ese momento va creciendo.

Tierra n° 3 (20 v)	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
Anodo-5 cm	4,3	4	3,8	4,6	4,8
5-10 cm	6	5,6	5,3	6,5	6,6
10-15 cm	7,2	7,7	6,3	9	8,9
15-20 cm	9,4	10	7,7	11,6	11,8
20-25 cm	11,4	11,6	9	14,4	14,5
25 cm-Cátodo	15,7	16,9	13,2	19,8	19,6

Tabla 4-9 Diferencia de potencial tierra número 3 con una aplicación de 20 V

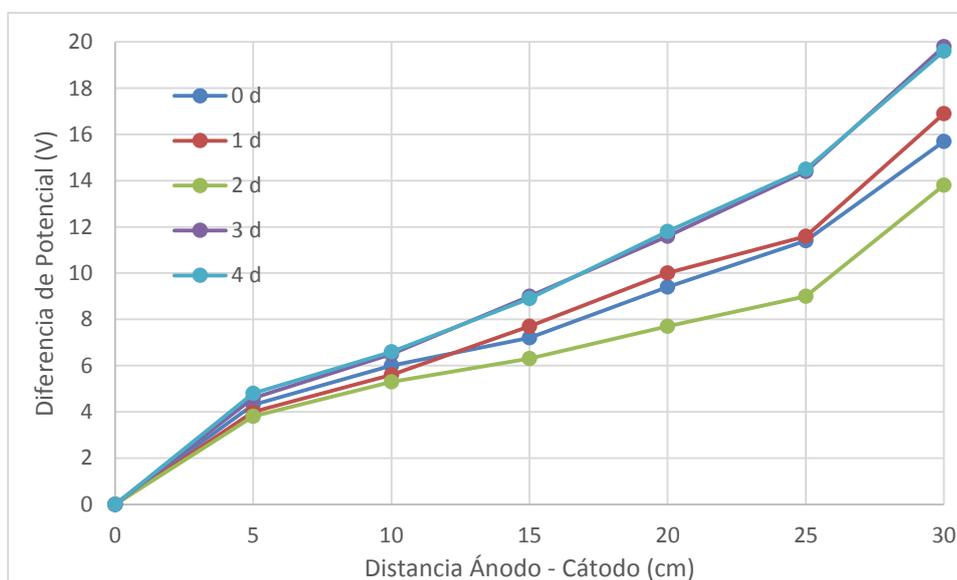


Figura 4.9 Evolución gráfica durante una aplicación de 20 V entre ánodo y cátodo

Con un aumento de la diferencia de potencial de 20 V, el comportamiento no varía respecto a la anterior muestra en la que se aplicaron 10 V. Como se ve, la constancia en el potencial todavía se acentúa más en los dos últimos días de experimento; se podría decir que son iguales.

La máxima diferencia de potencial entre los dos electrodos se denota en el día 3 mientras que la mínima se refleja en el día 2.

Entre los 5 cm y los 10 cm es donde se produce el menor salto y por tanto menor pendiente tiene mientras que el mayor salto se lleva a cabo desde los 15 cm hasta llegar al cátodo, es decir, al final del recorrido del proceso.

Tierra nº 3 (40v)	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
Anodo-5 cm	8,6	8,9	10,4	16,8	19,9
5-10 cm	13,4	13,1	14,1	20,3	23,6
10-15 cm	17,4	17	17,3	24,1	26,3
15-20 cm	22,6	21,4	22,4	29	31
20-25 cm	26,4	24,8	25,9	32,2	33,6
25 cm-Cátodo	37,1	36	35,4	39,9	39,8

Tabla 4-10 Diferencia de potencial tierra número 3 con una aplicación de 40 V.

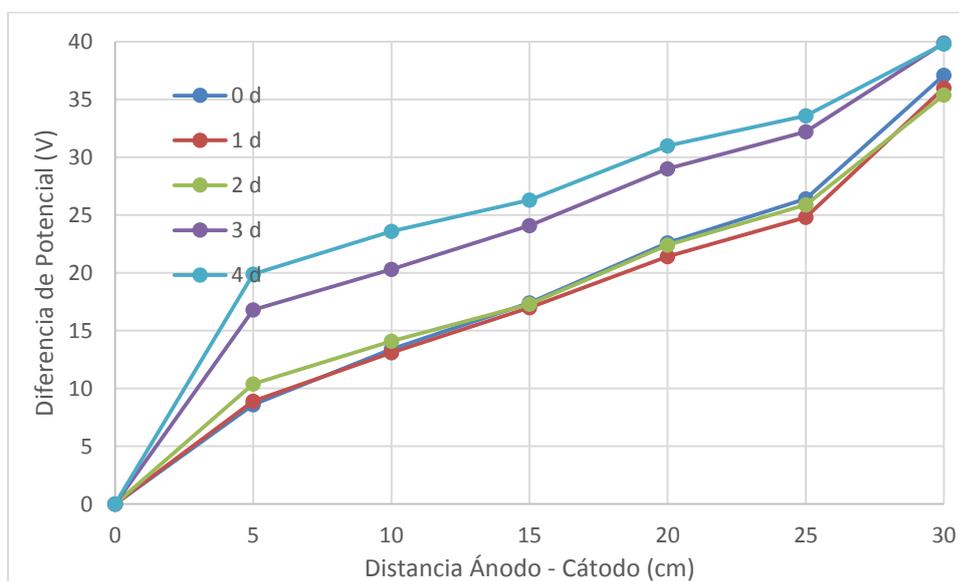


Figura 4.10 Evolución gráfica durante una aplicación de 40 V entre ánodo y cátodo

Al aplicarse un potencial de 40 V entre el ánodo y el cátodo, la variabilidad es mayor que en los dos casos anteriores, algo que no interesa puesto que lo que se busca son las variaciones ligeras de potencial como ocurría con la aplicación de 20 V o 30 V.

Existe una gran similitud en cuanto a diferencia de potencial entre los días 0 y 1 y los días 1 y 2. En los experimentos sobre los que aplicamos 10 V y 20 V el mayor grado de similitud en cuanto al potencial se denotaba en los últimos días.

La máxima diferencia de potencial entre ambos electrodos se denota en el día 0 mientras que curiosamente la mínima recae en el último día.

La mayor diferencia de potencia se acentúa entre los dos últimos días.

Se concluye por tanto, que la aplicación de 20 V o de 30 V son los que mejor responden al objetivo que se pretende garantizando además que la uniformidad del suelo no varíe de una forma importante. A pesar de que los suelos sobre los que se aplicó un potencial de 20 y de 30 V presentan características muy similares, la mejor elección sería la de la aplicación de 20 V puesto que supone un gasto energético menor que los 30 V.

4.4 Resultados obtenidos del experimento Número 3

A continuación se detallan los datos que se obtuvieron en la tercera semana de experimentación. Este último experimento se va a estudiar cómo el campo eléctrico va a afectar al crecimiento de tres especies de plantas: *Phalaris canariensis*, *Brassica rapa* y *Zea mays* conocidas por su capacidad remediadora de suelos contaminados con metales pesados y contaminantes orgánicos. En este experimento se ha empleado el suelo 3 con un voltaje de 20 V. Como se ha visto en el apartado anterior, estas condiciones no afectan seriamente a las propiedades del suelo en un tratamiento de 4 a

MUESTRA	<i>P.canariensis</i> (6 g)	<i>B.rapa</i> (5 g)	<i>Z.mays</i> (39 granos)
PESO	1700 g	1700 g	1700 g
HUMEDAD INICIAL	20,95%	20,95%	20,95%
HUMEDAD FINAL	16,53%	23,11%	14,86%

Tabla 4-11 Datos establecidos acerca de la humedad y el peso de las muestras. (exp.3)

Se realizó una mezcla de del suelo n° 3 con un restante porcentaje del 10% del suelo n° 1 (una tierra vegetal) puesto que este último contenía nutrientes favorables al desarrollo de las plantas sobre las cuales se iba a estudiar el efecto que la fitorremediación producía sobre cada uno de los cultivos realizados.

El peso indicado, que es el mismo para los tres tipos de suelos que se prepararon, se realizó teniendo en cuenta el de las propias celdas (31,5 cm x 17,5 cm x 10 cm) las cuales pesaba cada una 810 g.

El porcentaje inicial es el mismo para la mezcla que conformó los tres tipos de suelos sobre los que se iba a trabajar. Un porcentaje que muestra el carácter más bien seco del mismo. Los valores finales de las humedades, transcurridos los diez días que duró el experimento, difieren ligeramente unos de otros en que se observó un ligero aumento para el cultivo de *B.rapa* mientras que se produjo un decremento en los valores tanto *del P.canarienses* como *del Z.mays*.

Se tuvo en cuenta a lo largo de los diez días que duró el experimento el valor de la intensidad de corriente que circulaba internamente por el suelo.

En la tabla se reflejan los datos que se obtuvieron:

Intensidad	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 10
Cultivo <i>P.canariensis</i>	5	2,03	1,66	1,56	1,34	1,14	0,82	0,67	0,44
Cultivo <i>B.rapa</i>	5,2	1,92	1,61	1,48	1,3	0,91	0,78	0,54	0,27
Cultivo <i>Z.mays</i>	5,53	1,83	1,57	1,46	1,27	0,84	0,79	0,76	0,52

*Los valores de la corriente eléctrica obtenidos son en mA

Tabla 4-12 Valores de la intensidad de corriente a lo largo de los diez días de duración del experimento.

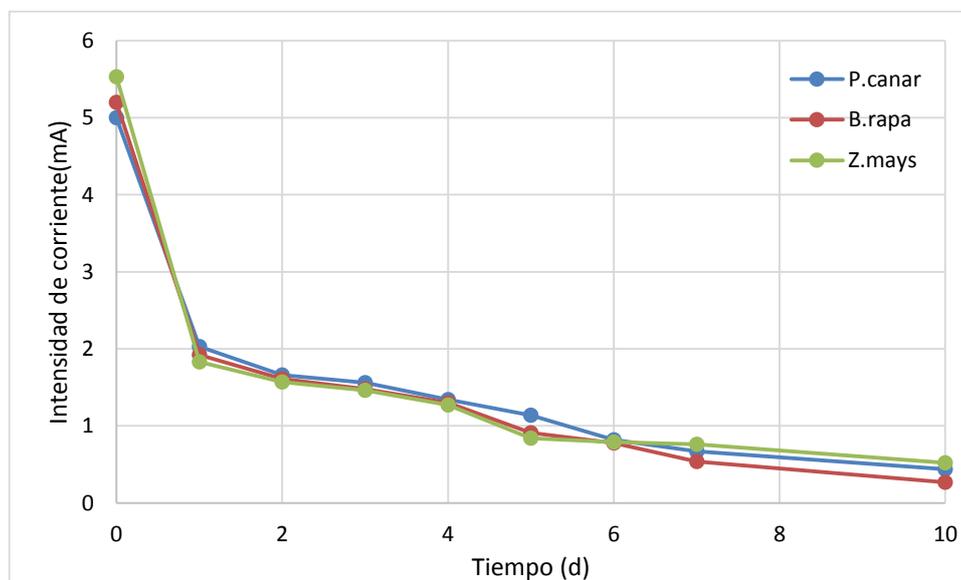


Figura 4.11 Evolución gráfica en intensidad de corriente durante el experimento

Los valores obtenidos respecto a la intensidad de corriente representan el comportamiento del flujo de iones que circulan internamente por el suelo. Como se puede observar, presentan un

comportamiento prácticamente similar en los tres casos; ésta similitud en intensidad facilita la posterior comparación de los diversos datos que obtengamos en pH, conductividad y Diferencia de potencial ya que parten de unas condiciones similares.

A continuación, en la siguiente tabla se van a observar los datos en pH y en conductividad de cada uno de los suelos:

	<i>P.canariensis</i>		<i>B.rapa</i>		<i>Z.mays</i>	
	pH	λ	pH	λ	pH	λ
DATOS INICIALES	6,5	139,2 $\mu\text{s/cm}$	6,5	139,2 $\mu\text{s/cm}$	6,5	139,2 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA ÁNODO	2,4	1648 $\mu\text{s/cm}$	2,8	1696 $\mu\text{s/cm}$	2,4	1540 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 1	5,7	190,7 $\mu\text{s/cm}$	6,4	140,3 $\mu\text{s/cm}$	6,2	223 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 2	5,9	54,9 $\mu\text{s/cm}$	6,5	64,1 $\mu\text{s/cm}$	6,5	50,7 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA 3	5,9	35 $\mu\text{s/cm}$	6,8	29,2 $\mu\text{s/cm}$	6,8	26,7 $\mu\text{s/cm}$
MUESTRA CÁTODO	8,3	107,4 $\mu\text{s/cm}$	7,7	88,3 $\mu\text{s/cm}$	10,1	531 $\mu\text{s/cm}$

* $\mu\text{s/cm}$ =micro siemens/cm

Tabla 4-13 Datos experimentales de pH y conductividad de las muestras.

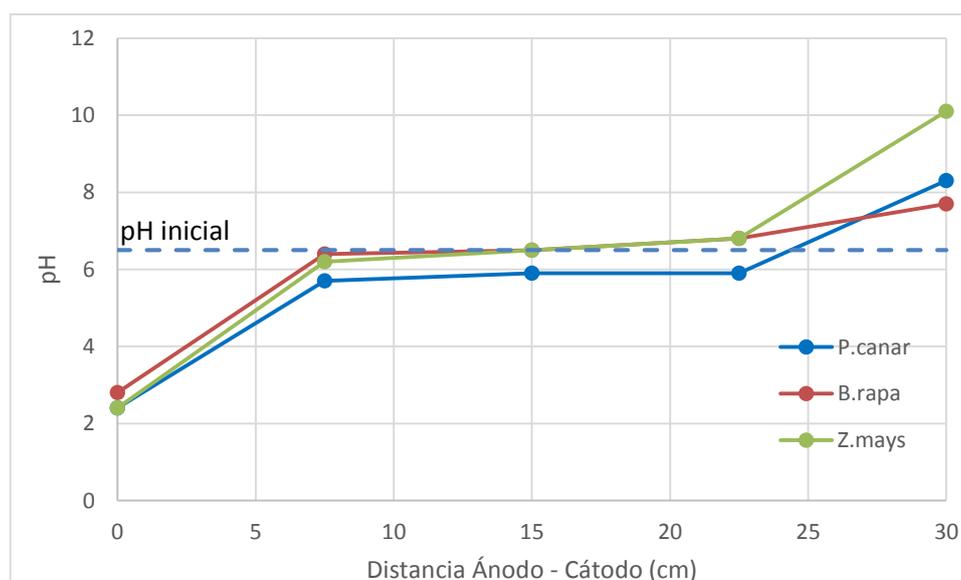


Figura 4.12 Gráfica comparativa del pH (experimento número 3)

Los datos en pH obtenidos experimentan cambios mayores que en los calculados en el suelo n° 3 del anterior experimento. Esto se debe a que para el presente experimento se aplicó un ligero porcentaje del suelo n°1 puesto que contenía condiciones más favorables para el cultivo de la planta ya que al poseer nutrientes, facilitaría el crecimiento de la misma, y lo que es más importante, el tiempo de tratamiento pasó de 4 a 10 días.

No obstante, la variación tampoco es de grandes dimensiones. Inicialmente, en los primeros 5 cm el pH se acidifica mucho para una aplicación de diferencia de potencial de 20 V. La recta discontinua presente en la gráfica se corresponde con el valor en pH obtenido inicialmente antes de aplicar la diferencia de potencial. Durante los posteriores datos tomados, se mantiene una constancia en el pH de los tres suelos muy próximo al neutro. Por último, al final del recorrido hacia el cátodo, en los últimos 5 cm, el pH asciende hasta valores alcalinos superando el umbral del pH neutro.

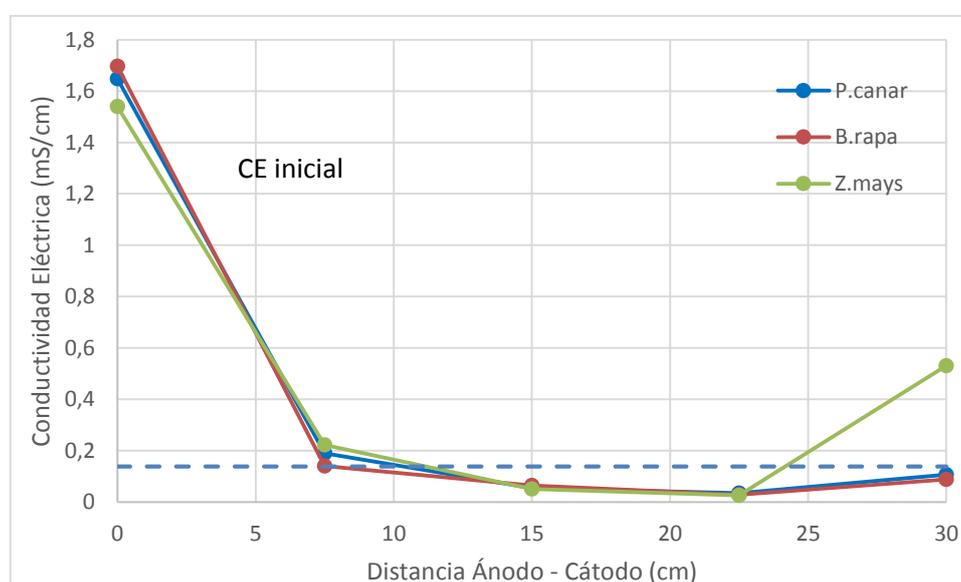


Figura 4.13 Gráfica comparativa de la conductividad (experimento número3)

La conductividad desciende de una forma muy importante desde el ánodo hasta los 8 cm. Los valores son similares en los tres suelos de la misma forma que lo era el pH. El importante salto al inicio del recorrido hacia el cátodo, no contradice la teoría puesto que la variación inicial en pH también era elevada. La conductividad va acorde con él. La conductividad es muy pequeña tanto al inicio del proceso en el cual todavía no se había aplicado la diferencia de potencial como a lo largo de todo el proceso una vez aplicada si se tiene en cuenta que los valores de la gráfica son en ms/mal final del experimento, como era de esperar, la conductividad incrementa ligeramente de la misma forma en que lo hacía el pH.

A continuación se obtuvieron los datos de la diferencia de potencial de los suelos sobre los que se cultivó *P.canariensis*, *B.rapa* y *Z.mays* respectivamente.

Cultivo <i>P.canariensis</i>	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 10
Anodo-7,5 cm	6,34	2,8	2,7	2,5	2,4	2,3	2,9	2,8	4,1
7,5-15 cm	2,94	1,3	1,3	1,2	1,3	1,4	1,3	1,9	2,4
15-22,5cm	3,08	1,4	1,4	1,9	3,6	5,6	5,5	6,3	6,9
22,5cm-Cátodo	8,44	15,1	15,2	15	13,4	11,5	10	8,6	6,6

Tabla 4-14 Diferencia de potencial del cultivo de *Phalaris canariensis*

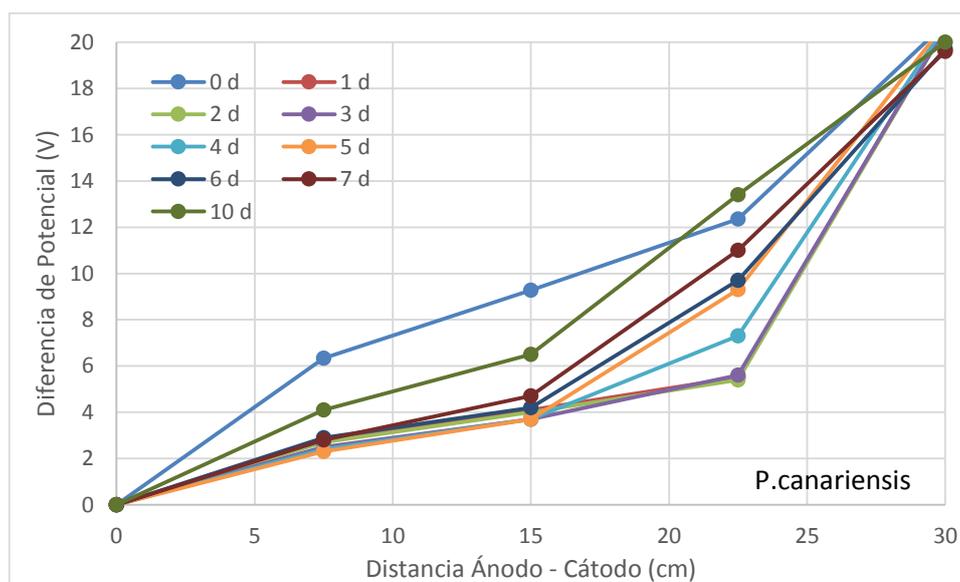


Figura 4.14 Evolución diferencia de potencial del cultivo de *P.canariensis*

La distribución del potencial supone un crecimiento bastante constante en el cultivo del *P.canariensis*. Los valores desde el ánodo hasta los primeros 15 cm, no son muy elevados pero a partir de ahí van creciendo de una forma más brusca especialmente en los dos últimos días. La fuente de alimentación variaba de vez en cuando ligeramente los valores del potencial llegando casos en los que superaban los 20 V, de ahí que ciertas rectas superen el umbral de 20 V. El crecimiento del *P.canariensis* fue muy lento a lo largo de los 10 días; apenas se observó el leve crecimiento de más de una docena de tallos. Por tanto, el estudio de la aplicación de la fitorremediación a partir del *P.canariensis* sobre esta mezcla de suelo, no es muy efectiva.

La imagen que se observa a continuación se corresponde con el máximo crecimiento que experimentó el *P.canariensis* durante los diez días.



Figura 4.15 Crecimiento *P.canariensis* hasta una altura media de 11 cm

Cultivo <i>B.rapa</i>	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8
Anodo-7,5 cm	6,34	2,7	2,6	2,5	2,7	3	3,2	4,5	6,6
7,5-15 cm	3,36	1,3	1,4	1,3	1,4	1,8	1,9	2,2	2,5
15-22,5cm	2,92	1,1	1,1	2,5	4,2	5,7	5,5	5,2	4,1
22,5cm-Cátodo	8,12	15,7	15,5	14,4	12,4	10,2	7,9	7,9	7,5

Tabla 4-15 Diferencia de potencial del cultivo de *Brassica rapa*

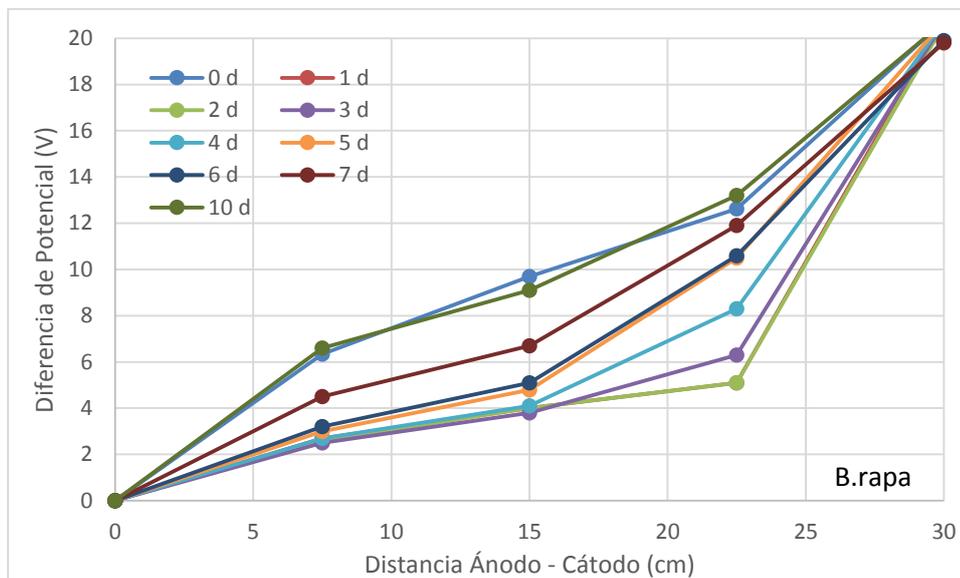


Figura 4.16 Evolución diferencia de potencial del cultivo de *B.rapa*

Observándose un desarrollo en potencial similar al del *P.canariensis*, el comportamiento que se obtuvo fue mucho más efectivo llegándose a obtener alturas de la planta en cuestión de unos 19 cm aproximadamente para el mismo periodo de tiempo.

Curiosamente, la zona en la que se encontraba el ánodo fue la que mayor cantidad de *P.canariensis* creció. El hecho de ocurrir dicho crecimiento mayormente en la zona del ánodo concluye a que es muy eficaz su cultivo en zonas donde el pH es más ácido. Por tanto la fitorremediación respondería muy bien en ese tipo de acidez. En cambio, la efectividad es menor si ocurre en suelos alcalinos. La imagen demuestra el éxito del crecimiento del *B.rapa*. La fitorremediación sería muy efectiva para este tipo de suelo.



Figura 4.17 Desarrollo del *B.rapa* durante el último día del experimento. (Imag.1)

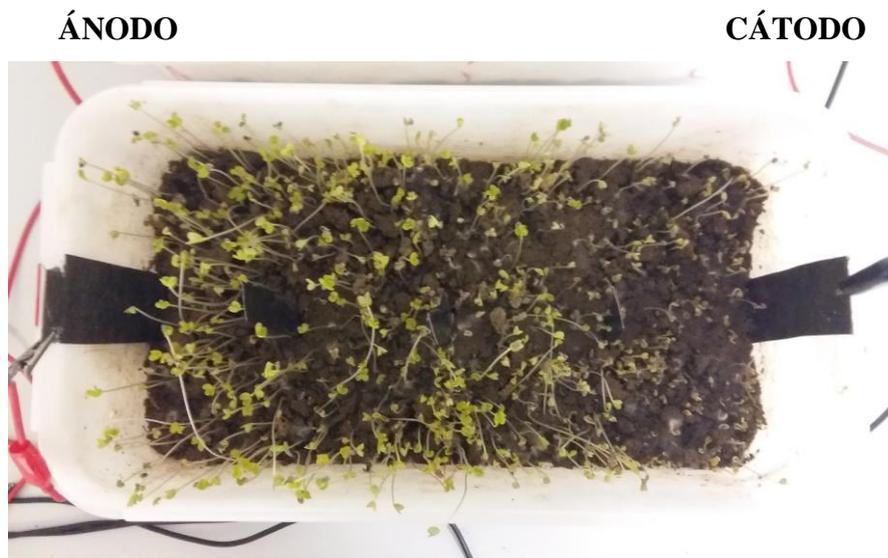


Figura 4.18 Desarrollo del *B.rapa* durante el último día del experimento. (Imag.2)

Por último, la evolución del potencial del *Z.mays* a lo largo de los días fue la siguiente:

Cultivo <i>Z.mays</i>	DIA 0	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7	DIA 8
Anodo-7,5 cm	5,73	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,9	3,7	2,4
7,5-15 cm	3,14	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1	2,6
15-22,5cm	3,4	1,1	1,3	2,6	4,3	5,6	5,8	5,4	7,4
22,5cm-Cátodo	8,51	15,8	15,9	14,8	13,1	11,7	10,6	8,6	7,4

Tabla 4-16 Diferencia de potencial del cultivo de *Zea mays*

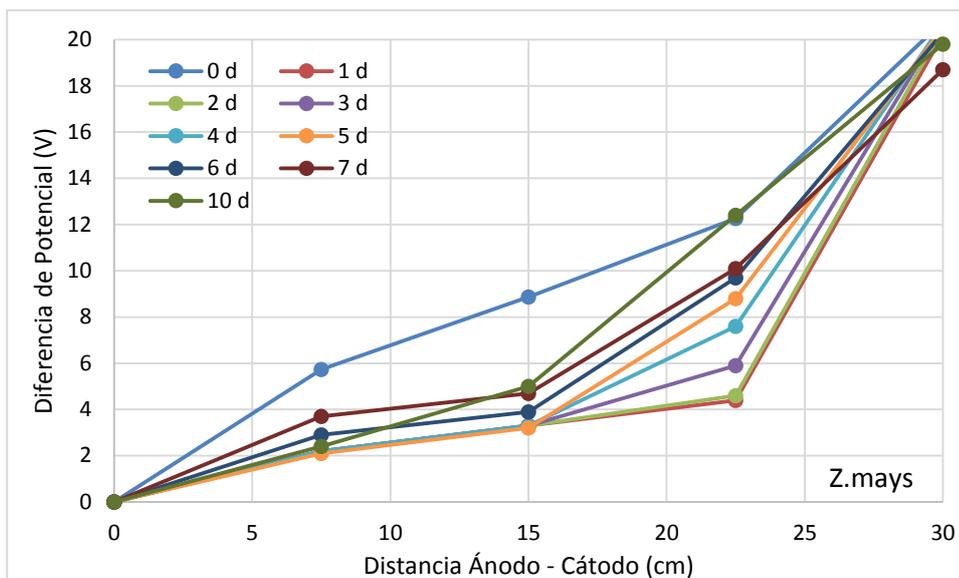


Figura 4.19 Evolución diferencia de potencial del cultivo de *Z.mays*

El comportamiento del desarrollo del potencial, de la misma forma que en el cultivo del *P.canariensis* y del *B.rapa* fue muy similar concentrándose los valores más altos entre los 25 cm y el cátodo.

El *Z.mays* apenas creció, se encontró falto de condiciones que facilitaran su desarrollo como por ejemplo la falta de luz solar. No es adecuado por tanto el cultivo del mismo si lo que se pretende es que se produzca el efecto de la fitorremediación. Los resultados obtenidos determinaron que con este tipo de mezcla de suelo no responde bien al crecimiento y por tanto carece de efectividad para el objetivo que se pretendía. La imagen muestra el poco éxito que tuvo el cultivo del *Z.mays* para llevar la fitorremediación a pesar de una aplicación de potencial eléctrico. Es posible que si el potencial aplicado hubiese sido mayor, quizás el desarrollo del *Z.mays* habría sido mayor.

ÁNODO

CÁTODO



Figura 4.20 Desarrollo del *Z.mays* durante el último día del experimento.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Este trabajo ha estudiado la posibilidad de utilizar un campo eléctrico de corriente continua de baja intensidad para mejorar la capacidad de fitorremediación de tres especies distintas de plantas seleccionadas: *Phalaris canariensis* (alpiste), *Brassica rapa* (grelo) y *Zea mays* (maíz).

La corriente continua puede afectar a las propiedades del suelo (pH y conductividad eléctrica,...) por lo que inicialmente se tomaron tres suelos de características diferentes y se estudió el comportamiento bajo el campo eléctrico que fue aplicado.

El suelo 1 es una tierra vegetal de uso comercial para el cultivo de plantas. Se caracteriza por un alto contenido en materia orgánica y nutriente, y una estructura muy esponjosa. El suelo 2 es un suelo tomado de una explotación agrícola que se caracteriza por un contenido significativamente alto de materia orgánica y nutriente. Su alto contenido en arcilla que hace que este suelo tienda a apelmazarse. Por último, el suelo 3 es un suelo básicamente arcilloso con una pequeña fracción de arena y sin materia orgánica. La ausencia de materia orgánica hace que también sea un suelo sin contenido significativo de nutrientes necesarios para el crecimiento de plantas.

Los resultados del estudio mostraron que el suelo 3 no sufría cambios significativos en cuanto a pH y conductividad después de cuatro días de tratamiento continuo con corriente eléctrica mientras que los otros dos suelos sufrían una acidificación clara en el ánodo y un ligero aumento del pH en el lado del cátodo. Estos cambios de pH pueden afectar seriamente al crecimiento de las plantas, por eso, estos dos suelos fueron descartados para el estudio.

El suelo 3 se sometió a una diferencia de potencial creciente entre 10: y 40 V durante cuatro días. El análisis del perfil de pH y conductividad eléctrica del suelo tras este tratamiento confirmó que una diferencia de potencial de 20 V no generaba un cambio significativo en las propiedades del suelo y por tanto las plantas seleccionadas para fitorremediación no se veían afectadas por la aplicación de la corriente eléctrica. Un valor de 40 V ya generaba cambios de pH y conductividad eléctrica significativos en el suelo, mientras que un valor tan bajo de 10 V no generaba ningún tipo de cambio y no se consideró adecuado para resaltar la actividad que realizaban las plantas en la fitorremediación.

Las tres especies de plantas seleccionadas (*P. canariensis*, *B. rapa* y *Z. mays*) se cultivaron en el suelo 3 bajo una diferencia de potencial de 20 V. La especie *B. rapa* creció de forma rápida y abundante, siendo por tanto un buen candidato para el ensayo de fitorremediación mejorada con

corriente eléctrica. Esta especie ha sido documentada en la bibliografía como una especie con capacidad para remediar suelos contaminados con metales pesados y contaminantes orgánicos.

La especie *P. canariensis* creció de forma menos abundante y podría ser considerada para estudios de remediación en un futuro. Por el contrario, la especie *Z. mays* presentó una germinación escasa y un crecimiento nulo, en las condiciones en las que se realizaron los experimentos, no siendo considerada adecuada para posteriores estudios.

En resumen:

- Se ha comprobado que con el cultivo de la especie *B.rapa* se desarrolla con éxito la técnica de la fitorremediación mediante una aplicación adicional de un campo eléctrico que se encarga de acelerar el proceso.
- Este trabajo es un primer paso para el estudio futuro en la aplicación de esta técnica sobre los campos de tiro.

5.2 Líneas futuras

Se parte de la necesidad de continuar en líneas futuras con el presente trabajo profundizando el análisis del cultivo de *B.rapa* puesto que es el que mejor ha respondido al proceso experimental a lo largo del proyecto.

Además, como estaba previsto en los objetivos iniciales del presente trabajo y dentro del ámbito militar, habría que aplicar diferentes tipos de potenciales sobre los suelos de los campos de tiro para determinar cuál es el que garantiza el mayor éxito en la efectividad de la fitorremediación. Debe tenerse en cuenta que el uso continuado de estos campos durante años trae consigo una contaminación de los suelos con metales pesados asociados a la metralla y sales inorgánicas y compuestos orgánicos asociados a la pólvora y explosivos.

Quizás el *B.rapa* apenas se desarrolla (como ha ocurrido con el *Z.mays* en el actual experimento) y sería necesario buscar por tanto otro tipo de cultivo más adecuado para este tipo de suelos.

Sería un avance sobre el presente trabajo llevar a cabo el mismo experimento que se ha realizado pero observando si con el cultivo del *B.rapa*, tras aplicarle una diferencia de potencial a éste tipo de suelos en los que abunda la pólvora, responde con eficiencia a la fitorremediación para garantizar su plantación en este tipo de lugares.

Asimismo en caso de que la técnica por electro-migración no funcionase, se podrían aplicar otras técnicas de transporte diferentes como la electroósmosis o la electroforesis.

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1] «www.vanesaloaiza.wordpress.com,» vanesa olaiza, 14 julio 2009. [En línea]. Available: <https://vanesaloaiza.wordpress.com/tipos-y-causas-de-la-contaminacion-ambiental/>. [Último acceso: 15 enero 2016].
- 2] C. Cameselle.-M. Vázquez, Acciones remediadoras del deterioro ambiental, Vigo y Antioquía, 2009.
- 3] E. Bell, «www.blogecologista.com,» 7 noviembre 2015. [En línea]. [Último acceso: 2016 enero 18].
- 4] «www.principalesagentesc.blogspot.com,» 2 junio 2011. [En línea]. Available: <http://principalesagentesc.blogspot.com.es/2011/06/principales-agentes-contaminantes-del.html>. [Último acceso: 17 enero 2016].
- 5] E. Bell, «www.blogecologista.com,» 5 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <http://blogecologista.com/causas-principales-de-la-contaminacion-del-suelo/>. [Último acceso: 24 enero 2016].
- 6] «www.infobae.com,» 30 abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.infobae.com/2015/04/30/1725764-alerta-roja-chile-tercera-erupcion-del-volcan-calbuco-y-nueva-evacuacion-la-zona>. [Último acceso: 28 enero 2016].
- 7] «www.elnuevodiario.com,» 22 diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.elnuevodiario.com.ni/opinion/64652-polvora-salud-medioambiente/>. [Último acceso: 21 febrero 2016].
- 8] R. L.-V. López, *Remediación electrocinética de suelos de baja permeabilidadsd contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos.*, Ciudad Real: Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias y tecnologías químicas de la universidad de Castilla La Mancha, 2013.
- 9] J. Franch, «www.estudiosgeotecnicos.info,» 3 abril 2013. [En línea]. Available: <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/permeabilidad-de-los-suelos/>. [Último acceso: 22 enero 2016].
- 10] L. Balan, «descontaminación de suelos,» 2014. [En línea]. Available:

<http://slideplayer.es/slide/89035/>. [Último acceso: 21 enero 2016].

- 11] C. Cameselle y. S. Gouveia, Métodos para el tratamiento de suelos contaminados, Vigo: Riartas, 2011.
- 12] D. A. de la rosa-Pérez, M. M. Teutli.-Leon y M. E.Ramírez-Isas «Electrorremediación de suelos contaminados,una revisión técnica para su aplicación en el campo.,» México, 2007.
- 13] T. Volke Sepúlveda, J. A. Velasco Trejo y. D.A. de la rosa-Pérez Suelos contaminados por metales y metaloides, México: Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales.Instituto Nacional de Ecología, 2005.
- 14] F. Bell, Engineering Properties of Soils and Rocks, Elsevier,2013 (3° ed.), 2000.
- 15] M. Ahmed, Biotechnology: A Text Book, India: ed.Global Media, 2009.
- 16] «www.lamamapachama.com,» Patricia de la Vega, Marta Vázquez y Nerea Rodríguez, 24 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://lamamapachama.com/2014/04/24/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/>. [Último acceso: 19 febrero 2016].
- 17] M. F. y. J. Fidalgo, «Química General,» León, ed.Everest, 1999, p. 1008.
- 18] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: <http://www.lamoncloa.gob.es>. [Último acceso: 13 enero 2015].
- 19] «www.contaminacionambiental.net,» 1 Julio 2014. [En línea]. Available: <http://contaminacionambiental.net/contaminacion-ambiental/>. [Último acceso: 20 Febrero 2016].