



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la aplicación del campo eléctrico para la mejora de
fitorremediación de suelos contaminados*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Enrique Navarro Otero

DIRECTORES: Santiago Urréjola Madriñán
Claudio Cameselle Fernández

CURSO ACADÉMICO: 2018-2019

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la aplicación del campo eléctrico para la mejora de
fitorremediación de suelos contaminados*

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

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En un planeta cada vez más contaminado y con mayores problemas ambientales, el suelo sufre las consecuencias de las actividades del ser humano. La existencia de una tierra fértil y sana es fundamental para el equilibrio del medio ambiente y de nuestra supervivencia. La concienciación de la sociedad respecto a este tema cada vez es mayor, y es por eso que son muchas las investigaciones que se están llevando a cabo con el fin de recuperar los suelos contaminados o intentar que esa contaminación no se extienda. Una de las técnicas más innovadoras es la fitorremediación, que es el empleo de plantas para absorber la contaminación de la tierra. Esta técnica es muchas veces usada junto con la electrorremediación, que es la aplicación de un campo eléctrico en el suelo a tratar. En este TFG se pretende determinar algunos de los parámetros de este campo eléctrico que influyen en la fitorremediación con la finalidad de mejorar el rendimiento de esta técnica.

PALABRAS CLAVE

Fitorremediación, electrorremediación, contaminación, suelo, campo eléctrico

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en estas líneas a los profesores D. Santiago Urrejola y D. Claudio Cameselle por haberme guiado a lo largo de este trabajo por su dedicación, paciencia y esfuerzo, sin los cuales este proyecto se hubiese tornado mucho más arduo.

También me gustaría agradecer a mis compañeros de laboratorio su compañía, que hizo mucho más amena la larga experimentación.

CONTENIDO

Contenido.....	5
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos.....	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 El suelo.....	11
1.2.1 Introducción.....	11
1.2.2 Propiedades físicas del suelo.....	11
1.2.3 Propiedades biológicas del suelo.....	12
1.2.4 Composición.....	13
1.2.5 Contaminación del suelo.....	14
1.2.6 Contaminantes principales del suelo.....	14
1.2.7 Importancia del suelo.....	15
1.3 Contexto normativo y legislación.....	15
1.4 Objetivos.....	16
2 Estado del arte.....	17
2.1 La recuperación de suelos.....	17
2.1.1 Introducción.....	17
2.1.2 Técnicas de contención.....	18
2.1.3 Técnicas de confinamiento.....	18
2.1.4 Técnicas de descontaminación.....	19
2.2 Electrorremediación y fitorremediación.....	20
2.2.1 Electrorremediación.....	20
2.2.2 La fitorremediación.....	22
2.2.3 Tecnologías combinadas.....	23
2.3 Proyectos y actuaciones nacionales e internacionales.....	24
2.3.1 Proyectos I+D nacionales.....	25
2.3.2 Proyectos I+D europeos.....	25
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Descripción del experimento.....	27
3.1.1 Material necesario.....	27
3.1.2 Diagrama de flujo de trabajo.....	27
3.1.3 Determinación de los parámetros a hallar.....	28
3.1.4 Diseño de la estación de trabajo.....	28

3.1.5 Pasos previos	28
3.1.6 Montaje de la estación de trabajo	29
3.1.7 Observación y medición de las celdas.....	30
3.1.8 Extracción de las muestras	30
3.1.9 Análisis en laboratorio de las muestras	32
4 Resultados	35
4.1 Introducción.....	35
4.2 Resultados.....	35
4.2.1 Variación del voltaje según distribución de los electrodos	35
4.2.2 Crecimiento de las plantas.....	36
4.2.3 Diferencia de potencial.....	37
4.2.4 Medición del pH.....	38
4.2.5 Mediciones de la conductividad.....	40
4.2.1 Contaminación excesiva de la tierra.....	41
5 Conclusiones y líneas futuras.....	43
5.1 Conclusiones.....	43
5.2 Líneas futuras	43
6 Bibliografía	45
Anexo I: Contenido del primer anexo.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ejemplo de una mala gestión de los residuos [4]	10
Figura 1-2 China, el país que más CO ₂ emite a la atmósfera, en su mayoría procedente del carbón [5]	10
Figura 1-3 Flujo del ciclo del nitrógeno [7]	12
Figura 1-4 Flujo del ciclo del carbono [7]	13
Figura 1-5 Composición promedio del suelo [9]	14
Figura 2-1 Esquema simplificado de las diferentes técnicas de descontaminación de suelos	18
Figura 2-2 Esquema simplificado del mecanismo de la electrorremediación	21
Figura 2-3 Mecanismos de transporte de la electrorremediación [13]	21
Figura 2-4 Simplificación del mecanismo de fitoextracción	23
Figura 3-1 Flujo de trabajo durante el desarrollo del TFG	28
Figura 3-2 Diferentes distribuciones de electrodos. Rojo es ánodo y negro es cátodo	29
Figura 3-3 Distribución de las muestras y configuración de cada una. El símbolo de la planta indica que se añadieron semillas y el símbolo de radiación indica que el suelo estaba contaminado	30
Figura 3-4 Distribución y numeración de las muestras extraídas	31
Figura 3-5 Extracción de las muestras sin corriente	31
Figura 3-6 Extracción de las muestras con corriente	32
Figura 3-7 Colocación de las muestras en bandejas	32
Figura 3-8 Caja con los electrodos en su configuración inicial. El origen para la medición de la distancia es el electrodo situado en la parte superior	33
Figura 4-1 Variaciones de voltaje según la distribución de electrodos indicada en la Figura 3-2 ..	36
Figura 4-2 Gráfico de crecimiento de las plantas (en cm)	37
Figura 4-3 Valores de voltaje obtenidos para ambas polaridades y a determinadas distancias del electrodo	38
Figura 4-4 Mediciones de pH	39
Figura 4-5 Mediciones de conductividad (mS/cm)	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Algunos proyectos de I+D a nivel nacional	25
Tabla 2-2 Ejemplos de proyectos financiados por la UE.....	25
Tabla 0-1 Listado de actividades declaradas contaminantes para el suelo	51

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Hoy en día, una de las mayores preocupaciones de la sociedad es la contaminación medioambiental [1]. Esto puede verse reflejado en los distintos acuerdos de carácter internacional firmados por las grandes potencias mundiales en los últimos años, como pueden ser:

- Convenio de Ginebra de 1979 sobre la contaminación atmosférica
- Convenio de Viena de 1985 para la Protección de la Capa de Ozono
- Convención de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992 (donde se firmó el famoso Protocolo de Kioto)

Existen muchos más ejemplos, lo que es un claro signo de que las políticas de los estados van encaminadas a tratar de paliar el problema de la contaminación, dando voz a un número creciente de personas que es consciente de que hay que tomar medidas.

Esta situación podría parecer, a priori, que se da con mayor frecuencia en los países desarrollados por generar más residuos (ya sean humanos, de procesos industriales, etc.). Esto no es del todo cierto, ya que los países en vías de desarrollo contaminan proporcionalmente más, debido a que no tienen la tecnología ni las políticas para gestionar correctamente los residuos (uso de energías “limpias”, reciclaje, etc.) [2].

En las siguientes dos imágenes, Figura 1-1 y Figura 1-2, puede apreciarse lo dicho anteriormente respecto de los países en vías de desarrollo. En la Figura 1-1, que trata sobre la cantidad de residuos que son vertidos a los océanos, se observa como China ocupa el primer puesto con clara ventaja sobre el resto de países, los cuales tienen en común con China el ser potencias en desarrollo o con una industria incapaz de gestionar sus residuos. Parte de los residuos de esta lista no provienen de la actividad industrial, ya que muchos de ellos son residuos domésticos que la gente no gestiona de la manera correcta y la desecha al mar (plásticos, textiles, etc.) [3].

Por otra parte, en la Figura 1-2, se muestra como China es el país que mayor cantidad de CO₂ emite a la atmósfera, lo que pone en evidencia de nuevo su falta de medios a la hora de gestionar los residuos que generan sus empresas. En este último caso, cabe destacar que son menos los países en vías de desarrollo que encabezan la lista porque es necesaria una industria potente (y contaminante) para producir niveles de residuos equivalentes a los de las grandes potencias (con industrias mucho menos contaminantes).



Figura 1-1 Ejemplo de una mala gestión de los residuos [4]

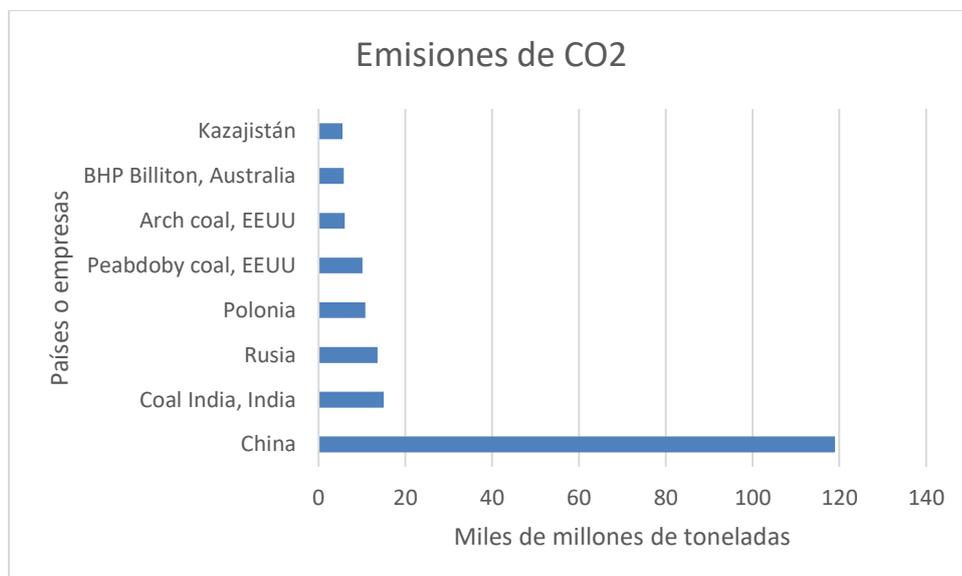


Figura 1-2 China, el país que más CO₂ emite a la atmósfera, en su mayoría procedente del carbón [5]

La contaminación puede afectar tanto al agua, al aire o al suelo. Puede darse de forma exclusiva o en los tres ámbitos de forma simultánea.

La contaminación del agua puede darse por la incorporación de productos químicos en ella, que se disuelven y resultan tóxicos para los seres vivos. También por la alteración de sus propiedades físicas, como puede ser la temperatura, salinidad o pH.

La contaminación del aire se da principalmente por la liberación de gases dañinos para la atmósfera (como pueden ser los CFC que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono), que alteran la vida en la Tierra (exceso de CO₂) o que resultan por sí mismos tóxicos para los seres vivos (NO_x).

Por último, la contaminación del suelo se produce por vertidos de productos tóxicos en él de cualquier forma. Esto impide un correcto aprovechamiento de la tierra para labores primarias, como puede ser la ganadería o la agricultura, lo que repercute en el ser humano de forma directa. También está contaminación puede impedir el correcto crecimiento de las plantas, tan importantes en el ciclo CO₂-O₂.

Pero ¿qué es la contaminación? La contaminación se define como la introducción de sustancias o energías en el medio que pueden provocar cambios irreversibles en él, llegando a afectar a los seres vivos que puedan habitar en el medio en cuestión. Mas adelante se volverá sobre esta cuestión en el apartado 1.2.5.

A la hora de clasificar la contaminación por su origen, se dice que puede tener origen natural o humano. La de origen natural es aquella que se produce como consecuencia de los procesos naturales de la Tierra. Los más destacados serían las erupciones volcánicas, el material arrastrado por un tsunami o incluso especies invasoras que se hacen con el control de un ecosistema y explotan sus recursos de forma descontrolada.

La que tiene su origen en la mano del hombre es la que está provocando los cambios más significativos (plásticos en el océano, polución de las ciudades, residuos industriales arrojados al mar, extracción de minerales, etc.) [6].

1.2 El suelo

1.2.1 Introducción

Antes de empezar, necesario establecer y definir ciertas propiedades y variables del suelo. Esto es necesario para entender que la alteración de ciertas propiedades modifica las características de la tierra. A continuación, se desarrollan algunas de las propiedades físicas y biológicas de éstos [7]. Posteriormente se hablará de los componentes del suelo y de los contaminantes que pueden afectarle. Por último, es conveniente destacar la importancia que tiene el suelo en nuestra sociedad.

1.2.2 Propiedades físicas del suelo

- **Estructura del suelo:** formado por partículas de distintos tamaños y propiedades que se asocian para formar otros agregados (arena, limo, arcilla, etc.). Influye en la aireación, movimiento del agua y conductividad térmica.
- **Profundidad del suelo:** las diferentes capas definidas del suelo (superficiales y profundas) tienen diferentes características, ya no solo en composición si no que varía su actividad biológica.
- **Características del agua en el suelo:** es uno de los factores más importantes para la actividad biológica del suelo. Afecta directamente a la estructura y estabilidad del mismo.
- **La disponibilidad de agua en el suelo:** muy importante es la capacidad de un suelo para retener agua. Es importante que puedan almacenarla pero no en exceso, ya que los plantas no podrían acceder al agua en este último supuesto.
- **La textura del suelo:** se refiere a la proporción de componentes inorgánicos que forman el suelo. El porcentaje del tipo de partículas que forman el suelo determinan de qué tipo será.
- **Consistencia del suelo:** es la propiedad que determina la capacidad del suelo de soportar una deformación o rotura. Se relaciona con la cantidad de humedad que tiene.

- **Porosidad del suelo:** se refiere a la cantidad de espacio no ocupado por sólidos. Normalmente es un 50% ocupado por sólidos y un 50% de espacio libre. El tamaño de los poros determina algunas características del suelo (capacidad de absorción, aireación, etc.).
- **Densidad del suelo:** es la masa de suelo por unidad volumen. Da una idea de si un suelo es compacto o no y de su porosidad.
- **Movimiento del agua en el suelo:** el agua puede fluir por gravedad, ascenso capilar u ósmosis.

1.2.3 Propiedades biológicas del suelo

- **El ciclo del nitrógeno:** se relaciona con la actividad biológica del suelo. Los procesos de descomposición liberan nutrientes aprovechables por otros seres vivos.

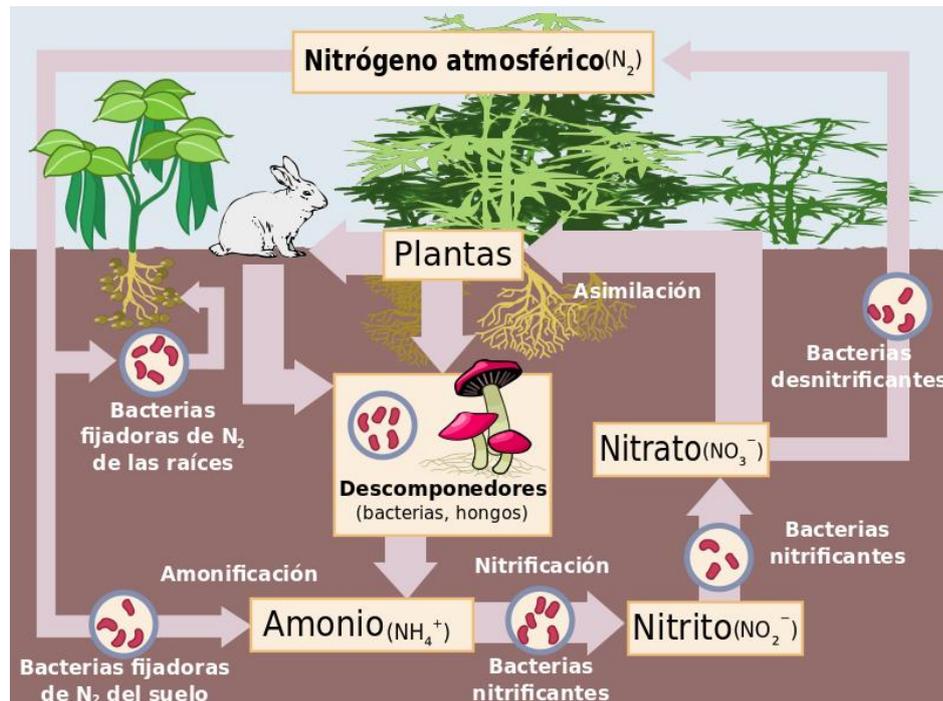


Figura 1-3 Flujo del ciclo del nitrógeno [7]

- **El ciclo del carbono:** es un proceso en el que el carbono es intercambiado entre la atmósfera, biosfera e hidrosfera. Es el proceso más importante de la Tierra en cuanto a que se reutiliza el elemento más abundante del planeta.

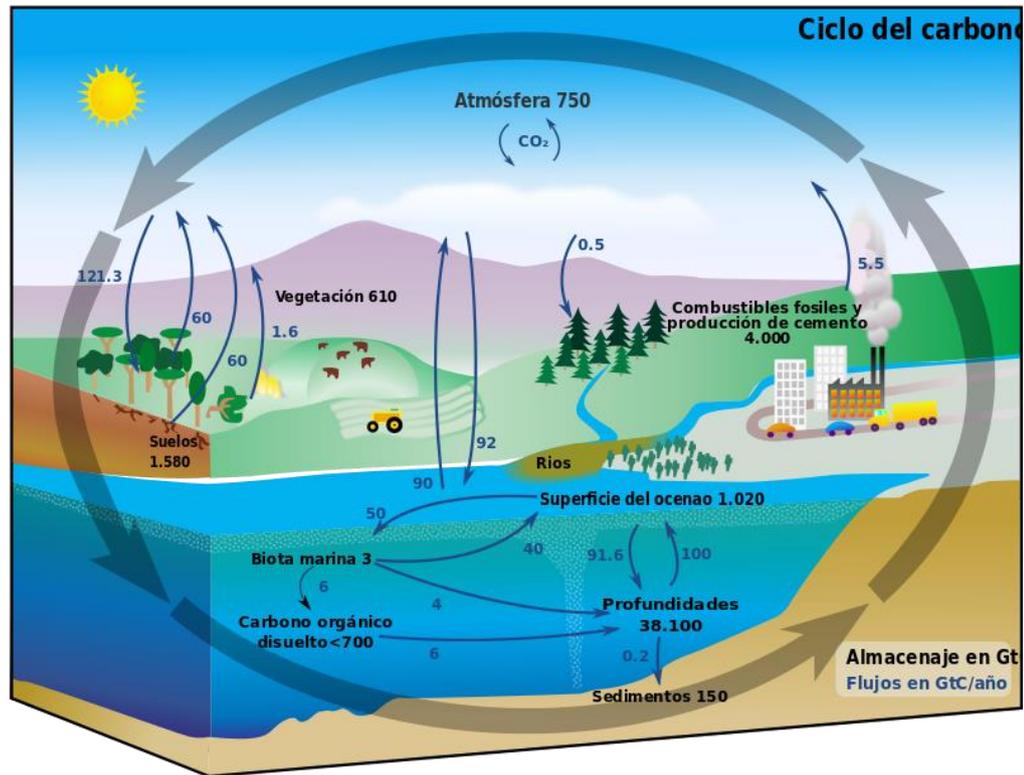


Figura 1-4 Flujo del ciclo del carbono [7]

1.2.4 Composición

El suelo se identifica con la parte de la tierra que no está cubierta por el agua. Es obvio que debajo de los mares y océanos hay suelo, pero para este TFG, la palabra suelo hace referencia a lo indicado anteriormente.

Está compuesto por minerales, materia orgánica, microorganismos, aire y agua. Su proceso de formación lleva millones de años, ya que los procesos geológicos y biológicos que han dado forma a lo que conocemos como suelo hoy en día son muy lentos [8].

El mineral proviene de la roca primitiva que se encontraba en ese lugar, que se ha ido erosionando por diversos mecanismos a lo largo de los siglos. Este proceso tan lento muestra la importancia de mantener la naturaleza de los suelos, ya que son un bien muchas veces no renovable.

La materia orgánica procede de la descomposición de los seres vivos o de partes de ellos. La materia de carácter orgánico queda almacenada en la tierra, sirviendo posteriormente como alimento para microorganismos u otras especies vegetales.

También viven en la superficie o en capas más profundas microorganismos que intervienen en el proceso de descomposición de la materia orgánica. Su importancia es tal que permite el transformar materia “no útil” (cadáveres, hojas de árboles, plantas, restos de animales, etc.) en nutrientes beneficiosos para el suelo, ya que lo mantienen sano y es bueno tanto para el medio ambiente como para las actividades del ser humano.

Por último, el agua y el aire son esencial para el crecimiento de vegetales. Además, la descomposición es necesaria para el buen funcionamiento de la cadena trófica.



Figura 1-5 Composición promedio del suelo [9]

1.2.5 Contaminación del suelo

Una definición de la contaminación del suelo más orientada al estudio que se ha realizado en este TFG sería la siguiente:

La contaminación del suelo puede definirse como la degradación de la calidad del suelo debida a la presencia de sustancias químicas. Esto provoca cambios perjudiciales en el mismo que afectan de manera negativa al ser humano, a sus actividades y a la naturaleza misma [10].

El suelo puede sufrir la contaminación por diferentes métodos: contaminación directa con químicos, por la presencia de una atmósfera contaminada, por la absorción de aguas con contaminantes, etc. Aunque la contaminación con productos químicos (normalmente procedentes de la actividad agraria o de procesos industriales) es la más frecuente, la que se produce por productos radiológicos también existe.

El uso de pesticidas o herbicidas para prevenir plagas puede acabar provocando que el suelo absorba esos productos químicos, alterando las propiedades de la tierra e impidiendo el desarrollo de las plantas.

1.2.6 Contaminantes principales del suelo

Desarrollando lo mencionado anteriormente, una de las principales maneras de contaminar el suelo es mediante productos químicos. Éstos pueden tener orígenes variados. A continuación, se van a enumerar y desarrollar algunos de los más importantes [11]:

- **Metales pesados:** son elementos metálicos con una densidad superior a 5 g/cm^3 , aunque para el estudio medioambiental se amplía esta definición a todos aquellos elementos metálicos asociados a problemas de contaminación. Son principalmente el Fe, Mn, Zn, B, Co, As, V, Cu, Ni o Mo. Algunos son tóxicos por encontrarse en concentraciones elevadas, mientras que otros son altamente tóxicos y no deberían encontrarse en ninguna concentración en el suelo (como el Cd, Hg o el Pb). Pueden llegar al suelo debido a la combustión del carbón, por uso de productos agrícolas, por la acumulación de residuos industriales, etc.
- **Lluvia ácida:** ocurre cuando a la atmósfera llegan gases, principalmente SO_2 y NO_x , producto de la actividad industrial que se mezclan con el agua de lluvia, acidificándola y alterando sus propiedades.

- **Salinización:** se produce un incremento de la conductividad eléctrica, que cambia sus propiedades físicas y químicas. Dificulta el crecimiento vegetal. Para que se produzca este fenómeno es necesario que existan malas condiciones de drenaje. Por ejemplo, en regiones áridas es más común que se produzca este fenómeno por las aguas de escorrentía que van cargadas de sales y que posteriormente se evaporan. El hombre, a través de su actividad, favorece la salinización del suelo empleando técnicas agrícolas inadecuadas, por la sobreexplotación de los acuíferos, por la actividad minera, etc.
- **Fitosanitarios:** con el objetivo de proteger los cultivos, el hombre usa herbicidas, pesticidas y productos similares. Los fertilizantes aplicados de forma controlada favorecen a los vegetales, pero cuando se abusa de ellos el efecto que se logra es una saturación del suelo. Esta gran cantidad de nutrientes puede dar lugar al crecimiento desmesurado de biomasa y el consiguiente aumento de la demanda de oxígeno para descomponer la materia orgánica que puede desembocar en una situación de anaerobiosis que destruya el ecosistema.
- **Explotaciones mineras:** debido a los movimientos de tierra que se producen y a las sustancias que se obtiene de la extracción, las propiedades del suelo varían considerablemente.
- **Componentes orgánicos:** el derrame en el suelo de hidrocarburos y alcoholes, principalmente, alteran el pH, la cantidad de nutrientes, potencial redox, etc.

1.2.7 Importancia del suelo

Para el ser humano, que el suelo tenga una buena salud es crucial para su existencia. De él obtenemos los alimentos que necesitamos, ya sea para consumir nosotros o para la industria ganadera.

Por otra parte, la mayor parte de las reservas de agua dulce en estado líquido (y por lo tanto accesible) del planeta provienen de depósitos subterráneos [12]. Éstos suelen contener agua muy filtrada y pura, ya que atraviesa numerosas capas de tierra que actúan como filtro. El problema surge cuando el mismo suelo contiene sustancias tóxicas y el agua las arrastra consigo hacia los depósitos subterráneos. Esto es muy grave porque no tendríamos confianza para poder beber agua de aquellos depósitos que considerábamos sanos.

Debido a lo dicho anteriormente, el suelo se convierte en una pieza esencial de los sistemas biológicos, en los que se desarrolla la vida salvaje [7]. El correcto funcionamiento de estos sistemas es fundamental para mantener el equilibrio biológico, y por consiguiente el buen devenir del planeta.

Algunas de las funciones más importantes del suelo son:

- Suministrar alimento a las especies vegetales
- Intervenir en el proceso de descomposición de la materia orgánica
- Proporcionar una plataforma estable en la que se desarrolla la vida

1.3 Contexto normativo y legislación

La motivación por la que los suelos deben ser cuidados no es solo por su importancia a la hora de mantener el equilibrio del planeta, también es necesario porque numerosas normas han sido promulgadas y son de obligatorio cumplimiento. A continuación, se desarrollan de forma cronológica algunas de las normativas que ha dado lugar a la vigente.

En la Cumbre de Río de 1992 se reconoció la importancia de proteger los suelos y sus usos, teniendo en cuenta las nuevas políticas de desarrollo sostenible que se iban implantando en los países. Esta cumbre estuvo centrada sobre todo en los daños que podían tener origen humano.

Más tarde, la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) hizo una estimación sobre el número de zonas contaminadas en Europa. Los resultados mostraron la gravedad de la situación, y también evidenciaron la falta de normativa que regulase los suelos contaminados.

En España no existía ninguna herramienta legislativa que protegiera los suelos hasta la promulgación de la Ley 10/1998 de 21 de abril. Además, durante los años 1995 y 2005 se desarrolló un Plan nacional de recuperación de suelos contaminados, pero debido a la falta de normativa, este plan estuvo muy limitado.

El Real Decreto 9/2005 de 14 de enero dio cumplimiento a la Ley 10/1998, estableciendo una serie de actividades que son potencialmente contaminantes y las obligaciones de los propietarios de áreas contaminadas con la Administración. La Tabla 0-1 incluida en el Anexo I de este TFG incluye el Anexo I del Real Decreto en el que se enumeran las actividades contaminantes del suelo. Como puede verse, muchas de ellas son de origen industrial.

Además, se determinan los criterios para declarar un suelo como contaminado. Los Anexos V y IV del Real Decreto establecen las sustancias y en qué concentraciones deben encontrarse en un suelo para darle la calificación de contaminado. Hace una distinción entre los casos en los que se considera como prioridad la protección de la vida humana y aquellos en los que se considera prioritario la protección de los ecosistemas.

1.4 Objetivos

El objetivo principal de este TFG es el determinar los efectos de un campo eléctrico, el cual va a ser empleado para mejorar el rendimiento de la descontaminación de suelos contaminados con la técnica de la fitorremediación, determinando cuál es la mejor distribución y emplazamiento de los electrodos que participarán en la descontaminación del suelo.

Son objetivos particulares los siguientes:

- Establecer el efecto del campo eléctrico en el pH, conductividad eléctrica y distribución del campo eléctrico (diferencia de potencial) en una muestra de suelo sometida al efecto de un campo eléctrico de corriente continua, con o sin plantas en crecimiento.
- Establecer los beneficios del campo eléctrico en el crecimiento de plantas en suelo contaminado o sin contaminar. Ello lleva implícito el realizar un seguimiento del crecimiento de las plantas.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 La recuperación de suelos

2.1.1 Introducción

A día de hoy, las investigaciones se han centrado en la recuperación de suelos contaminados en vez de destruirlos. La destrucción se lleva a cabo trasladando el suelo contaminado a un vertedero, generalmente.

En la actualidad, se dispone de muchos medios para recuperar el suelo. La aplicación de una tecnología u otra dependerá de las características del suelo y del contaminante que contenga. Hay dos métodos para realizar una recuperación del suelo [6]:

- **In situ:** se actúa sobre los contaminantes en el lugar donde se localiza el suelo. Suelen ser tratamientos más baratos pero su dificultad radica en extender todos los agentes descontaminantes en la masa de tierra.
- **Ex situ:** se excava el suelo para llevarlo a otro lugar donde hacer el tratamiento. Aquí se distingue el tratamiento en el mismo sitio (*on-site*) o el realizado en instalaciones alejadas y por lo tanto hay que transportarlo (*off-site*). Son tratamientos costosos, pero mucho más rápidos y efectivos que los *on-site*.

A continuación, se van a desarrollar las diferentes técnicas de descontaminación de suelos que se aplican en función de los objetivos que se quieren conseguir. El siguiente esquema sirve como idea general antes de entrar en detalle:



Figura 2-1 Esquema simplificado de las diferentes técnicas de descontaminación de suelos

2.1.2 Técnicas de contención

Este método se basa en el uso de barreras físicas que impiden la propagación de los contaminantes. Existen varios tipos de barreras [11]:

- **Barreras verticales:** son empleadas *in situ*. Se colocan como si fueran muros que impiden que los contaminantes se muevan en el plano horizontal. Normalmente se excavan zanjas muy profundas que se rellenan con materiales aislantes.
- **Barreras horizontales:** realizadas también *in situ*. Pensados para impedir el movimiento en el plano vertical, siguen en desarrollo.
- **Barreras de suelo seco:** se basa en secar zonas determinadas del suelo, de manera que tiene un mayor poder absorbente de líquidos. Sirve para retener líquidos contaminados en las zonas que se deseen en vez de que se propaguen libremente.
- **Sellado superficial:** la superficie del suelo se impermeabiliza ante contaminantes mediante el uso de materiales diversos (bentonita o materiales geotextiles). Puede asemejarse a colocar una lona sobre el suelo.
- **Sellado profundo:** muy parecido al anterior, pero con la diferencia de que el material impermeable se introduce dentro de la estructura del suelo y no solo en la superficie.
- **Barreras hidráulicas:** basadas en la extracción del agua subterránea que ha quedado contaminada para tratarla y luego volver a llevarla al suelo del que se extrajo.

2.1.3 Técnicas de confinamiento

Su finalidad es la de reducir el movimiento de los contaminantes a través de procesos físicos y químicos. Las principales técnicas son [12]:

- **Estabilización fisicoquímica:** reducen la movilidad de los agentes contaminantes a partir de reacciones químicas que reducen la solubilidad. Puede ser *in situ* o *ex situ*.
- **Inyección de solidificantes:** muy similar al anterior, pero aplicada *in situ*. Se usan pozos para su administración (similar al sellado profundo).
- **Vitrificación:** se transforma el material contaminante a estado vítreo. Para lo cual se aplican corrientes eléctricas en el suelo que incrementan la temperatura. Puede ser *in situ* o *ex situ*. Tiene un elevado coste y cambia las propiedades del sedimento.

2.1.4 Técnicas de descontaminación

Estas técnicas, como su nombre indica, buscan la eliminación parcial o completa de los contaminantes que se encuentran en el suelo. A continuación, se enumeran algunos de los más importantes [11].

- Tratamientos fisicoquímicos
 - **Extracción:** pretende separar los contaminantes del suelo para tratarlos posteriormente. Según los elementos empleados para la extracción se habla de extracción de aire, extracción de agua, extracción de fase libre, extracción de fases densas y extracción con disolventes y ácidos.
 - **Lavado:** normalmente *ex situ*. Se añaden unos disolventes al suelo para facilitar el lavado. Tras esto, se lava la tierra con agua y los contaminantes son eliminados.
 - **Flushing:** *in situ*. Se arrastran los contaminantes a una zona deseada con el fin de tenerlos agrupados y facilitar su eliminación. Tras realizar esto, se puede aplicar una técnica de lavado o similar para retirar los contaminantes.
 - **Electrorremediación:** está técnica, junto con la fitorremediación, es la técnica empleada en la experimentación de este TFG. La electroremediación consiste en aplicar una corriente eléctrica que moviliza los elementos del suelo. Esto permite agrupar los contaminantes alrededor del cátodo o ánodo (según sea la polaridad del contaminante), dejando el resto del suelo descontaminado.
 - **Barreras permeables activas:** consiste en la instalación de una barrera física que permite el paso del agua, pero atrapa a los contaminantes. Puede simplemente absorberlos o incluso degradarlos.
 - **Oxidación ultravioleta:** es una técnica novedosa. La luz destruye los contaminantes rompiendo sus enlaces químicos. Si se produce completamente esta destrucción, los compuestos finales deberían ser agua, dióxido de carbono y sales.

- Tratamientos biológicos: son aquellos que reducen la concentración de contaminantes o su peligrosidad mediante la actividad natural de microorganismos u otros seres vivos. Son más respetuosos con el medio ambiente. Destacan los siguientes.
 - **Biodegradación asistida:** se introducen microorganismos que metabolizan los contaminantes orgánicos, convirtiéndolos en inocuos. Este proceso se acelera estimulando a los microorganismos (condiciones de humedad, concentración de oxígeno, etc.)
 - **Biotransformación de metales:** los microorganismos pueden transformar los metales a sustancias menos tóxicas mediante mecanismos de oxidación o reducción, por ejemplo. No los degradan ni destruyen.
 - **Fitorremediación:** en este método se usa la capacidad de ciertos vegetales para sobrevivir en zonas contaminadas. Éstas inmovilizan o incluso absorben las sustancias contaminantes. Es un proceso muy poco invasivo. Este TFG usa este método en combinación con la electroremediación.
 - **Bioventing:** se inyecta aire a través de unos pozos e incluso nutrientes para estimular el crecimiento bacteriano. Posteriormente las bacterias pueden ayudar en la degradación de los componentes orgánicos.
 - **Landfarming:** se realiza *ex situ*. Consiste en practicar una excavación y extender esa tierra extraída en una delgada capa. En ella, se estimula el crecimiento microbiano mediante la adición de aire y nutrientes. Se ha mostrado efectivo con la eliminación del TNT.

- **Biopilas:** *ex situ*. Útil para degradar los compuestos del petróleo. Similar al landfarming pero con la diferencia de que se fuerza la entrada de aire y nutrientes a través de agujeros realizados sobre el terreno extraído.
- **Compostaje:** pretende estimular el crecimiento microbiano creando unas condiciones idóneas para ello. Se mantienen unas condiciones de humedad y de temperatura óptimas. Además, se añaden compuestos orgánicos que favorecen este proceso.
- **Lodos biológicos:** se excava el suelo y se mezcla con otros aditivos en un biorreactor. En este espacio controlado pueden medirse y determinarse las condiciones que los microorganismos necesitan, por lo que el proceso se acelera bastante.

- Tratamientos térmicos
 - **Incineración:** *ex situ*. Los contaminantes se destruyen sometiendo al suelo a elevadas temperaturas. Este proceso, al generar residuos de la combustión, requiere procesos adicionales para eliminarlos.
 - **Desorción térmica:** también *ex situ*. Se somete al suelo a temperaturas más bajas que en la incineración. A diferencia con el anterior, en este caso no se oxidan los contaminantes, sino que se volatilizan. Esto hace que sea menos invasivo al no alterar las propiedades del suelo.

- Tratamientos mixtos
 - **Extracción multifase:** *in situ*. Se excavan zanjas para extraer contaminantes en fase vapor o líquida. Las bombas empleadas para su extracción dependerán de la fase del contaminante.
 - **Atenuación natural:** consiste en utilizar procesos naturales para contener la contaminación de origen químico. Es lento, pero de bajo coste.

2.2 Electrorremediación y fitorremediación

2.2.1 Electrorremediación

La electrorremediación es un método de descontaminación de suelos que usa la corriente eléctrica para mover a los contaminantes. Esta energía se aplica mediante una fuente eléctrica DC (corriente continua). Normalmente, se coloca uno de los polos (positivo o negativo) en uno de los extremos del campo a tratar, y el otro en el opuesto, de manera que la corriente eléctrica fluya a lo largo de todo el suelo.

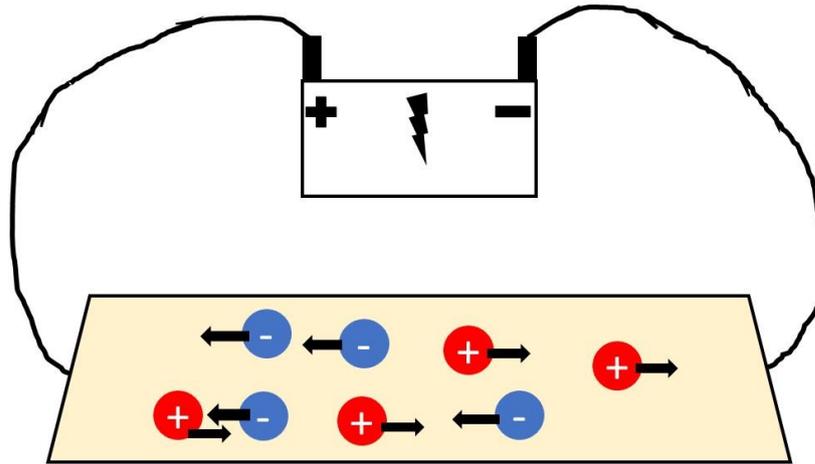


Figura 2-2 Esquema simplificado del mecanismo de la electrorremediación

Dentro de la electrorremediación existen varios métodos que se suelen dar a la vez [13]:

- **Electromigración:** en este método se aprovecha la carga iónica de los contaminantes para que sean atraídos por el electrodo de carga opuesta. Esta técnica es principalmente usada para eliminar contaminantes de origen metálico. La velocidad de los iones dependerá de la fuerza del campo eléctrico y de la movilidad de la partícula.
- **Electroósmosis:** en este, el contaminante se encuentra en un líquido. Éste fluye hacia uno de los electrodos, donde queda retenido. Por lo tanto, las partículas con carga positiva fluyen hacia el electrodo negativo y viceversa.
- **Electroforesis:** es el producido por el movimiento de las partículas con carga. Los contaminantes ligados a estas cargas son transportados.
- **Difusión:** normalmente el transporte de difusión es despreciado debido a la mayor importancia de los nombrados anteriormente [14].

En resumen:

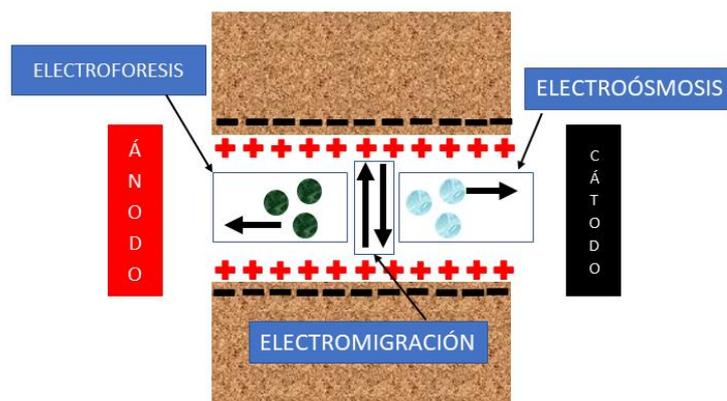
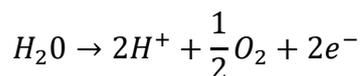


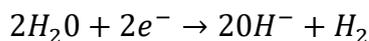
Figura 2-3 Mecanismos de transporte de la electrorremediación [13]

A la hora de aplicar esta técnica hay que tener en cuenta varios factores que afectan a la efectividad de la electrorremediación. Estos son:

- **pH:** se producen cambios de pH que favorecen las reacciones de los metales con otras sustancias. La electrólisis del agua genera una disociación que tiene como resultado la aparición de iones H^+ en el ánodo (polo positivo) e iones OH^- cerca del cátodo, como se puede ver en las ecuaciones Ecuación 2-1 y Ecuación 2-2. Esto tiene como consecuencia la aparición de una zona ácida cerca del ánodo y una alcalina cerca del cátodo.



Ecuación 2-1 Reacción de oxidación en el ánodo



Ecuación 2-2 Reacción de reducción en el cátodo

- **Contenido de agua:** el movimiento producido por electroósmosis es función del contenido de agua, por lo tanto el grado de saturación de agua en la tierra es un factor fundamental a la hora de mover los contaminantes. Es necesario mantener un contenido en agua distribuido de forma regular y controlar la sequedad del suelo para ir supliendo la falta de éste.
- **Conductividad eléctrica:** es la capacidad de un suelo para permitir el paso de la corriente eléctrica. A medida que tiene lugar la electrorremediación, la conductividad varía, ya que afectan a esta los frentes ácidos y alcalinos que se crean. También puede variar por la solubilización de algunas especies iónicas [6].
- **Potencial zeta (ζ):** medida de la carga de un coloide (cuerpo que por su extrema pequeñez parece disuelto en un líquido). La mayoría de los suelos tienen ζ negativa (los suelos normalmente tienen carga negativa), pero con la acidificación de éste pueden darse valores positivos. Estas variaciones afectan al flujo, ya que a medida que el pH se acerca a neutro, el flujo electroosmótico disminuye.
- **Naturaleza y química del suelo:** factores como la capacidad de adsorción, el intercambio iónico o el amortiguamiento del pH influyen en la efectividad de la electrorremediación. Los suelos de granulometría fina (limos y arcillas) han mostrado un buen comportamiento con esta técnica. En suelos arenosos puede ser bastante efectiva siempre que el contaminante no drene a estratos muy profundos.
- **Naturaleza del contaminante:** tiene gran influencia sobre la técnica. Pueden presentarse en multitud de formas (sólidos precipitados, disueltos, adsorbidos a partículas del suelo, etc.).

Con el paso del tiempo, la experimentación y la experiencia ha permitido mejorar la técnica de la **electrorremediación**. A pesar de que en un entorno controlado, como el de un laboratorio, el uso de esta técnica alcanza rendimientos cercanos al 100%, en el campo no es así (llegando apenas al 30%) [6]. Por ello, el empleo de modificaciones a la técnica original ayuda a elevar esos porcentajes. Algunas de las mejoras implantadas son las siguientes:

- **Inversión periódica de la polaridad de los electrodos:** ayuda a obtener una mejor distribución en términos de uniformidad en factores como el pH o la conductividad. También evita la acumulación de los contaminantes en las cercanías de los electrodos.
- **Extracción mejorada:** consiste en mantener soluble al contaminante mediante la adición de aditivos. Por ejemplo, para disolver metales pueden emplearse ácidos.

Con todo lo dicho anteriormente, la electrorremediación no se suele usar por sí sola. Se combinan distintas tecnologías que entre otras cosas reducen los costes y los tiempos empleados en la descontaminación como se explica en el apartado 2.2.3. Como se ha dicho anteriormente, la fitorremediación ha sido usada durante la experimentación de este TFG.

2.2.2 Fitorremediación

La fitorremediación consiste en el uso de plantas vivas para eliminar, degradar o secuestrar contaminantes inorgánicos y orgánicos del suelo, sedimentos y aguas subterráneas [14].

El proceso es sencillo: la planta que se encuentra en el suelo contaminado, debido a sus procesos biológicos, comenzará a alimentarse de los nutrientes de la tierra, llevándose consigo también a los contaminantes. Por lo tanto, en el cuerpo de la planta quedarán retenidas las sustancias contaminantes y solo haría falta desechar la planta para eliminar por completo la contaminación.

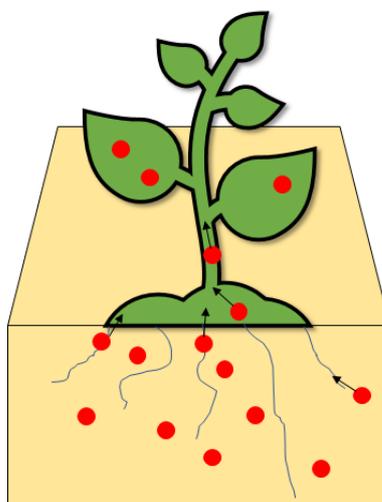


Figura 2-4 Simplificación del mecanismo de fitoextracción

Dentro de la fitorremediación, los mecanismos por los que se descontamina el suelo son varios. A continuación se enumeran:

- **Fitoextracción:** las plantas absorben los contaminantes y los extraen del suelo (sobre todo metales). Éstos se acumulan en sus tallos y hojas (ver Figura 2-4 más arriba). Las plantas deberían tener algunas de las siguientes características:
 - Alto índice de crecimiento
 - Fácil cultivo y cosecha
 - Buena adaptación a las condiciones ambientales
 - Elevada producción de biomasa
- **Fitoestabilización:** mecanismo por el que los contaminantes quedan estabilizados. Los metales no son eliminados del suelo, sino que simplemente se impide su propagación inmovilizándolos.
- **Fitodegradación:** es la degradación de contaminantes orgánicos. Las plantas pueden detoxificar contaminantes mediante sus actividades metabólicas. Esta limitado a contaminantes orgánicos.
- **Rizodegradación:** en la rizosfera se encuentran gran cantidad de carbohidratos, aminoácidos y flavonoides que estimulan la actividad microbiológica y provoca la descomposición de contaminantes orgánicos [15].
- **Rizofiltración:** se basa en que algunas plantas acuáticas son buenos absorbentes de metales que se encuentran en el agua.
- **Fitovolatilización:** en este mecanismo, las plantas absorben los contaminantes y los convierten en formas volátiles que son eliminados hacia la atmósfera.
- **Fitodesalinación:** se basa en el uso de plantas halófitas para eliminar el cloruro sódico que impide el desarrollo de otro tipo de plantas.

2.2.3 Tecnologías combinadas

Como se ha mencionado anteriormente, la electrorremediación por si sola tiene rendimientos cercanos al 100% en el laboratorio, pero bastantes más bajos en el campo. Por ello se realizan modificaciones en la técnica, para mejorar los rendimientos en campo abierto.

Aún con todo esto, es muy común el emplear esta técnica junto con otras. Esto permite solucionar una serie de problemas relacionados con la electrorremediación [14]:

- Restricciones reglamentarias sobre el uso de agentes químicos en el suelo y aguas subterráneas (para mejorar la solubilidad de los contaminantes)
- Elevados costes del proceso
- Tiempos de tratamiento muy prolongados

Algunas de las combinaciones de tecnologías remediadoras son [14]:

- Bio-barreras electrocinéticas
- Barreras reactivas electrolíticas
- Combinación de barreras permeables reactivas con remediación electrocinética
- Combinación de oxidación/reducción química y remediación electrocinética
- Combinación de biorremediación con remediación electrocinética
- **Combinación de fitorremediación y remediación electrocinética**
- Combinación de estabilización química y remediación electrocinética
- Combinación de tratamiento térmico y remediación electrocinética

De entre todas ellas, se profundizará en la que combina la fitorremediación y la remediación electrocinética o electrorremediación (en negrita).

Como ya se mencionó anteriormente al principio del apartado 2.2.2, la fitorremediación consiste en el uso de plantas vivas para eliminar, degradar o secuestrar contaminantes inorgánicos y orgánicos del suelo, sedimentos y aguas subterráneas.

Este método tiene una serie de ventajas, entre las que destacan su bajo costo y la seguridad para el medio ambiente. Aunque, por otra parte, presenta una serie de desventajas tales como su limitado alcance a la capa superficial (hasta donde lleguen las raíces en profundidad), el lento crecimiento de las plantas, la solubilidad de los contaminantes y su disponibilidad (el que puedan acceder las plantas a ellos).

La combinación del tratamiento electrorremediador junto con la fitorremediación tiene como uno de sus fines el mejorar la disponibilidad de los contaminantes, transportándolos hacia la zona donde se encuentran las plantas. También, como consecuencia de la aplicación del campo eléctrico, se produce una variación tanto del pH como de la distribución de los nutrientes del suelo, lo que puede ayudar al crecimiento de las plantas. Los electrodos aplican sobre la tierra un voltaje pequeño, suficiente para mover los contaminantes tanto por electromigración como por electroósmosis hacia donde se encuentran las raíces. Los experimentos en laboratorio han determinado que la exposición de las plantas a un campo eléctrico no es contraproducente para su crecimiento, pero es necesario seguir investigando para ver hasta dónde puede llegar esta técnica sin perjudicar a las plantas [14].

En este TFG se pretende ahondar un poco más en lo dicho en la última frase, es decir, determinar algunos de los parámetros (distribución de electrodos, diferencia de potencial, etc.) que permiten el correcto aprovechamiento de la electrorremediación sin que suponga un problema para el crecimiento de las plantas que intervendrán en el mecanismo de fitorremediación, sino todo lo contrario, que la corriente sea beneficiosa para ellas.

2.3 Proyectos y actuaciones nacionales e internacionales

En la mayoría de los países industrializados se han impulsado investigaciones con la finalidad de desarrollar tecnología aplicable a la restauración de zonas contaminadas. Esto vuelve a mostrar la

importancia que se le está dando al cuidado del medio ambiente, y concretamente en este trabajo a la conservación del suelo.

A continuación, se relacionan algunos de los proyectos de I+D que intentan afrontar la contaminación de suelos contaminados tanto a nivel nacional como europeo.

2.3.1 Proyectos I+D nacionales

Es de destacar el elevado número de proyectos subvencionados en el 2005. La tendencia con los años anteriores es alcista, ya que la necesidad de descontaminar suelos es un tema cada vez más importante. Puede que esta actitud fuera llevada a cabo tras la aprobación del Real Decreto 9/2005, que tal vez motivase a los investigadores a adentrarse a un terreno todavía sin demasiada investigación

Algunos de los proyectos que tiene mayor relación con este TFG son los siguientes [16]:

INVESTIGADOR PRINCIPAL	PROYECTO
CSIC	Respuesta de la simbiosis rizobioleguminosa a metales pesados: de análisis ómicos a la fitorremediación de suelos contaminados
CSIC	Tratamiento de suelos mediante procesos electroquímicos

Tabla 2-1 Algunos proyectos de I+D a nivel nacional

Se puede observar que ambos tienen relación con el tratamiento de suelos contaminados. Uno de ellos se relaciona con la fitorremediación y el otro con la electrorremediación. Buscando en la base de datos del CSIC el término fitorremediación, el número de resultados sobrepasa la veintena, por lo que da una idea de la importancia de estas técnicas y de la necesidad de seguir investigándolas e incluso mejorarlas usando tecnologías combinadas como la electrorremediación.

2.3.2 Proyectos I+D europeos

Entre los proyectos más punteros financiados por la Unión Europea referidos a la contaminación de suelos pueden destacarse los siguientes [17]:

INVESTIGADOR PRINCIPAL	PROYECTO
ETHNIKO KENTRO EREVNAS KAI TECHNOLOGIKIS ANAPTYXIS (grupo griego)	POLLINS: Automated Pollution Inspection Scanning System for Soil using a robotic vehicle
ENVIC-SENSE AB (grupo sueco)	FREEDD: A real-time answer to environmental heavy metal contamination

Tabla 2-2 Ejemplos de proyectos financiados por la UE

El primero de ellos introduce el uso de la robótica con el fin de acelerar los procesos de descontaminación dando un diagnóstico mucho más rápido. El segundo se centra en proporcionar soluciones a uno de los grandes problemas de contaminación industrial.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del experimento

3.1.1 Material necesario

El experimento necesario para cumplir los objetivos de este TFG necesitó del siguiente material:

- 14 cajas de plástico de 30 cm de largo (celdas)
- 2 fuentes de corriente continua (para aplicar polaridades opuestas)
- Luces fluorescentes
- 3 temporizadores
- Cables para llevar la corriente de las fuentes a las muestras
- Láminas de grafito como electrodos instalados en el suelo
- Semillas de césped inglés (7,5 gramos por muestra)
- Tierra (1,1 kg por caja)
- Contaminantes:
 - Nitrato de plomo (0,655 gramos por muestra)
 - Sulfato de cadmio (0,177 gramos por muestra)
 - Dicromato de potasio (1,16 gramos por muestra)
- 24 tubos de ensayo
- Medidor de pH y conductividad
- Medidor de humedad
- Voltímetro

3.1.2 Diagrama de flujo de trabajo

A continuación se explica, a través de un diagrama de flujo, cómo se abordó el TFG.



Figura 3-1 Flujo de trabajo durante el desarrollo del TFG

3.1.3 Determinación de los parámetros a hallar

La primera cuestión que se planteó fue qué parámetros eran necesarios medir para cumplir los objetivos impuestos. Realmente, una vez establecidos los objetivos aparecen de forma evidente los parámetros a medir:

- Variación del voltaje en diferentes configuraciones de electrodos
- Medición del crecimiento de las plantas
- Análisis del pH, conductividad y variación de potencial tras un periodo de crecimiento de las plantas

3.1.4 Diseño de la estación de trabajo

Era necesario plantear una estación de trabajo en la que se simularan unas condiciones parecidas a las que se pueden dar en el exterior. El fin del TFG es la influencia de un campo eléctrico en el proceso de fitorremediación de un suelo contaminado, por lo que era preciso montar una celda con plantas y contaminación.

También era importante tener más celdas con otras configuraciones con el fin de comparar resultados entre ellas. Por ello deberían montarse celdas con todas las combinaciones posibles que incluyeran corriente, contaminación, plantas y la ausencia de corriente, contaminación y plantas. Por lo tanto, 8 celdas eran necesarias para cubrir todas las condiciones.

Se decidió establecer unos periodos en los que la corriente circularía en un sentido y otros en los que se invertiría, con el fin de mejorar el esparcimiento de los componentes del suelo.

3.1.5 Pasos previos

Antes de comenzar con los experimentos en sí, hubo que definir la distribución de los electrodos en las celdas (cajas) de plástico. Para ello, se hicieron una serie de pruebas en las que se colocaban los electrodos en diferentes posiciones y se aplicaba un voltaje en ellos, para después medir la variación del potencial a lo largo de la celda. Se buscaba que la variación del voltaje fuese lo más lineal posible

para que los parámetros del pH y de la conductividad afectasen los menos posible a las plantas. A continuación, se muestran las diferentes configuraciones de los electrodos.

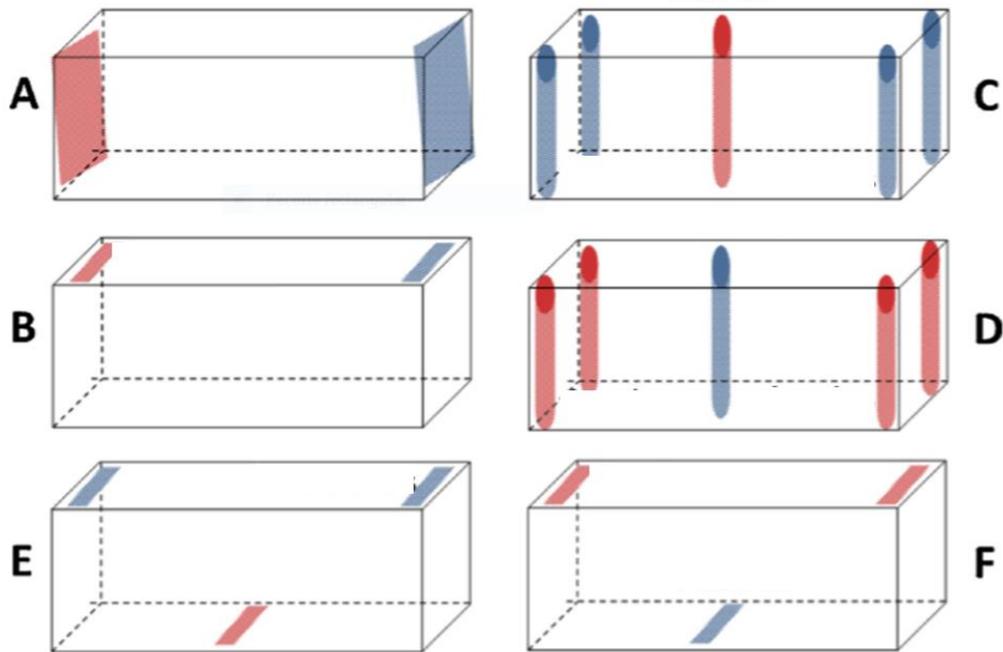


Figura 3-2 Diferentes distribuciones de electrodos. Rojo es ánodo y negro es cátodo

Esto dio los resultados de distribución de potencial que pueden verse en el apartado 4.2.1. Ya con estos datos se eligió la distribución de electrodos óptima, es decir, la que diese lugar a una variación del potencial más lineal. Como se indica más adelante en el apartado 4.2.1, la distribución óptima es la A, a la que se le introducirán unas variaciones explicadas en los párrafos siguientes en cuanto a su polaridad.

3.1.6 Montaje de la estación de trabajo

A continuación, se procedió con el experimento “principal”, que consistía en determinar para la distribución de electrodos A, los efectos del campo eléctrico. Para ello, se disolvieron las cantidades indicadas en el apartado 3.1.1. Se realizaron 4 disoluciones para las 4 muestras que se querían contaminar. Posteriormente se añadieron los contaminantes ya disueltos a la tierra y se dejó que ésta los absorbiera correctamente.

El montaje de la estación tuvo lugar un 23 de enero del 2019. Ese día se procedió a la colocación de las cajas de plástico en la estación de trabajo con la configuración descrita en la Figura 3-3. Se regaron todas las cajas por igual para que su humedad fuese lo más parecida posible. También se conectaron los electrodos mencionados anteriormente configurados con un potencial de 20 voltios o en el caso de este TFG 0,67 voltios/cm (ver apartado 3.1.5).

La dirección del campo eléctrico se dispuso de manera que se recorriese diagonalmente a la caja, esto es, en las esquinas derechas se colocaron los polos positivos y en las izquierdas los negativos (así se lograba que la corriente influyese a la mayor superficie de tierra posible).

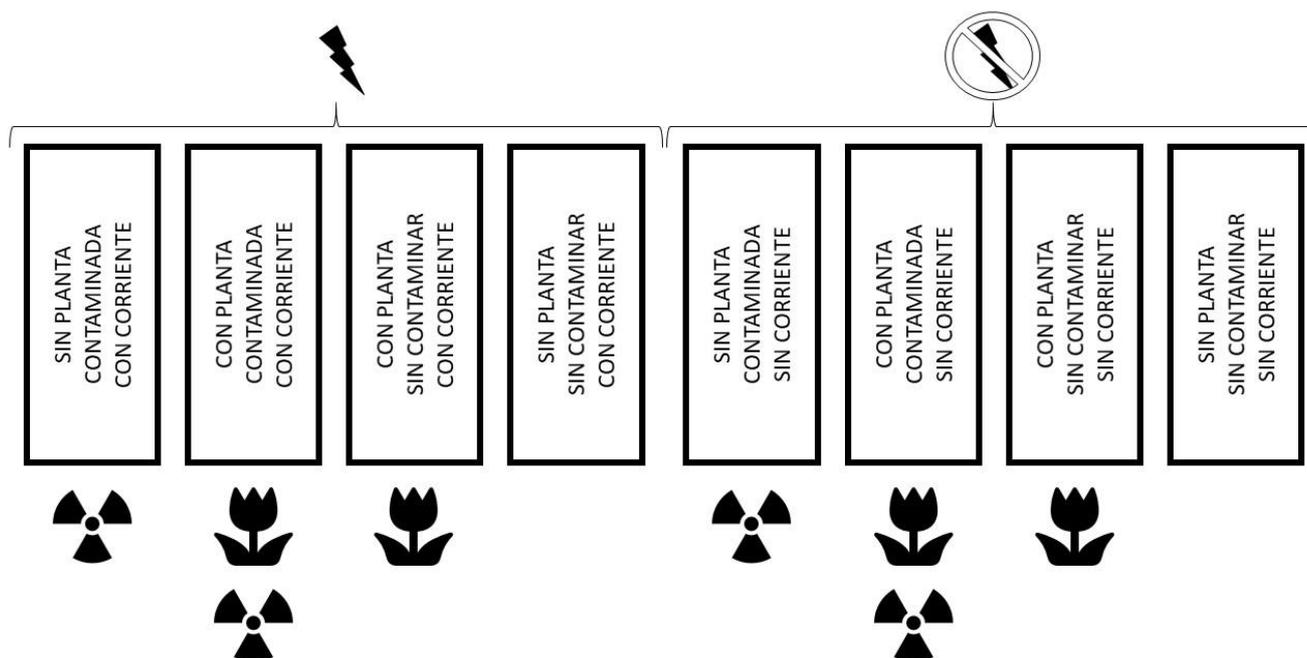


Figura 3-3 Distribución de las muestras y configuración de cada una. El símbolo de la planta indica que se añadieron semillas y el símbolo de radiación indica que el suelo estaba contaminado

Una vez montada la estación de trabajo, se procedió a la configuración de los temporizadores. Esto servía para establecer unos períodos de tiempo en los que las muestras recibían luz (de 08:00 a 20:00) y otros dos períodos en los que las muestras que debían recibir corriente la recibieran primero con una polarización (de 00:00 a 04:00) y luego con la inversa (de 12:00 a 16:00).

La justificación para el empleo de dos polaridades inversas es el mantener los contaminantes repartidos por toda la muestra, evitando que éstos acaben en los extremos de la caja (explicado con más detalle en el apartado 2.2.1).

3.1.7 Observación y medición de las celdas

Diariamente se regaban las cajas y se tomaban medidas del crecimiento de las plantas. No fue hasta el día 28 de enero cuando se observó que crecían ya las primeras plantas de las muestras no contaminadas, apreciándose un crecimiento algo mayor en aquellas que recibieron corriente eléctrica.

El día 4 de febrero hubo que añadir más cantidad de abono a todas las muestras, ya que en las cajas con tierra contaminada y con plantas, éstas no crecían apenas. Se añadió la misma cantidad de abono a todas las muestras para igualar las condiciones de todas ellas. Esto tuvo como resultado que, como se explicará más adelante en el apartado 4.2.2, las plantas experimentaron una aceleración en su crecimiento.

3.1.8 Extracción de las muestras

Una vez llegado el día 12 de febrero, la primera parte del experimento finalizó. Se desconectaron las fuentes de corriente y se detuvo el cuidado de las plantas, así como las mediciones de éstas. Esta segunda parte consistía en tomar muestras de las diferentes cajas para medir el pH y la conductividad del suelo.

A continuación, se presenta un esquema que representa cómo se tomaron esas muestras y su numeración para su posterior identificación.

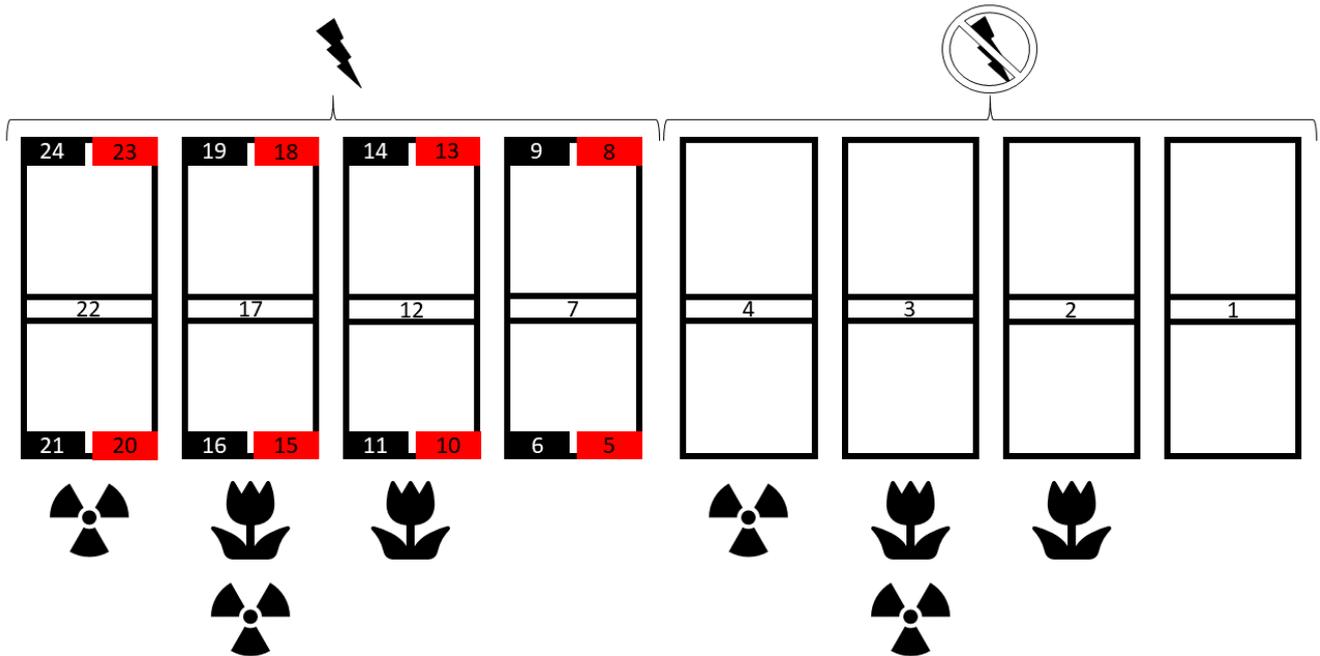


Figura 3-4 Distribución y numeración de las muestras extraídas

Cabe destacar que las zonas en rojo indican que ahí se encontraba el electrodo positivo (ánodo), y en las negras el negativo (cátodo).

Una vez extraída la tierra según la Figura 3-4, se colocó ésta en unas bandejas para su traslado al laboratorio, donde se realizaron las mediciones de pH y conductividad. La extracción de las muestras puede observarse en las siguientes imágenes.



Figura 3-5 Extracción de las muestras sin corriente



Figura 3-6 Extracción de las muestras con corriente



Figura 3-7 Colocación de las muestras en bandejas

3.1.9 Análisis en laboratorio de las muestras

Primeramente, se calibró el instrumento de medida usado para determinar el pH y la conductividad. En sí, el equipo era el mismo, pero disponía de dos sondas para medir ambos parámetros.

El proceso de análisis siguió los siguientes pasos:

1. Se midió la humedad de cada muestra
2. Sabiendo la humedad, podía hallarse la cantidad de suelo seco que contenía esa muestra
3. Se extrajo la cantidad de muestra necesaria para obtener 4 gramos de suelo seco
4. Se mezcló la muestra con agua destilada en una proporción de 1 gramo de suelo seco para 2,5 ml de agua destilada (por lo tanto, se mezcló con 10 ml). Se vertió la disolución en un tubo de ensayo
5. Se dejó reposar la disolución unos momentos para que la tierra se asentase en el fondo del tubo de ensayo

6. Se usó el medidor de pH y de conductividad para obtener ambas medidas
7. Por último, se selló el tubo de ensayo y se etiquetó

A posteriori, se realizó una medición parecida a la realizada en el apartado 3.1.5. Se volvió a medir el potencial a lo largo de la celda con el fin de verificar la linealidad del voltaje, y para comprobar que durante la inversión de la polaridad también se cumplía esta linealidad.

El experimento se realizó de la siguiente forma: se colocó el electrodo positivo (ánodo) centrado en uno de los extremos de la caja, y el cátodo en el opuesto. Se alimentó la conexión con 20 voltios y se fueron tomando medidas del voltaje en el suelo cada cierta distancia. Posteriormente, se invirtió la polaridad y se volvieron a tomar las medidas. En la Figura 3-8 se explica el cambio de electrodos que se hizo con cada una de las cajas con corriente eléctrica.

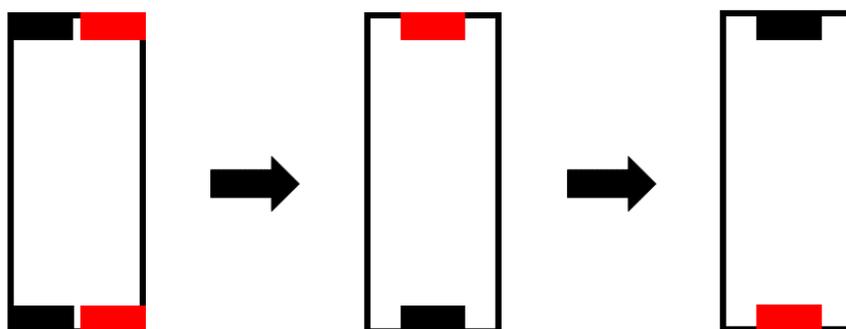


Figura 3-8 Caja con los electrodos en su configuración inicial. El origen para la medición de la distancia es el electrodo situado en la parte superior

Las distancias a las que se midió el voltaje se verán más adelante en el apartado 4.2.3.

4 RESULTADOS

4.1 Introducción

A continuación, se plasman los resultados obtenidos a lo largo de todo el experimento. Se comienza mostrando los resultados obtenidos en el apartado 3.1.5, para posteriormente adjuntar gráficos con el crecimiento de las plantas y variación del voltaje.

Por último, sobre la misma imagen en la que se representó la distribución y configuración de las celdas, se anotaron los resultados obtenidos de pH y conductividad.

4.2 Resultados

4.2.1 Variación del voltaje según distribución de los electrodos

Como se mencionó anteriormente, era necesario determinar la mejor distribución de los electrodos antes de comenzar con el experimento en sí.

En los siguientes gráficos puede observarse como varía el potencial a lo largo de la celda. Como se dijo anteriormente, la distribución A es la que permite una variación más lineal del voltaje, lo que repercute en la estabilidad de los parámetros a analizar del suelo (pH y conductividad).

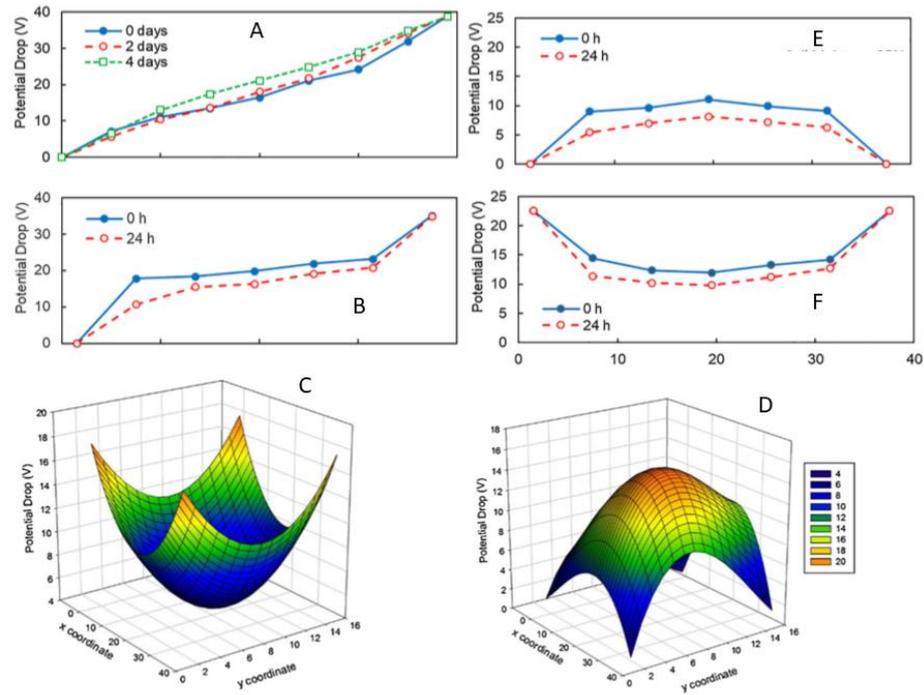


Figura 4-1 Variaciones de voltaje según la distribución de electrodos indicada en la Figura 3-2

Destaca claramente la linealidad de la distribución A frente al resto. Una distribución lineal indica que el campo eléctrico se distribuye de forma uniforme en el suelo y esto es positivo para el desarrollo uniforme de las plantas y para una fitorremediación uniforme de todo el suelo al mismo tiempo. Además, una distribución lineal del campo eléctrico implica una conductividad eléctrica constante en el suelo y por tanto condiciones físico-químicas uniformes. Es por eso que se seleccionó la configuración A para la experimentación posterior, añadiendo la modificación de la inversión de la polaridad periódica, con el fin de conseguir una distribución uniforme de los contaminantes, así como reducir o amortiguar los posibles cambios de pH y conductividad para un tratamiento largo.

4.2.2 Crecimiento de las plantas

A continuación, se muestra un gráfico en el que se puede observar el crecimiento de las plantas a lo largo de los días:

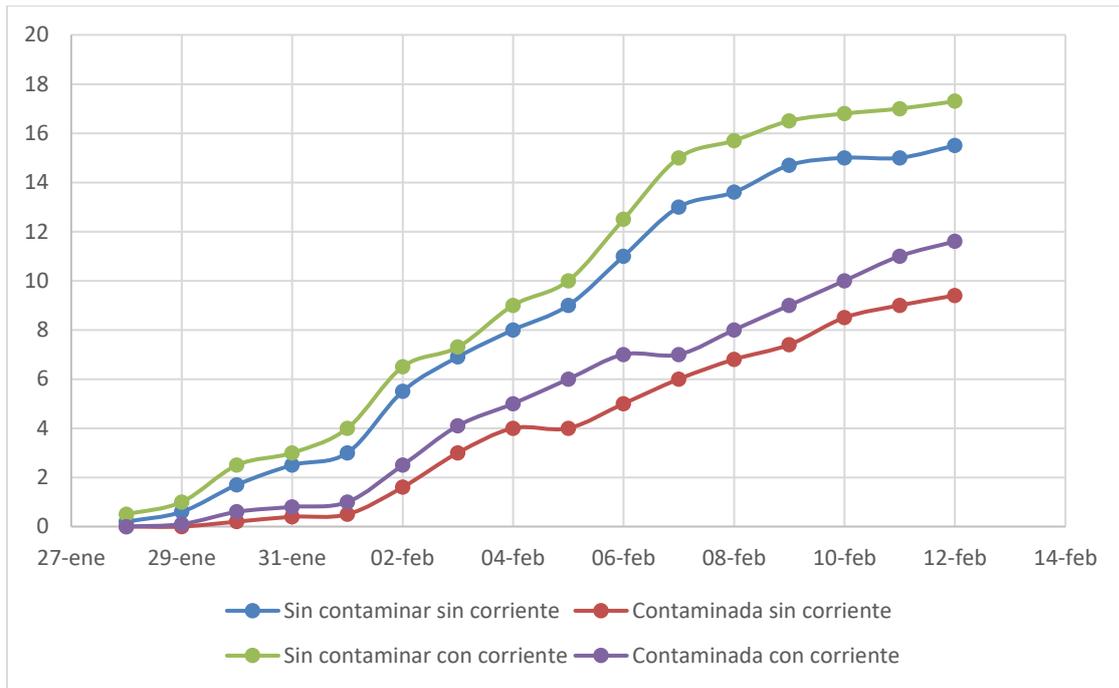


Figura 4-2 Gráfico de crecimiento de las plantas (en cm)

Esto parece indicar que la contaminación afecta negativamente el crecimiento de las plantas mientras que la corriente eléctrica lo favorece. También puede observarse que a partir del día 4 de febrero (cuando se añadió más abono), las plantas en general aumentaron ligeramente su ritmo de crecimiento.

La necesidad de añadir más abono está directamente relacionada con la alta concentración de contaminantes en el suelo, que resultaron demasiado tóxicos para las plantas e impidieron el crecimiento correcto de las mismas.

4.2.3 Diferencia de potencial

Las mediciones del potencial se muestran en el siguiente gráfico. Se pueden observar las medidas tanto para una polaridad como para otra (ver Figura 3-8).

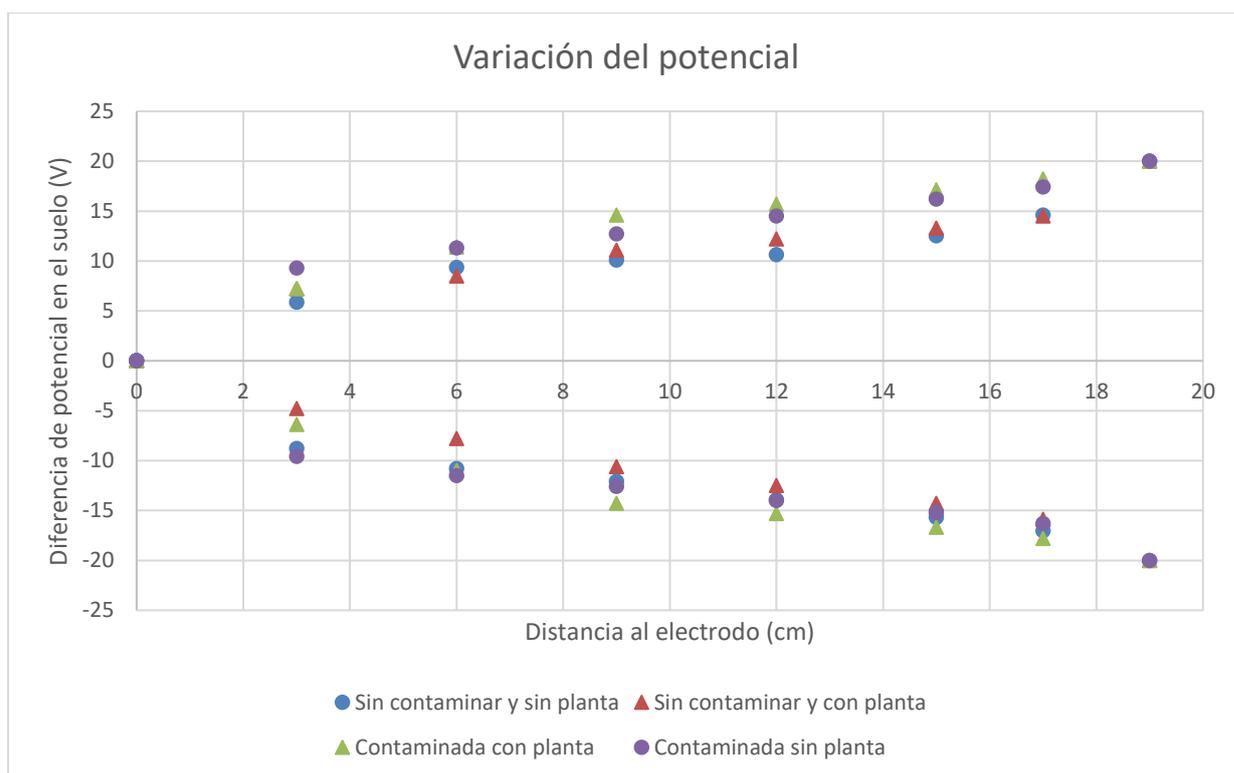


Figura 4-3 Valores de voltaje obtenidos para ambas polaridades y a determinadas distancias del electrodo

La distribución del campo eléctrico es relativamente uniforme a lo largo de la celda, aunque parece que existe una cierta concentración del campo en los primeros 3 cm y los últimos 3 cm de cada celda. Es decir, hay una concentración del campo eléctrico en la zona del suelo próxima a los electrodos. Esto es debido a que son estas zonas las más afectadas por el efecto de la corriente eléctrica que induce el transporte de iones lejos de estas zonas y por tanto se reduce la conductividad eléctrica. Como resultado, el campo eléctrico se concentra en las zonas de menor conductividad. En cualquier caso, debe señalarse que estas diferencias son menores. No se observa una diferencia significativa en la distribución del campo eléctrico debido a la presencia o ausencia de plantas y contaminantes. Debe destacarse que la Figura 4-3 muestra dos distribuciones de campo eléctrico para cada celda. Estas dos distribuciones del campo corresponden a la aplicación de la corriente en los dos sentidos. Como se ve en la figura, la distribución del campo eléctrico es exactamente la misma cuando se aplica en un sentido o en el contrario, confirmando que tal distribución del campo eléctrico se debe exclusivamente a las condiciones físico-químicas del suelo.

4.2.4 Medición del pH

La figura 4-4 muestra los valores de pH en las muestras de suelo seleccionadas. Como se puede ver, el pH en el suelo cerca de los ánodos presenta un valor muy ácido. Esto es debido a la electrólisis del agua que genera sobre el ánodo iones H^+ . Los valores de pH en el suelo cerca de los cátodos fueron alcalinos por el mismo motivo. La electrólisis del agua genera iones OH^- en el cátodo con el resultante incremento de pH. Estos cambios de pH en el suelo cerca de los electrodos dieron lugar a una inhibición del crecimiento de las plantas, especialmente cerca del ánodo donde el valor del pH se encontraba entre $pH = 2 - 3$.

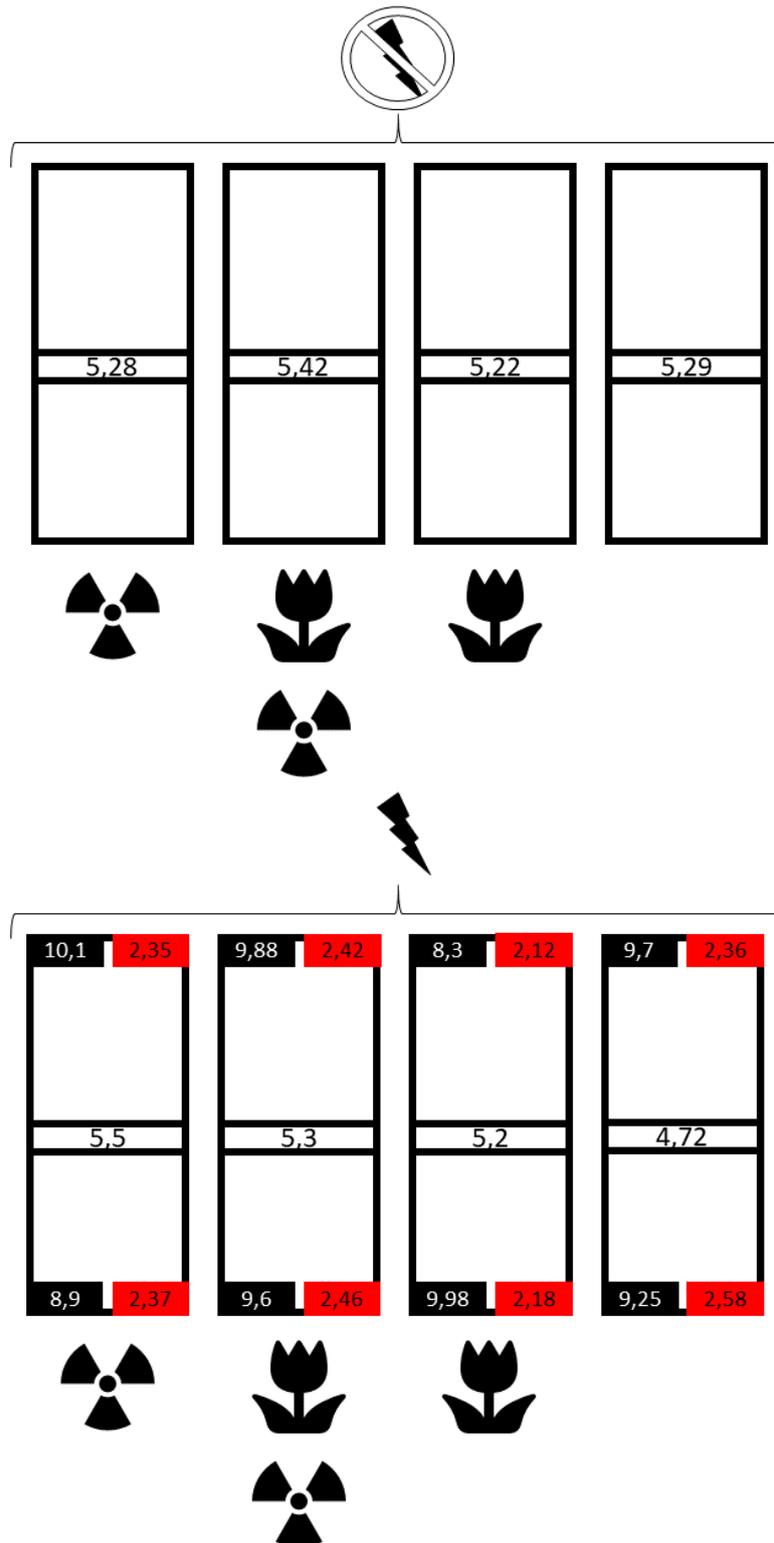


Figura 4-4 Mediciones de pH

Las variaciones entre ánodo y cátodo pueden parecer grandes y que no se corresponden con la decisión tomada anteriormente: elegir la distribución de electrodos A para evitar variaciones elevadas en parámetros como el pH.

Hay que tener en cuenta que las mediciones de pH se tomaron en el suelo adyacente al electrodo y estos valores tan extremos de pH solo se registraron en una estrecha franja de suelo próxima al

electrodo, siendo el pH del resto del suelo el medido en el centro de la celda (Figura 4-4). Por lo tanto, son valores asumibles por dos razones:

- Las medidas se tomaron en la zona del electrodo
- El pH se estabiliza a escasos centímetros del electrodo, por lo que el resto del suelo no se ve alterado de forma tan significativa.

En conclusión, para el voltaje aplicado y distribución de electrodos realizada, los valores de pH de la tierra con perfectamente compatibles con el crecimiento de las plantas.

4.2.5 Mediciones de la conductividad

La siguiente imagen muestra los valores obtenidos de conductividad medidos en mS/cm.

Antes de analizar los resultados obtenidos, es necesario hacer hincapié en que los datos se encuentran en el mismo orden de magnitud, por lo que no existen grandes variaciones entre ellos.

Dicho esto, puede extraerse de las medidas:

- La conductividad se mantiene más o menos estable en toda la celda
- Dentro de esta estabilidad, se puede observar que los ánodos presentan por norma general mayor conductividad que los cátodos

Lo dicho anteriormente cuadra con lo obtenido de las medidas del voltaje. Debido a que la conductividad es bastante estable en toda la celda, la variación de potencial presenta una tendencia muy lineal como puede verse en la Figura 4-3.

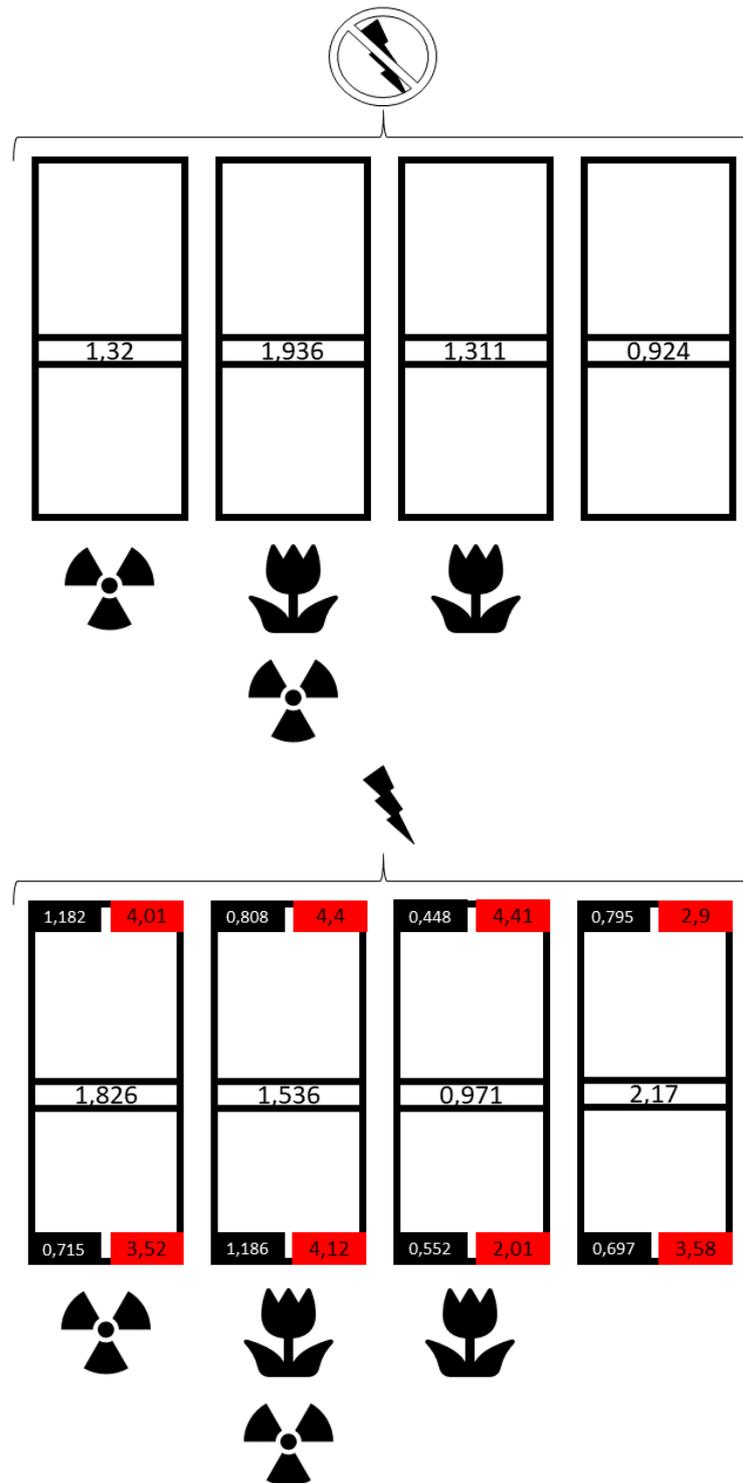


Figura 4-5 Mediciones de conductividad (mS/cm)

4.2.1 Contaminación excesiva de la tierra

Como se ha mencionado anteriormente, surgieron problemas a la hora de hacer germinar las semillas. Todo apunta a que se debió a una contaminación excesiva del suelo, ya que las celdas que presentaron este problema fueron las que se contaminaron.

Se planteó como solución a esto el plantar las semillas en una capa superficial de abono para ayudarlas a germinar. Con el paso del tiempo, las raíces se introducirían en la tierra contaminada, comenzando así el proceso de fitorremediación.

Es por esto importante analizar previamente la contaminación del suelo por si fuera necesario realizar una técnica similar a la expuesta en el párrafo anterior.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Tras la realización de los experimentos, se han obtenido una serie de conclusiones e hipótesis que pueden servir de líneas para futuras investigaciones:

- La aplicación de un voltaje de 0,67 V/cm es beneficioso para el crecimiento de las plantas tanto en presencia como en ausencia de contaminantes en el suelo.
- La concentración de contaminantes a la que sometieron las celdas contaminadas parece que era demasiado elevada para permitir un crecimiento rápido y adecuado de las plantas. Es cierto que la corriente eléctrica mejoró el crecimiento de las plantas, pero aun así se vio un claro efecto fitotóxico en la planta debido a la presencia de metales pesados en el suelo.
- La distribución de electrodos “lado a lado,” aplicada en el experimento principal, ha resultado ser una de las mejores configuraciones para conseguir una distribución uniforme del campo eléctrico en el suelo. Esto permite que las propiedades físico-químicas del suelo se mantengan uniformes en el tiempo sin grandes cambios de pH, conductividad etc.
- En las zonas cercanas a los ánodos no crecían plantas. Esto es inevitable debido a la electrólisis del agua que tiene como consecuencia una acidificación del suelo. El pH adquiriría valores normales a escasos centímetros del electrodo, por lo que la única precaución que habría que tener es no cultivar plantas muy cerca de los ánodos.

Las condiciones ensayadas son adecuadas para el desarrollo de plantas con capacidad fitorremediadora en suelos contaminados. Sin embargo, sería necesario realizar un estudio de mayor duración (6 meses o 1 año) para establecer qué beneficios tiene la aplicación de un campo eléctrico en la eliminación por fitoremediación de metales de un suelo contaminado.

5.2 Líneas futuras

Algunas líneas de investigación futuras o recomendaciones a la hora de querer ahondar más en este tema serían las siguientes:

- Las plantas requieren un tiempo de crecimiento. Por lo tanto, es aconsejable escoger especies que se desarrollen rápidamente y también es necesario disponer de más tiempo para realizar experimentos adicionales como pueden ser análisis sobre la composición de la tierra pasados varios meses de fitorremediación.

- Sería interesante investigar la concentración máxima de contaminantes que son capaces de soportar las plantas para germinar correctamente, y como la electroremediación puede ayudar en este aspecto.
- Determinar la intensidad de corriente y potencial eléctrico que pueden soportar las plantas. Para ello se propone cultivar varias celdas a las que se aplique corrientes distintas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1] ONU, «ACNUR,» Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://eacnur.org/blog/principales-problemas-del-mundo-actual/>. [Último acceso: 24 Enero 2019].
- 2] El País, «El País,» 2007. [En línea]. Available: https://elpais.com/sociedad/2007/11/15/actualidad/1195081203_850215.html. [Último acceso: 19 Enero 2019].
- 3] GreenPeace, «GreenPeace,» [En línea]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/como-llega-el-plastico-a-los-oceanos-y-que-sucede-entonces/>. [Último acceso: 19 Febrero 2019].
- 4] National Center for Ecological Analysis and Synthesis, «National Center for Ecological Analysis and Synthesis,» [En línea]. Available: <https://www.nceas.ucsb.edu/news/new-science-first-estimate-quantifies-plastics-flowing-ocean>. [Último acceso: 20 Febrero 2019].
- 5] Climate Accountability Institute, «Climate Accountability Institute,» [En línea]. Available: <http://climateaccountability.org/carbonmajors.html>. [Último acceso: 23 Febrero 2019].
- 6] D. d. I. R. Pérez, M. Teutli-León y M. Ramírez-Islas, *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*, México, 2017.
- 7] United Nations, «Food and Agriculture Organization, soils section,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>. [Último acceso: 3 Febrero 2019].
- 8] United Nations, «Food and Agriculture Organization (FAO),» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/docrep/006/w1309s/w1309s04.htm>. [Último acceso: 23 Enero 2019].
- 9] United Nations, «Food And Agriculture Organization (FAO), soil quiz,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/en/c/317128/>. [Último acceso: 23 Febrero 2019].
- 10] Ministerio de educación y ciencia, «Protección del suelo y desarrollo sostenible,» de *Seminario europeo sobre la protección del suelo y desarrollo sostenible*, Soria, 2002.
- 11] I. O. Bernad, J. S. García, M. D. Valiño y S. V. Fernández, «Técnicas de recuperación de suelos,» Madrid, 2007.

I. O. Bernad, *Técnicas de Recuperación de Suelos Contaminados Aplicadas a Sedimentos*
12] *Marinos. Posibilidades*, Madrid, 2017.

E. y. L. E. Mattson, *Electrokinetics: An Innovative Technology for In-situ remediation of*
13] *Heavy Metals.*, 1994.

C. Cameselle y M. Vázquez, *Acciones remediadoras del deterioro ambiental*, Nova Galicia,
14] 2010.

S. B. Sanz, *Aplicación de la fitorremediación a suelos contaminados por metales pesados*
15] *(TFG)*, Madrid.

CSIC, «Base de datos del CSIC,» [En línea]. Available: <https://indices.csic.es/>. [Último
16] acceso: 28 Febrero 2019].

European Union, «Cordis,» [En línea]. Available: <https://cordis.europa.eu/>. [Último acceso:
17] 28 Febrero 2019].

ANEXO I: CONTENIDO DEL PRIMER ANEXO

La siguiente tabla muestra las actividades declaradas como contaminantes del suelo por Real Decreto 9/2005 de 14 de enero.

CNAE-2009	Título de la actividad	Alcance de la actividad
06	Extracción de crudo de petróleo y gas natural.	Se exceptúan las actividades sobre lámina permanente de agua.
07.29	Extracción de otros minerales metálicos no féreos.	Todas las actividades.
09.10	Actividades de apoyo a la extracción de petróleo y gas natural.	Se exceptúan los servicios de prospección, los servicios de extinción de incendios y las actividades sobre lámina permanente de agua.
10.4	Fabricación de aceites y grasas vegetales y animales.	Se exceptúan almazaras de aceite de oliva con un volumen de producción igual o inferior al señalado en el anejo 1 epígrafe 9.1.b.ii de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación.
13.30	Acabado de textiles.	Todas las actividades.
13.96	Fabricación de otros productos textiles de uso técnico e industrial.	Únicamente la fabricación de tejidos impregnados, bañados, recubiertos o estratificados con materias plásticas.
15.11	Preparación, curtido y acabado del cuero; preparación y teñido de pieles.	Todas las actividades.
16.10	Aserrado y cepillado de la madera.	Cuando se realizan tratamientos químicos.
16.21	Fabricación de chapas y tableros de madera.	Todas las actividades.
17.1	Fabricación de pasta papelera, papel y cartón.	Todas las actividades.
17.24	Fabricación de papeles pintados.	Todas las actividades.
18.11	Impresión de periódicos.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
18.12	Otras actividades de impresión y artes gráficas.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado - Excepto actividades al por menor.
18.13	Servicios de preimpresión y preparación de soportes.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado. - Excepto actividades al por menor.
19	Coquerías y refino de petróleo.	Se exceptúa la fabricación de briquetas de turba y la fabricación de briquetas combustibles de hulla y lignito.
20	Industria química.	Todas las actividades excepto el enriquecimiento de minerales de Uranio y Torio.
21	Fabricación de productos farmacéuticos.	Se exceptúa la fabricación de sustancias radioactivas para el diagnóstico in vivo.
22.1	Fabricación de productos de caucho.	Todas las actividades.
23.1	Fabricación de vidrio y productos de vidrio.	Todas las actividades.
23.31	Fabricación de azulejos y baldosas de cerámica.	Todas las actividades.
23.41	Fabricación de artículos cerámicos de	Todas las actividades.

CNAE-2009	Título de la actividad	Alcance de la actividad
	uso doméstico y ornamental.	
23.65	Fabricación de fibrocemento.	Todas las actividades.
23.9	Fabricación de productos abrasivos y productos minerales no metálicos n.c.o.p.	Todas las actividades.
24.1	Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones.	Todas las actividades.
24.2	Fabricación de tubos, tuberías, perfiles huecos y sus accesorios, de acero.	Todas las actividades.
24.3	Fabricación de otros productos de primera transformación del acero.	Todas las actividades.
24.41	Producción de metales preciosos.	Se exceptúa el comercio al por menor.
24.42	Producción de aluminio.	Todas las actividades.
24.43	Producción de plomo, zinc y estaño.	Todas las actividades.
24.44	Producción de cobre.	Todas las actividades.
24.45	Producción de otros metales no féreos.	Todas las actividades.
24.5	Fundición de metales.	Todas las actividades.
25	Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipo.	Todas las actividades.
26.1	Fabricación de componentes electrónicos y circuitos impresos ensamblados.	Todas las actividades.
26.2	Fabricación de ordenadores y equipos periféricos.	Se exceptúa el ensamblaje de componentes.
26.3	Fabricación de equipos de telecomunicaciones.	Se exceptúa el ensamblaje de componentes.
26.4	Fabricación de productos electrónicos de consumo.	Se exceptúa el ensamblaje de componentes.
26.51	Fabricación de instrumentos y aparatos de medida, verificación y navegación.	Se exceptúa el ensamblaje de componentes.
26.6	Fabricación de equipos de radiación, electromédicos y electroterapéuticos.	Todas las actividades.
27.1	Fabricación de motores, generadores y transformadores eléctricos, y de aparatos de distribución y control eléctrico.	Todas las actividades.
27.2	Fabricación de pilas y acumuladores eléctricos.	Todas las actividades.
27.3	Fabricación de cables y dispositivos de cableado.	Todas las actividades.
27.4	Fabricación de lámparas y aparatos eléctricos de iluminación.	Todas las actividades.
27.51	Fabricación de electrodomésticos.	Todas las actividades.
27.9	Fabricación de otro material y equipo eléctrico.	Todas las actividades.
28	Fabricación de maquinaria y equipo n.c.o.p.	Todas las actividades.
29	Fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques.	Todas las actividades.
30.1	Construcción naval.	Todas las actividades.
30.2	Fabricación de locomotoras y material ferroviario.	Todas las actividades.
30.3	Construcción aeronáutica y espacial y su maquinaria.	Todas las actividades.
30.4	Fabricación de vehículos militares de	Todas las actividades.

ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO PARA LA MEJORA DE
FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

CNAE- 2009	Título de la actividad	Alcance de la actividad
	combate.	
30.91	Fabricación de motocicletas.	Todas las actividades.
30.92	Fabricación de bicicletas y de vehículos para personas con discapacidad.	Todas las actividades.
31	Fabricación de muebles.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
33.11	Reparación de productos metálicos.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
33.12	Reparación de maquinaria.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
33.14	Reparación de equipos eléctricos.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
33.15	Reparación y mantenimiento naval.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
33.16	Reparación y mantenimiento aeronáutico y espacial.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
33.17	Reparación y mantenimiento de otro material de transporte.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen tintas, pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
35.12	Transporte de energía eléctrica.	Subestaciones eléctricas con transformadores de potencia o reactancias.
35.13	Distribución de energía eléctrica.	Subestaciones eléctricas con transformadores de potencia o reactancias.
35.15	Producción de energía hidroeléctrica.	Todas las actividades.
35.16	Producción de energía eléctrica de origen térmico convencional.	Todas las actividades.
35.18	Producción de energía eléctrica de origen eólico.	Únicamente las subestaciones y transformadores de potencia.
35.19	Producción de energía eléctrica de otros tipos.	Se exceptúa la producción de energía eléctrica por transformación de la energía solar en edificios residenciales. En actividades de producción de energía fotovoltaica únicamente las instalaciones de conversión y transformación.
35.21	Producción de gas.	Todas las actividades.
37	Recogida y tratamiento de aguas residuales.	Tratamiento de aguas residuales industriales Tratamiento de aguas residuales urbanas en plantas de más de 2.000 habitantes equivalentes.
38	Recogida, tratamiento y eliminación de residuos; valorización.	Operaciones de valorización y eliminación de residuos incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (anexos I y II) y sus normas de desarrollo

CNAE-2009	Título de la actividad	Alcance de la actividad
		Se exceptúan las instalaciones en las que únicamente se lleven a cabo operaciones R 12 y/o R 13 con residuos de «ropa» (20 01 10) o «papel y cartón» (20 01 01) y la encapsulación, preparación y otro tipo de tratamiento de los residuos nucleares para su almacenamiento.
45.2	Mantenimiento y reparación de vehículos de motor.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado.
45.4	Venta, mantenimiento y reparación de motocicletas y de sus repuestos y accesorios.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen depósitos enterrados de sustancias peligrosas o - Cuando se consumen pinturas o barnices de base no acuosa en cantidades superiores a 1 ton/año o - Cuando los focos potencialmente contaminantes del suelo se encuentran a la intemperie o sobre suelo no pavimentado - Se exceptúa la venta.
46.12	Intermediarios del comercio de combustibles, minerales, metales y productos químicos industriales.	Todas las actividades.
46.71	Comercio al por mayor de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, y productos similares.	Se exceptúa el comercio al por mayor de combustibles gaseosos cuando: <ul style="list-style-type: none"> - no existen talleres o - no existen zonas destinadas a mantenimiento o - no existen zonas destinadas a la limpieza de medios de transporte o - no existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - no existen subestaciones con transformadores de potencia o reactancias o - no existe almacenamiento de sustancias peligrosas no gaseosas.
46.72	Comercio al por mayor de metales y minerales metálicos.	Únicamente cuando se produzca almacenamiento exterior o sobre suelo no pavimentado.
46.73	Comercio al por mayor de madera, materiales de construcción y aparatos sanitarios.	Únicamente el comercio al por mayor de pinturas y barnices.
46.75	Comercio al por mayor de productos químicos.	Todas las actividades.
46.77	Comercio al por mayor de chatarra y productos de desecho.	Todas las actividades.
47.3	Comercio al por menor de combustible para la automoción en establecimientos especializados.	Únicamente cuando posean instalaciones de almacenamiento a granel distintas a las de gas licuado del petróleo.
47.78	Otro comercio al por menor de artículos nuevos en establecimientos especializados.	Únicamente el comercio al por menor de combustibles líquidos para uso doméstico.
49.1	Transporte interurbano de pasajeros por ferrocarril.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores.
49.2	Transporte de mercancías por ferrocarril.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores.
49.3	Otro transporte terrestre de pasajeros.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o

ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO PARA LA MEJORA DE
FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

CNAE-2009	Título de la actividad	Alcance de la actividad
49.4	Transporte de mercancías por carretera y servicios de mudanza.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores. - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores.
49.5	Transporte por tubería.	Cuando se transportan y/o bombean sustancias peligrosas no gaseosas Cuando se transportan y/o bombean hidrocarburos líquidos.
52.1	Depósito y almacenamiento.	Depósito y almacenamiento de mercancías peligrosas no gaseosas a granel.
52.21	Actividades anexas al transporte terrestre.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores.
52.22	Actividades anexas al transporte marítimo y por vías navegables interiores.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores.
52.23	Actividades anexas al transporte aéreo.	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando existen talleres o - Cuando existen zonas destinadas a mantenimiento o - Cuando existen zonas destinadas a limpieza de medios de transporte o - Cuando existe almacenamiento y/o suministro de combustible o - Cuando existe almacenamiento de sustancias peligrosas o - Cuando existen subestaciones eléctricas o transformadores.
74.2	Actividades de fotografía.	Únicamente el revelado, positivado e impresión. Se exceptúa el comercio al por menor.
81.29	Otras actividades de limpieza.	Únicamente la limpieza interior de camiones y buques cisterna.
93.12	Actividades de los clubes deportivos.	Únicamente los clubes de tiro cuando se utilice munición.
96.01	Lavado y limpieza de prendas textiles y de piel.	Se exceptúa el comercio al por menor.

Tabla 0-1 Listado de actividades declaradas contaminantes para el suelo