



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C.

c i d e t e q

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN CAMPO  
ELÉCTRICO PARA LA ESTIMULACIÓN DE LA  
GERMINACIÓN Y DESARROLLO DE PLANTAS CON  
METABOLISMOS C3, C4 Y CAM EMPLEANDO UN  
ARREGLO DE ELECTRODOS 1D Y 2D

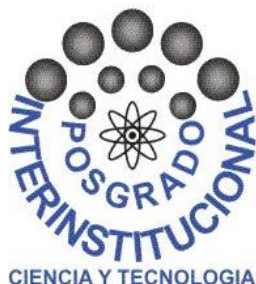
# Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

*Doctor en Ciencia y Tecnología  
en la Especialidad de Ingeniería Ambiental*

PRESENTA

M. en C. Gustavo Acosta Santoyo



Santiago de Querétaro, Qro., México, abril de 2018.





**Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección de:**

**Dra. Erika Bustos Bustos**



## CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos,  
Subdirectora de Posgrado,  
PICYT-CIDETEQ Querétaro.  
P r e s e n t e.

Los abajo firmantes, miembros del jurado de Examen de Grado del Alumno GUSTAVO ACOSTA SANTOYO, una vez leída y revisada la Tesis: “**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO PARA LA ESTIMULACIÓN DE LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO DE PLANTAS CON METABOLISMOS C3, C4 Y CAM EMPLEANDO UN ARREGLO DE ELECTRODOS 1D Y 2D**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentado por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de INGENIERÍA AMBIENTAL durante el examen de grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente el día 20 del mes de abril del año dos mil dieciocho.

---

Dr. Stefan de Folter  
*Presidente*

---

Dr. Adrián Rodríguez García  
*Secretario*

---

Dra. Irma Robles Gutiérrez  
*Vocal*

---

Dra. Yolanda Reyes Vidal  
*Vocal*

---

Dra. Maribel Pérez Corona  
*Vocal*

## Dedicatoria

“Eu não tenho filosofia: tenho sentidos...  
Se falo na Natureza não é porque saiba o que ela é.  
Mas porque a amo, e amo-a por isso,  
Porque quem ama nunca sabe o que ama  
Nem por que ama, nem o que é amar...”

Alberto Caeiro

A Gustavo y Maru, por ser mis guías. A Rolando por apoyarme en este proceso de manera incondicional. A mis familiares y amigos, que hicieron más llevadero este proceso, a todos muchas gracias.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por las facilidades otorgadas para la culminación de mis estudios de doctorado, así como por el apoyo financiero otorgado en una beca de manutención.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ), por el apoyo recibido para la difusión de este trabajo, tanto en un Congreso Internacional como en una publicación en la revista NTHE.

Al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. (CIDETEQ), especialmente a la Dra. Erika Bustos, por su apoyo, por las oportunidades que emprendimos en este proyecto y por enseñarme valores importantes como la constancia y la perseverancia en la ciencia.

Agradezco además al Dr. Juan Manríquez Rocha, a la Dra. María Yolanda Reyes Vidal, al Dr. Francisco Rodríguez Valadez y a la Dra. Nancy Velasco Álvarez por sus importantes contribuciones al entendimiento y desarrollo de este proyecto.

Al Laboratorio Nacional de Genómica para la Biodiversidad (LANGEBIO) del Instituto Politécnico Nacional, en especial al Dr. Stefan de Folter por sus importantes contribuciones y apoyo para la realización de gran parte de esta investigación.

A la Escola de Enxeñería Industrial de la Universidade de Vigo, España; especialmente al Dr. Claudio Cameselle por las facilidades prestadas para realizar una estancia de investigación en la que se llevó a cabo una parte importante de este proyecto.

Al Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en especial a la M. en C. Sara Solís por su importante apoyo para la caracterización físico-química de suelos.

Al Dr. Stefan de Folter, el Dr. Adrián Rodríguez García, la Dra. Irma Robles Gutiérrez, la Dra. Yolanda Reyes Vidal y la Dra. Maribel Pérez Corona por la revisión de este escrito.

Al SINERTEC y a la National Science Foundation (NSF), especialmente a la M. en C. Alba Sánchez, a la Lic. Carolina Tenorio y a la M. en C. Ruth Bordallo, por su apoyo durante la participación en la primera cohorte de los Nodos Binacionales de Innovación (NoBI), durante el año 2017. Agradezco también a la M. en C. Claudia Ríos por su invaluable apoyo durante este proyecto.

Al personal administrativo y de servicios del CIDETEQ, especialmente a la Lic. Abigail de Jesús Pérez de la Subdirección de Posgrado y a Isabel Mendoza Hernández del Centro de Información.

A mis compañeros de laboratorio: Dra. Irma, Dr. Alberto, Dra. Rosy, Dra. Maribel, M. en C. Diana, M. en C. Alberto Alejandro, M. en C. Ruslán, Ing. Jazmín, Ing. Itzel, Ing. Oswaldo, a mis amigos: Jorge, Mónica, Gerardo, Earving y Jaime y a los estudiantes de estadía corta y prácticas que me apoyaron durante este proyecto: Leonel Isaí, Hilda Nataly, Ignacio, Berenisse y Edgar.

## Resumen

Debido a la demanda creciente de alimentos en el mundo, así como el incremento de la población, que conlleva a una sobreexplotación de los recursos naturales, incluyendo el suelo, es necesario generar alternativas que ayuden a mitigar los efectos de la degradación de este valioso recurso, dado que es uno de los principales sustentos para la vida en la tierra. En este trabajo de investigación se abordó el tema de mejoramiento de suelos desde dos perspectivas diferentes pero que no se excluyen a sí mismas, una es la técnica de electro-cultivo, la cual es una tecnología promisoría para incrementar las poblaciones vegetales, así como su rendimiento y puede ser aplicado tanto en plantas de importancia ambiental como económica; por otro lado, la electro-fitoremediación que ayuda a resolver los problemas presentados por otras técnicas de remediación de suelos contaminados, como la efectividad y el costo de muchas de estas tecnologías, así como ayudar a potenciar el efecto de dos tecnologías separadas: la electro-remediación y la fitoremediación. Se presenta este trabajo en diferentes niveles: nivel laboratorio, en el cual se utilizaron distintas especies para comprobar la técnica de electro-cultivo; el empleo de *Lolium perenne* como modelo para la electro-fitoremediación a nivel laboratorio; a nivel piloto empleando maíz tanto para electro-cultivo como para electro-fitoremediación dada su importancia en la economía mexicana y a nivel campo donde se implementó la tecnología de electro-fitoremediación *on-site* para evaluar su efectividad; finalmente se presenta un análisis de factores físicos y químicos del suelo para ayudar a explicar el efecto de la aplicación de un campo eléctrico para la rehabilitación de suelos. Los objetivos principales de este proyecto fueron probar dos tecnologías de tratamiento de suelos (electro-cultivo y electro-fitoremediación) utilizando diferentes organismos vegetales, arreglos y materiales de electrodos para encontrar las mejores condiciones de trabajo. Este trabajo detalla que el tratamiento de plantas con un campo eléctrico aumenta tanto el porcentaje de germinación como el desarrollo de plantas utilizando electrodos IrO<sub>2</sub>-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>|Ti como ánodo y Ti como cátodo, como resultado del movimiento de iones debidos a la imposición del campo eléctrico en las partículas de suelo.



## Abstract

The increasing demand of food worldwide and the population increase, leads to an overexploitation of natural resources, including soil, it is imperative to generate alternatives that help to mitigate the effects of the degradation of this valuable resource, since it is one of the main elements to sustain life in our planet. In this research project, the issue of soil improvement was addressed from two different perspectives, but that does not exclude themselves: the first is the technique of electro-culture, which is a promissory technology that enhances plant development and crop yield and can be applied both to environmental and economic importance plants. On the other side, electro-phytoremediation can help to solve the complications of other available phytoremediation techniques, like effectivity and cost/benefit ratio increasing the effect, moreover, increase the strength of both technologies when used separately (electro-remediation and phytoremediation). This research was developed at laboratory level, with different plant species tested to verify the effectivity of the electro-culture technique using *Lolium perenne* as a model for electro-phytoremediation. Additionally, at pilot level, maize (*Zea mays*) was used for electro-culture and electro-phytoremediation due for its importance on the Mexican economy. In the end of this research, physical and chemical factors of soil properties were analyzed, to understand the effect of the application of an electric field for the rehabilitation of soil.

## Nomenclatura

Símbolo	Significado
1D	Una dimensión.
2D	Dos dimensiones.
CA	Corriente alterna.
CD	Corriente directa.
CD-IP	Corriente directa con inversión de polaridad.
CE	Conductividad eléctrica, en dS/m.
CIC	Capacidad de intercambio catiónico, en Cmol/Kg.
DSA <sup>®</sup>	Dimensional Stable Anodes, Ánodos Dimensionalmente Estables.
E	Potencial en V.
E-FR	Electro-fitoremediación.
EC	Electro-cultivo.
ER	Electro-remediación.
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos.
HC	Hidrocarburos.
M	Concentración molar [=] M [=] mol•L <sup>-1</sup>
mL	Mililitro.
mM	1x10 <sup>-3</sup> M
MO	Materia Orgánica [=] %.
MP	Metales pesados.
N	Normalidad.
NMX	Norma Mexicana.
NOM	Norma Oficial Mexicana.
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

# Índice

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen .....	iv
Abstract.....	v
Nomenclatura.....	vi
Índice .....	vii
Índice de Tablas.....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
1. Introducción.....	1
2. Marco Teórico .....	4
2.1. El suelo. ....	5
2.1.1. Proceso de formación del suelo. ....	6
2.1.3. Composición y clasificación de suelos. ....	7
2.1.2. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.....	13
2.1.2.1. Propiedades físicas. ....	14
2.1.2.2. Propiedades químicas.....	17
2.1.2.3. Propiedades biológicas.....	21
2.2. El suelo como medio de crecimiento para las plantas. ....	25
2.3. Las plantas. ....	26
2.3.1. Procesos de nutrición vegetal. ....	28
2.3.2. El metabolismo de las plantas.....	31

2.3.2.1. Metabolismo C <sub>3</sub> .....	34
2.3.2.2. Metabolismo C <sub>4</sub> o Hatch-Slack. ....	34
2.3.2.3. Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM). ....	35
2.4. Degradación del suelo por actividades industriales y agronómicas.....	37
2.4.1. Contaminación de los suelos por hidrocarburos y metales pesados. ....	39
2.4.1.1. Contaminación por hidrocarburos. ....	40
2.4.1.2. Contaminación por metales pesados. ....	43
2.5. Técnicas de remediación de suelos contaminados.....	44
2.6. Técnicas de mejoramiento de suelo para actividades agrícolas. ....	56
3. Antecedentes.....	60
4. Justificación.....	68
5. Hipótesis.....	70
6. Objetivos.....	72
6.1. Objetivo General.....	73
6.2. Objetivos particulares. ....	73
7. Metodología General.....	75
7.1. Material y reactivos. ....	77
7.1.1. Semillas. ....	77
7.1.2. Toma de muestras de suelo. ....	77
7.1.3. Electrodo.....	78
7.2. Determinación de porcentaje de germinación y desarrollo de plantas. ....	78
7.2.1. Determinación de porcentaje de germinación.....	78
7.2.2. Determinación del desarrollo de plantas. ....	78
8. Resultados.....	80
8.1. Electro-cultivo de plantas. ....	81

8.1.1. Introducción. ....	81
8.1.2. Metodología. ....	81
8.1.2.2. Electro-cultivo de plantas a nivel laboratorio utilizando plantas con metabolismo C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> y CAM utilizando diferentes materiales como electrodos.....	84
8.1.2.3. Análisis radical de plantas de <i>Arabidopsis thaliana</i> en condiciones <i>in vitro</i> ...	87
8.1.2.4. Escalamiento a nivel piloto de la técnica de electro-cultivo utilizando <i>Zea mays</i> como modelo.....	88
8.1.3. Resultados. ....	90
8.1.3.1. Comparativo de la aplicación de CA, CD e IP en plantas utilizando como modelo <i>Lolium perenne</i> mediante el uso de electrodos de grafito-grafito y grafito-titanio.....	90
8.1.3.2. Electrocultivo en plantas con metabolismo C <sub>3</sub> utilizando arreglo de electrodos 1D.....	95
8.1.3.3. Electrocultivo en plantas con metabolismo C <sub>4</sub> utilizando arreglo de electrodos 1D y 2D. ....	99
8.1.3.4. Electro-cultivo en plantas con metabolismo CAM utilizando un arreglo de electrodos 1D. ....	110
8.1.3.5. Análisis de arquitectura radical <i>in vitro</i> utilizando un arreglo de electrodos 1D en plantas de <i>Arabidopsis thaliana</i> . ....	116
8.1.3.6. Análisis del electro-cultivo en condiciones piloto utilizando un arreglo de electrodos 1D utilizando maíz.....	118
8.1.4. Conclusiones parciales.....	121
8.2. Electro-fitoremediación (EFR) de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados.....	123
8.2.1. Introducción. ....	123
8.2.2. Metodología. ....	123
8.2.2.1. Electro-fitoremediación de suelos contaminados artificialmente con PAHs y metales pesados utilizando como modelo <i>Lolium perenne</i> empleando aluminio, grafito y acero inoxidable como material anódico y titanio como material catódico.....	123

8.2.2.2. Electro-fitoremediación de suelos contaminados con hidrocarburo procedentes de un sitio contaminado cerca de una refinería en condiciones de laboratorio y piloto utilizando <i>Zea mays</i> como modelo.....	126
8.2.3. Resultados.....	130
8.2.3.1. Electrofitoremediación de suelos contaminados con metales pesados y PAHs utilizando como modelo <i>Lolium perenne</i> a nivel laboratorio. ....	130
8.2.3.2. Electrofitoremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando como modelo <i>Zea mays</i> en condiciones piloto 1D y 2D.....	136
8.2.3.3. Electrofitoremediación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando como modelo <i>Zea mays</i> en condiciones <i>on-site</i> . ....	143
8.2.4. Conclusiones parciales.....	150
8.3. Determinación propiedades físico-químicas y biológicas del suelo provenientes de las pruebas piloto en condiciones 1D para electro-cultivo y electro-fitoremediación....	152
8.3.1. Introducción. ....	152
8.3.2. Metodología. ....	152
8.3.3. Resultados. ....	153
8.3.4. Conclusiones parciales.....	169
9. Conclusiones Generales.....	171
10. Referencias .....	174
11. Anexos.....	195
11.1. Reactivos y soluciones.....	196
11.2. Material y equipo. ....	197
11.3. Técnicas analíticas. ....	199
11.3.1. Caracterización de las propiedades físico-químicas del suelo. ....	199
11.3.2. Determinación de grasas y aceites siguiendo la NMX-AA-005-SCFI-2000. .	205
11.3.2. Determinación de metales pesados en suelo. ....	205
11.3.3. Determinación de PAHs en suelo. ....	206
11.5. Productividad científica. ....	207

## Índice de Tablas

Tabla 2.1. Clasificación de los suelos de acuerdo a su textura [28].	9
Tabla 2.2. Clasificación de suelos dependiendo de sus características físicas [33].	11
Tabla 2.3. Características para evaluar la calidad del suelo [41].	14
Tabla 2.4. Clasificación de partículas de suelo de acuerdo a su tamaño [45].	15
Tabla 2.5. Parámetros de fertilidad del suelo afectados por el pH [39].	18
Tabla 2.6. Compuestos frecuentes de materia orgánica en el suelo [48].	19
Tabla 2.7. Ejemplo de composición química de un suelo (en %) [51].	21
Tabla 2.8. Algunas propiedades biológicas del suelo y cómo determinarlas [41].	21
Tabla 2.9. Resumen de indicadores de calidad físicos, químicos y biológicos (Modificado de [55], [56].)	23
Tabla 2.9. Resumen de indicadores de calidad físicos, químicos y biológicos (Modificado de [55], [56].) Continuación.	24
Tabla 2.10. Límites máximos permisibles de hidrocarburo en suelo de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SS-2012 [118].	42
Tabla 2.11. Ventajas y desventajas en el uso de diferentes técnicas de remediación de suelos contaminados con compuestos de petróleo y metales pesados [101].	46
Tabla 2.12. Algunos estudios de fitoremediación en suelos con contaminantes mixtos (Tomado de [149]).	49
Tabla 2.12. (Continuación).	50

Tabla 2.13. Diferentes estudios para la electro-remediación de contaminantes [152].	52
Tabla 2.14. Algunos estudios de electro-fitoremediación para suelos contaminados con metales pesados [150].	55
Tabla 8.1. Peso seco de raíz en gramos (g) para los distintos tratamientos de electro-cultivo aplicando 1.0V/cm por 3 h cada 12 h durante 4 semanas total y en distintas zonas de la celda de electro.-cultivo: zona cercana al ánodo, zona cercana al cátodo y media celda...	109
Tabla 8.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo: antes y durante la EFR.	144



## Índice de Figuras

Figura 2.1. Pedón de un perfil del suelo [24], [25].....	6
Figura 2.2. Representación de la composición del suelo [28].....	7
Figura 2.3. Representación de la composición textural del suelo [29].....	8
Figura 2.4. Tipos de suelos encontrados en la República Mexicana, que incluye Cambisol, Aenosol, Solonchak, Kastañozem, Gleysol, Fluvisol, Chernozem, Andosol, Umbrisol, Durisol, Acrisol, Planosol, Solonetz, Gypsisol, Nitisol, Alisol, Lixisol, Histosol, Ferralsol y Plintosol (INEGI, 2007). .....	12
Figura 2.5. Vertisol. A: Vista de la capa superficial con grietas y cuñas características; B: Perfil de suelo tipo Vertisol [37]. .....	13
Figura 2.6. Descripción de las propiedades físicas del suelo y los procesos edafológicos y problemas de manejo relacionados (Adaptado de [43]). .....	14
Figura 2.7. Triángulo textural según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA) [45]. .....	16
Figura 2.8. Componentes del ecosistema terrestre [58].....	25
Figura 2.9. Componentes ambientales que rodean a los organismos [61]. .....	26
Figura 2.10. Representación esquemática de una célula vegetal (adaptado de [64]). .....	27
Figura 2.11. Representación esquemática de una planta [64]. .....	28
Figura 2.12. Ciclo de la fotosíntesis [68]. .....	29
Figura 2.13. Relación entre la raíz y el suelo: (1) Raíces primarias y secundarias y su relación con el suelo; (2) Micelas de suelo. Las arcillas y el humus forman un complejo llamado micela arcilla-humus (A), que puede estar en suspensión con agua en el suelo y	

adquirir carga negativa (B), permitiendo que otras cargas positivas en el suelo se intercambien (C) [70]. .....	30
Figura 2.14. Mecanismos de transporte de nutrientes y agua al interior de las células de la raíz: (A) mecanismos en la membrana de células de la raíz y las partículas de suelo y (B) proceso de movimiento de agua y nutrientes entre el suelo y la raíz hasta llegar al xilema [72]. .....	31
Figura 2.15. Diagrama general del metabolismo de plantas incluyendo las reacciones dependientes e independientes de luz. En el recuadro se muestra un esquema de la anatomía de un tilacoide [75]. .....	32
Figura 2.16. Diagrama general del ciclo de Calvin [70]. .....	33
Figura 2.17. Anatomía de la hoja de una planta C <sub>3</sub> (Modificado de [82]). .....	34
Figura 2.18. Anatomía de la hoja de una planta C <sub>4</sub> (Modificado de [84]). .....	35
Figura 2.19. Anatomía típica de una planta tipo CAM (Tomado y modificado de [89]). ....	36
Figura 2.21. Tipos de degradación de suelos (Modificado de [97]). .....	38
Figura 2.22. Estructura química de algunos de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). .....	42
Figura 2.23. Representación de los procesos involucrados en la fitoremediación [146]. ....	47
Figura 2.24. Representación esquemática de los procesos electro-cinéticos durante la imposición de un campo eléctrico en el suelo. ....	51
Figura 2.25. Diferencias entre corriente alterna y corriente directa: (A) Comportamiento de voltaje contra tiempo, y (B) Comportamiento de los electrones bajo la influencia de corriente alterna y corriente directa. ....	53
Figura 2.26. Población mundial, de 1950 a 2050, por variante de proyección [159]. .....	56

Figura 2.27. Las plantas pueden responder a distintos estímulos entre los que se encuentran la gravedad, la luz, la humedad, la concentración de nutrientes y otros como la energía eléctrica [163].	58
Figura 2.28. Representación esquemática de la técnica de electro-cultivo [170].	59
Figura 7.1. Esquema de la estrategia general del proyecto.	76
Figura 8.2. Representación esquemática del electro-cultivo de <i>Lolium perenne</i> aplicando corriente directa (A) y, (B) cámara de crecimiento con luz artificial [214].	83
Figura 8.3. Representación esquemática de los experimentos realizados con <i>Lolium perenne</i> para analizar el efecto de imposición de corriente directa (CD), corriente alterna (CA) y corriente alterna con intercambio de polaridad (CD-IP) [214].	84
Figura 8.4. Representación esquemática del proceso de electro-cultivo en un arreglo de electrodos 1D: (A) vista lateral del arreglo y (B) vista superior mostrando la disposición de las semillas dentro de la celda [170], [206].	85
Figura 8.5. Representación esquemática de la vista superior del arreglo de electrodos 2D para llevar a cabo los experimentos de electro-cultivo.	86
Figura 8.6. Metodología para observar el desarrollo de raíz <i>in vitro</i> con el tratamiento de electro-cultivo.	88
Figura 8.7. Representación de la disposición y tamaño de electrodos utilizados en los experimentos en condiciones piloto en un arreglo de electrodos 1D.	89
Figura 8.8. Representación del arreglo experimental nivel piloto <i>in situ</i> en celdas con suelo tipo Vertisol pélico (I): A: electro-cultivo, B: electro estimulación, C: cultivo de maíz, D: control de suelo, (II): representación de la siembra de semillas de maíz en cada celda.	89
Fig. 8.9. Efecto de la imposición de un campo eléctrico en semillas de <i>Lolium perenne</i> (0.2 V/cm por tres horas utilizando un ánodo de grafito y un cátodo de titanio en disposición 1D).	90

Figura 8.10. Efecto de tratamientos de corriente directa (CD), corriente alterna (CA) y corriente directa con inversión de polaridad (IP) en <i>Lolium perenne</i> utilizando dos arreglos de electrodos en disposición 1D aplicando 1 V/cm en periodos de 4 h encendido seguido de 8 h apagado durante 4 semanas, teniendo el arreglo de electrodos grafito (-)   grafito (+) (A) y grafito (-)   titanio (+) (B).....	91
Figura 8.11. Efecto de la aplicación de campos eléctricos sobre plantas de <i>Lolium perenne</i> aplicando 1 V/cm durante 4 h seguido de 8 h sin tratamiento durante 4 semanas aplicando corriente directa (CD), corriente alterna (CA) y corriente directa con inversión de polaridad (IP).....	92
Figura 8.12. (A) Estructura radical de plantas de <i>Lolium perenne</i> tratadas con corriente directa (CD), corriente alterna (CA) y corriente directa con inversión de polaridad (IP) y (B) Peso seco del total de la raíz en gramos en cada uno de los tratamientos analizados....	93
Figura 8.13. Efecto de los tratamientos de corriente directa (CD), corriente alterna (CA) y corriente directa con inversión de polaridad (IP) en la producción de biomasa durante un tratamiento de 1 V/cm durante 4 h seguido de 8 h sin tratamiento por 4 semanas utilizando electrodos de grafito como ánodo y cátodo. ....	94
Figura 8.14. Porcentaje de germinación de <i>Arabidopsis thaliana</i> utilizando electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti.....	95
Figura 8.15. Influencia de la aplicación de un campo eléctrico sobre plántulas de <i>Arabidopsis thaliana</i> , en diferentes zonas de la celda de electro-cultivo: fuera del arreglo (F), zona cercana al ánodo IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti (A), zona cercana al cátodo Ti (C), zona media del arreglo entre el ánodo y el cátodo (MC).....	96
Figura 8.16. Plantas de <i>Arabidopsis thaliana</i> después del tratamiento de electro-cultivo utilizando el arreglo de electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti seis semanas después del tratamiento (A). Diámetro de la roseta en cm después de tratamientos con 0.1, 0.2, 0.4 y 0.8 V/cm (B) y tamaño de la roseta de las plantas tratadas con 0.2 V/cm en diferentes zonas de la celda de electro-cultivo (C).....	97

Figura 8.17. Porcentaje de germinación de plantas de trigo ( <i>T. aestivum</i> ) utilizando dos arreglos de electrodos en disposición 1D. ....	98
Figura 8.19. Porcentaje de germinación de semillas de maíz ( <i>Zea mays</i> ) utilizando electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en un arreglo 1D. ....	100
Figura 8.20. Porcentaje de germinación de semillas de maíz ( <i>Zea mays</i> ) utilizando electrodos Ti   Ti en un arreglo 1D.....	101
Figura 8.21. Altura de plantas 5 días después de la aplicación de diferentes tratamientos de electro-cultivo utilizando un juego de electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en un arreglo 1D. ....	102
Figura 8.22. Altura de plantas cinco días después de la aplicación de diferentes tratamientos de electro-cultivo utilizando un juego de electrodos Ti   Ti en un arreglo 1D. ....	103
Figura 8.23. Comparativo de los dos grupos de plantas de maíz tratadas con la técnica de electro-cultivo: IrO <sub>2</sub> -Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   Ti   Ti (A) y Ti   Ti (B). ....	104
Figura 8.24. Porcentaje de germinación de semillas de <i>Lolium perenne</i> después de ser pre-tratadas en un arreglo de electrodos 1D aplicando 0.2 V/cm por 3 h.....	105
Figura 8.25. Altura de la planta de <i>Lolium perenne</i> a las cuales se les aplicó un tratamiento de 1.0 V/cm durante 4 h cada 12 h durante 4 semanas en total utilizando un arreglo de electrodos 1D.....	106
Figura 8.26. Imagen fotográfica de las plantas de <i>Lolium perenne</i> después de 4 semanas, sin tratamiento (control) y tratadas con Ti   Ti y IrO <sub>2</sub> -Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en disposición 1D aplicando 1.0 V/cm cada 12 h por 3 h durante 4 semanas. ....	106
Figura 8.27. Porcentaje de germinación de las semillas de <i>Lolium perenne</i> después de ser sometidas a pre-tratamiento empleando una configuración de electrodos 2D aplicando 0.2 V/cm por 3 h. ....	107

Figura 8.28. Altura de la planta de <i>Lolium perenne</i> a las cuales se les aplicó un tratamiento de 1.0 V/cm durante 4 h cada 12 h durante 4 semanas en total utilizando un arreglo de electrodos 2D.....	108
Figura 8.29. Imagen fotográfica de las plantas de <i>Lolium perenne</i> después de 4 semanas, sin tratamiento (control) y tratadas con Ti   Ti y IrO <sub>2</sub> -Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti en disposición 2D aplicando 1.0 V/cm cada 12 h por 3 h durante 4 semanas. ....	108
Figura 8.30. Imagen de la parte radical por zona de una celda de electro-cultivo en la cual se utilizaron cátodos de titanio, así como ánodos de Ti e IrO <sub>2</sub> -Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti en configuración 2D radial comparados contra raíces sin tratamiento (control).....	110
Figura 8.32. Tasa de germinación de semillas de <i>M. mathildae</i> después de la técnica de electro-cultivo empleando un juego de electrodos Ti   Ti .....	112
Figura 8.33. Diámetro de plantas de <i>Mammillaria mathildae</i> (cm) ocho semanas después del tratamiento de electro-cultivo utilizando IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti.....	113
Figura 8.34. Diámetro de plantas de <i>Mammillaria mathildae</i> (cm) ocho semanas después del tratamiento de electro-cultivo utilizando el juego de electrodos Ti   Ti. ....	114
Figura 8.35. Efecto del uso de IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti y Ti   Ti en arreglo 1D con plantas de <i>M. mathildae</i> . ....	114
Figura 8.36. Porcentaje de germinación de plantas de barril de oro ( <i>E. grusonii</i> ) utilizando IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti y Ti   Ti en disposición 1D. ....	115
Figura 8.37. Incremento de altura de plantas de <i>E. grusonii</i> después de un tratamiento de 4 semanas aplicando 1.0 V/cm CD y 16 semanas después de concluido este tratamiento (Semana 20) con IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti y Ti   Ti en disposición 1D.....	116
Figura 8.38. Incremento del largo de las raíces 7 días después del tratamiento.....	117
Figura 8.39. Raíces de plantas de <i>Arabidopsis thaliana</i> 14 días después del tratamiento, en las cuales se cuantificó el número de raíces secundarias.....	117

Figura 8.40. Porcentaje de germinación de semillas de maíz después de la aplicación de electrocultivo utilizando una configuración de electrodos $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}   \text{Ti}$ en un arreglo 1D. ....	118
Figura 8.41. Imágenes representativas del tratamiento de electrocultivo en un arreglo de electrodos 1D en condiciones piloto utilizando electrodos $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}   \text{Ti}$ . ....	119
Figura 8.44. Incremento de la talla de plantas de maíz en condiciones piloto utilizando un arreglo de electrodos $\text{IrO}_2\text{Ta}_2\text{O}_5 \text{Ti}   \text{Ti}$ en arreglo 1D después de 42 días de tratamiento. ....	121
Figura 8.45. Diseño experimental para el crecimiento de <i>Lolium perenne</i> en suelo contaminado con PAHs y metales pesados. ....	125
Figura 8.46. Representación esquemática de los experimentos realizados en condiciones piloto utilizando un arreglo de electrodos 2D empleando suelo contaminado con hidrocarburos y maíz para realizar electro-fitoremediación. ....	127
Figura 8.47. Imágenes del tratamiento electrocinético de suelo contaminado con hidrocarburo empleando un arreglo 2D circular de electrodos en una refinería de Salamanca en Guanajuato, México. ....	128
Figura 8.48. Diagrama de la zona electro-remediada en una refinería en Salamanca, Guanajuato, donde se indican las zonas de tratamiento con 13 líneas de celdas electroquímicas conectadas en serie, de la L1 a la L13 [152]. ....	129
Figura 8.49. Imagen de la siembra de semillas de <i>Zea mays</i> en el sitio en donde se efectuó el tratamiento electrocinético y contaminado en una refinería en Salamanca, Guanajuato. ....	130
Figura 8.50. Tasa de germinación de semillas de <i>Lolium perenne</i> con un tratamiento de CD (0-0.8 V/cm). ....	131
Figura 8.51. Altura de plantas de <i>Lolium perenne</i> con un tratamiento de CD (0-0.8 V/cm). ....	132

Figura 8.52. Metales pesados residuales en suelo fitoremediado con <i>Lolium perenne</i> en suelo con mezcla de contaminantes.....	134
Figura 8.53. PAHs residuales en suelo fitoremediado con <i>Lolium perenne</i> en suelo con mezcla de contaminantes.....	135
Figura 8.54. Porcentaje de germinación de semillas de maíz después de la aplicación de electrocultivo utilizando una configuración de electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en un arreglo 1D. ....	136
Figura 8.55. Imágenes de experimentos representativos de electro-fitoremediación en suelo contaminado con hidrocarburo, utilizando semillas de maíz 7 días después de aplicar el pre-tratamiento de 0.2 V/cm. ....	137
Figura 8.56. Incremento de la talla de plantas de maíz en condiciones piloto utilizando un arreglo de electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en arreglo 1D después de 7 días de tratamiento. .	138
Figura 8.57. Incremento de la talla de plantas de maíz en condiciones piloto utilizando un arreglo de electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en arreglo 1D después de 35 días de tratamiento.	138
Figura 8.58. Incremento de la talla de plantas de maíz en condiciones piloto utilizando un arreglo de electrodos IrO <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti   Ti en arreglo 1D después de 42 días de tratamiento.	139
Figura 8.62. Porcentaje de remoción de hidrocarburos en suelo contaminado con HC y suelo contaminado con HC previamente tratado con electro-remediación (ER). (A) Remoción de grasas y aceites en suelos contaminados con HC; (B) remoción de grasas y aceites en suelos contaminados con EC, previamente tratados con ER. ....	143
Figura 8.63. Representación gráfica del comportamiento de carbono orgánico antes (A) y durante del proceso de EFR (B). ....	145
Figura 8.64. Representación gráfica del contenido de hidrocarburos fracción pesada (A y B) y media (C y D) antes y durante del proceso de EFR.....	146



Figura 8.65. Representación gráfica del contenido de pireno antes (A) y durante (B) del proceso de EFR.....	147
Figura 8.66. Porcentaje de número de plantas de <i>Zea mays</i> por surco germinado y crecido después de un mes de haber sembrado las semillas en suelo electro-remediado (azul) y en suelo contaminado (rojo).....	148
Figura 8.67. Representación esquemática de crecimiento de plantas de maíz en suelo electro-remediado y suelo limpio, de 1 a más de 50 cm.....	149
Figura 8.68. Imagen de las zonas analizadas, la zona tratada con EFR y la zona adyacente que no recibió el tratamiento donde se observa el crecimiento de plantas de maíz. ....	150
Figura 8.69. Representación esquemática de la división de las celdas de electro-cultivo (E-C) y electro-fitoremediación (EFR) para el muestreo destinado a analizar las propiedades físico-químicas del suelo. ....	153
Figura 8.70. Análisis de pH y conductividad eléctrica (CE) para (A) suelo limpio (electro-cultivo) y (B) suelo contaminado (electro-fitoremediación) con sus respectivos controles. ....	155
Figura 8.71. Representación esquemática del comportamiento de nutrientes en el suelo en pH bajo (menor a 6) y alto (mayor a 8). El potasio, azufre, calcio y magnesio se encuentran más disponibles en valores de pH elevados, mientras que los micronutrientes son más biodisponibles en valores de pH bajos. ....	156
Figura 8.73. Valores de la densidad real para (A) suelo limpio y (B) suelo contaminado, comparado con sus controles.....	161
Figura 8.74. Valores de capacidad de intercambio catiónico y (I) carbonatos y (II) bicarbonatos para suelo limpio (A y C) y contaminado (B y D) comparado con sus controles. ....	163

Figura 8.75. Valores de capacidad de intercambio catiónico y concentraciones de Na (I) y K (II) soluble para suelo limpio (A y C) y suelo contaminado (B y D) comparado con sus controles. .... 167

Figura 8.76. Valores de capacidad de intercambio catiónico y concentraciones de Ca soluble (I) y P disponible (II) en suelo para suelo limpio (A y C) y suelo contaminado (B y D) comparado con sus controles..... 168

Figura 8.77. Resumen de los cambios observados en los valores físico-químicos del suelo durante la estimulación eléctrica: anión (circulo color azul) ( $\text{PO}_4^{-2}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ ) y catión (circulo color rojo) ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$   $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Ca}^{+2}$ ). .... 170

# 1. Introducción



El suelo es un cuerpo tridimensional de materiales orgánicos e inorgánicos en proporciones variables, considerado como un sistema complejo y dinámico, cuyo equilibrio depende de la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas, además de ser el medio natural para el desarrollo de la mayoría de las plantas superiores [1].

El uso de energía eléctrica para influir sobre la respuesta de sistemas biológicos se ha estudiado desde hace tiempo. Los primeros reportes señalan que en la Universidad de Edimburgo en Escocia, Maimbray realizó experimentos estimulando plantas de arrayán (*Myrtus*) con un campo eléctrico por un lapso de tiempo de un mes y observó que se aceleraba la germinación y desarrollo de las plantas. A partir de ese suceso, se han hecho algunas investigaciones esporádicas en las cuales se analiza el efecto de la electricidad para aumentar el rendimiento y desarrollo de las plantas [2]–[7], aunque algunos reportes indican que no hay efecto alguno al aplicar corriente eléctrica a las semillas [8], [9] o incluso había una disminución en la germinación y desarrollo de las plantas tratadas [10]–[12], esta técnica se conoce actualmente como electro-cultivo o *electro-farming*.

En años recientes y debido a las actividades del hombre se ha vuelto imperativo, desarrollar alternativas de recuperación biológica para el tratamiento de suelos contaminados, así como para aumentar la producción agrícola mediante el mejoramiento de suelos al favorecer las propiedades inherentes al mismo [12]. Debido a que la contaminación del suelo afecta negativamente a las comunidades vegetales y a los animales asociados al entorno, incluyendo a los humanos, se describen técnicas para remover contaminantes del suelo entre las que se incluyen tratamientos físicos, químicos y biológicos. En estos últimos se encuentra la fito-remediación, considerada una tecnología económicamente efectiva y amigable con el ambiente que puede ser usada tanto para la remediación de suelos contaminados con metales y metaloides [13] como para suelos contaminados con hidrocarburos [14] o con mezcla de ambos tipos de contaminantes [15]–[17].

En este trabajo de investigación se evaluó el efecto de ambas técnicas, electro-fitoremediación de suelos contaminados y electro-cultivo utilizando diferentes plantas, representantes de los tres metabolismos vegetales más comunes, C3 (*Arabidopsis thaliana*

y *Triticum sp.*), C4 (*Zea mays* y *Lolium perenne*) y CAM (*Echinocactus grusonii* y *Mammillaria mathildae*) con el objetivo de evaluar el efecto de la imposición de diferentes intensidades de campo eléctrico aplicando corriente alterna, corriente directa y corriente directa con intercambio de polaridad para mejorar suelos destinados para la agricultura (electro-cultivo), así como para rehabilitación electroquímica de suelos contaminados con hidrocarburo y metales pesados (electro-fitoremediación), con el fin de evaluar el efecto de la aplicación del campo eléctrico en algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

## 2. Marco Teórico



## 2.1. El suelo.

El **suelo** es un cuerpo natural tridimensional constituido primordialmente por sólidos (minerales y materia orgánica, de composición y tamaño variables), líquidos y gases y es la capa más superficial de la corteza terrestre y se considera como un sistema complejo y dinámico, cuyo equilibrio depende de la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas [18].

La definición de suelo ha evolucionado a través de los años de acuerdo a los conceptos dominantes cuando fue escrita, y puede ayudar a entender los conceptos modernos del suelo: Dokuchaev en 1879 escribió que el suelo “se aplica solamente al horizonte superficial o casi superficial de las rocas, que ha sido más o menos modificado de manera natural por la interacción con el agua, aire y distintos tipos de organismos, ya sean vivos o muertos; lo cual se refleja de cierta manera en la composición, estructura y color de dichas formaciones. Cuando estas condiciones faltan, no existen suelos naturales, sino mezclas artificiales de rocas” [19], en 1905, Ramann describió a los suelos como “la capa desgastada más superficial de la corteza terrestre: que está formada por rocas que han sido reducidas a pequeños fragmentos y han cambiado químicamente junto con los restos de plantas y animales que viven de y en él” [20], otra definición de 1912 de Hilgard menciona que el suelo es “material suelo, friable en el cual, a través de sus raíces, las plantas obtienen el sustento, alimento y otras condiciones para su crecimiento” [21].

Además, el suelo es el medio natural para el desarrollo de la mayoría de las plantas superiores y se considera como un recurso no renovable de vital importancia para la vida del planeta, no obstante, este medio es altamente vulnerable a la contaminación y una vez contaminado, su recuperación es difícil y se considera un proceso de larga duración [22]. Este recurso es utilizado por los humanos para fines muy diversos, entre los que se encuentran la agricultura, la ganadería, extracción de minerales y de materiales para construcción, soporte para las edificaciones, eliminación de residuos y actividades de ocio y recreo, entre otros [23].

### 2.1.1. Proceso de formación del suelo.

En la formación del suelo inciden distintos procesos que van acumulando sus efectos con el transcurso del tiempo destacando la transformación de la roca madre, así como el clima, especialmente las precipitaciones pluviales y la temperatura, las plantas y otros organismos vivos y el hombre. Los materiales que componen el suelo se dividen tradicionalmente en capas llamadas horizontes, que constituyen el perfil del suelo [24] (Figura 2.1).

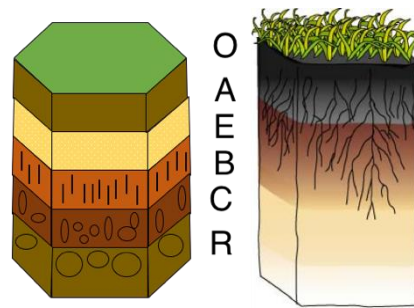


Figura 2.1. Pedón de un perfil del suelo [24], [25].

Esta esquematización de **perfil de suelo** se conoce como **pedón** y es una unidad arbitraria implementada para el examen de suelo en campo, la cual puede tener un área de 1 – 10m<sup>2</sup>, y generalmente se representa en forma hexagonal, El pedón de suelo exhibe las características del suelo de acuerdo a los horizontes del mismo, que son estratos formados por procesos pedogénicos y no deben ser confundidos con capas del suelo, las cuales no necesariamente están formados por estos procesos. Hay cinco horizontes maestros denotados por las letras O, A, E, B y C, debajo del horizonte C generalmente se sitúa la roca madre, R, en suelos que se forman a partir de esta [25].

Cada uno de estos **horizontes** tiene características y propiedades diferentes en un mismo tipo de suelo, y están delimitados por diferencias de color o propiedades como textura, estructura, elementos gruesos, entre otros; además de diferencias asociadas a estas propiedades como pueden ser compacidad, plasticidad, dureza, etc. El horizonte O es la capa más superficial del suelo y está formada principalmente por humus, generalmente por depósitos de material vegetal, le sigue el mantillo que se refiere a la zona comprendida por los horizontes A-E-B, siendo el horizonte A una zona rica en material orgánico debido a



que los minerales son arrastrados por el agua y el horizonte B que es abundante en minerales arrastrados de la parte superficial. El horizonte C o capa intermedia se forma por pedazos de roca fragmentada y arena y carece de materia orgánica; seguido por el horizonte R o lecho rocoso que se refiere al horizonte donde se encuentra la roca madre que les da origen [26]. Las raíces de las plantas se desarrollan en los primeros 20 o 30 cm de profundidad, ya que en esta parte del suelo se encuentran la mayor parte de los elementos químicos asimilables por las plantas.

### 2.1.3. Composición y clasificación de suelos.

El suelo se compone de una fase sólida, una líquida y otra gaseosa (Figura 2.2), en una relación aproximada de 2:1:1 respectivamente, donde la fase sólida es el principal componente y constituye el soporte del suelo ya que comprende elementos como silicatos, micas, feldspatos, cuarzo, minerales arcillosos (caolinita, illita, montmorillonita, etc.), además de óxidos e hidróxidos de Fe, carbonatos, sulfatos, cloruros, y nitratos, el 5 % de esta fracción pertenece a la materia orgánica, sólidos de naturaleza orgánica, materia orgánica amorfa o humus, la materia orgánica puede ser catalogada como materia orgánica reciente, que incluye hojas, ramas y restos de animales y la elaborada, que está formada por sustancias orgánicas que son el resultado de la descomposición del humus joven. La fase líquida está representada por la solución acuosa de sales y sustancias minerales, que contiene iones entre los que se encuentran el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , entre otros. Estos iones son esenciales para abastecer de nutrientes a las plantas. Finalmente, la fase gaseosa está representada principalmente por  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ , cuyas proporciones difieren en composición debido al consumo y producción de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$ , los cuales provienen del aire libre [27].

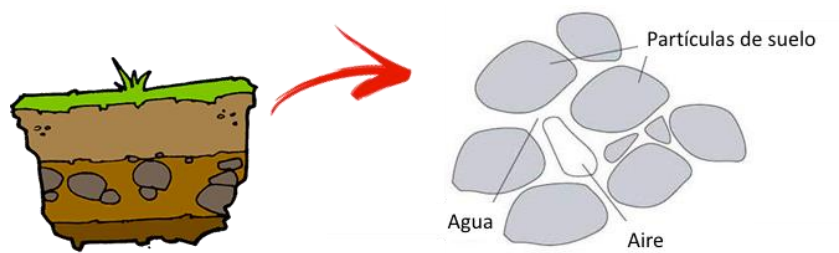


Figura 2.2. Representación de la composición del suelo [28].

Los suelos, según su formación y evolución conducen al desarrollo de diferentes perfiles o tipos de suelos, cuya clasificación puede basarse en criterios diversos entre los que se encuentran: (1) las características intrínsecas del suelo, que dependen de los procesos que los desarrollan; (2) por sus propiedades como permeabilidad, salinidad, composición, que están estrechamente relacionadas con los factores de formación; y (3) según su aptitud para diferentes usos, principalmente agrícola [18].

Las partículas y minerales que forman el suelo tienen diferentes tamaños (Figura 2.3), los cuales se denominan como arena, entre las que se encuentra arena muy gruesa con un tamaño de entre 2.0 a 1.0 mm; arenas finas, con valores entre 0.25 mm a 0.10 mm; limo, con un tamaño de entre 0.05 a 0.02 mm y arcilla con tamaños de partículas menores a 0.002 mm [29].

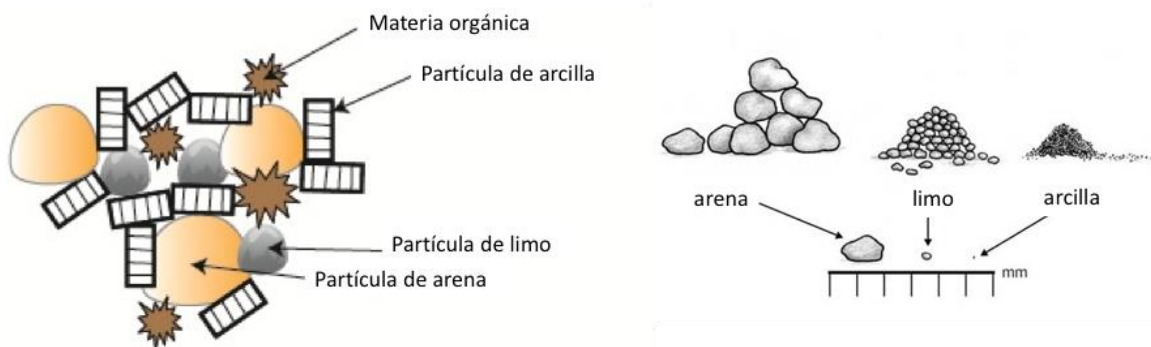


Figura 2.3. Representación de la composición textural del suelo [29].

La clasificación de los suelos surge con el propósito de organizar su conocimiento para entender sus propiedades y las relaciones de estos y el ambiente [26]. De la combinación de las partículas del suelo depende la textura, la cual ayuda a clasificar los suelos en términos generales, que se denominan de acuerdo a la partícula más abundante (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Clasificación de los suelos de acuerdo a su textura [28].

Tipo de suelo	Características
Pedregosos	Son suelos que no retienen agua, no son buenos para el cultivo de plantas y están formados principalmente por partículas muy grandes (piedras).
Arenosos	En estos suelos predominan las partículas de arena, por lo cual no retienen agua, por lo que esta se filtra a zonas más profundas. Generalmente son suelos de color claro y, como no contienen mucha materia orgánica, no suelen ser productivos para la agricultura.
Limosos	Tienen abundancia de partículas de tamaño medio, lo cual le confiere propiedades como retención de agua moderada, este tipo de suelos contienen gran cantidad de materia orgánica, pero se compactan mucho al secarse.
Arcillosos	Debido a la predominancia de arcillas, que son las partículas de mayor tamaño, son suelos casi impermeables y muy compactos en ausencia de agua. Contienen gran cantidad de materia orgánica, y debido a la compactación, cuando están secos no permiten el desarrollo adecuado de raíces de plantas.

Un suelo que se conoce como suelo franco es aquel que contiene aproximadamente la misma proporción de las tres clases de partículas minerales debido a las propiedades que esto le confiere, entre las que se encuentran retención de agua, compactación y aireación, son suelos ideales para la agricultura [30].

Otra manera de **clasificar los suelos** es según la evolución del mismo y de la descomposición de la roca que le dio origen, en este sentido los suelos pueden clasificarse en: (a) suelos no evolucionados, que son suelos de formación reciente, próximos a la roca madre y con poca materia orgánica; (b) suelos poco evolucionados, que contienen gran cantidad de materia orgánica y color variable dependiendo de la composición del mismo; (c) suelos evolucionados, que también tienen gran cantidad de materia orgánica, pero esta se encuentra en diferentes grados de descomposición, la roca madre se encuentra bien desintegrada y estos suelos suelen ser aptos para el desarrollo de las plantas [24].

Una primera clasificación de suelos, según Baldwin, Kellog y Thorp [31] distingue tres órdenes de suelos: suelos zonales, intrazonales y azonales, divididos en órdenes y subgrupos. Los principales sistemas de clasificación de suelos que se utilizan en el mundo son la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2006) y el sistema de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) o la base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) (IUSS Working Group WRB, 2007). La Taxonomía de Suelos se considera un sistema de clasificación morfogénético que consiste en una serie de claves para clasificar a los suelos del mundo, la cual se publica por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA, por sus siglas en inglés), desde el año 1960 y reconoce seis categorías de mayor a menor que son: Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. El Sistema FAO o WRB consta de dos categorías, que son la Unidad y Subunidad y surgió con la publicación de la Leyenda del Mapa de Suelos del Mundo de 1974, y sus objetivos fueron desarrollar un sistema internacional aceptable para delinear el recurso suelo, el que pudiera vincularse y relacionarse con las clasificaciones nacionales y proporcionar una base científica sólida, para que sirva en diferentes áreas como agricultura, geología, hidrología y ecología [32].

Una manera sencilla de clasificar a los suelos es de acuerdo a sus características físicas [33], que incluyen datos sobre la composición de partículas, la disposición de sus horizontes y la génesis de la tierra madre que les da origen (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Clasificación de suelos dependiendo de sus características físicas [33].

Tipo de suelo	Características físicas
Regosol	Son suelos poco desarrollados, constituidos por material semejante a la roca.
Acrisol	Suelos que presentan un horizonte bien definido de arcillas.
Cambisol	Suelos jóvenes con acumulación de arcillas.
Luvisol	Este tipo de suelos presentan una acumulación de arcillas superior al 50%.
Vertisol	Suelos arcillosos y negros, que se localizan en superficies de poca pendiente.
Gleysol	Suelos que presentan agua de manera permanente o semipermanente, el nivel freático se localiza aproximadamente a los 50 cm de profundidad.
Litosol	Suelos muy delgados, abarcan aproximadamente 10 cm de espesor y sostienen una vegetación baja.
Fluvisol	Suelos jóvenes generalmente ricos en material cálcico.
Xerosol	Suelos áridos que contienen materia orgánica.
Otros	Yermosol, Andosol, Solonchak, Rendzima, Planosol

En México existe una gran variedad de suelos, lo que se explica por la interacción de varios factores como la compleja topografía originada por la actividad volcánica del Cenozoico, el amplio gradiente altitudinal (que va de los cero a poco más de 5600 metros sobre el nivel del mar), la presencia de cuatro de los cinco grandes tipos de climas reconocidos por la clasificación de Köppen [34] y la enorme diversidad paisajística y de tipos de rocas que existen en el territorio.

De acuerdo con el INEGI (2007), en México existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS, 2007), en los cuales dominan los Leptosoles (23% del territorio nacional), Regosoles (13.7%), Phaeozems (11.7%), Calcisoles (10.4%), Luvisoles (9%) y Vertisoles (8.6%), que en conjunto ocupan el 81.7% de la superficie nacional (Figura 2.4).

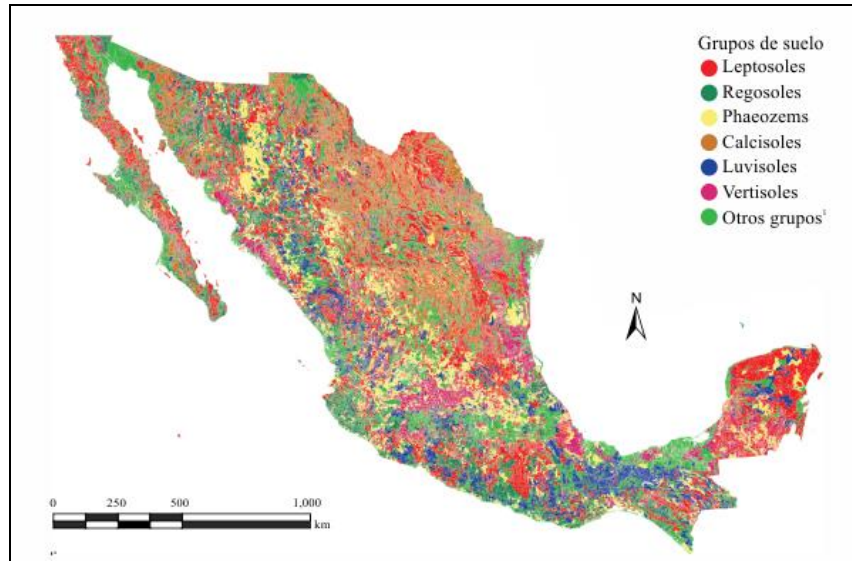


Figura 2.4. Tipos de suelos encontrados en la República Mexicana, que incluye Cambisol, Aenosol, Solonchak, Kastañozem, Gleysol, Fluvisol, Chernozem, Andosol, Umbrisol, Durisol, Acrisol, Planosol, Solonetz, Gypsisol, Nitisol, Alisol, Lixisol, Histosol, Ferralsol y Plintosol (INEGI, 2007).

El nombre **Vertisol** deriva del latín *vertex* que significa mezclado y se refiere a suelos que presentan 30% o más de cantidad de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 50 cm, tiene caras de deslizamiento, se encuentran agregados en forma de cuña y tienen grietas que se abren y se cierran periódicamente, de acuerdo a la cantidad de humedad del suelo; este contenido de arcilla puede llegar hasta 90%, como en los Vertisoles que se originan de depósitos piroclásticos. En general, los vertisoles tienen un color oscuro y carecen de horizontes distintivos (Figura 2.5); las arcillas que dominan son las esmectitas, las cuales tienen una alta capacidad de intercambio catiónico, lo cual hace que estos suelos tengan una alta fertilidad natural [35]. Este tipo de suelo se encuentra catalogado como de los más productivos en México, dada su alta fertilidad natural, debida principalmente a la capacidad de intercambio catiónico y alta retención de humedad. Además, son excelentes para la producción de hortalizas como cebolla, sandía, jitomate y melón; incluso producen excelentes rendimientos de maíz, trigo y sorgo [36].

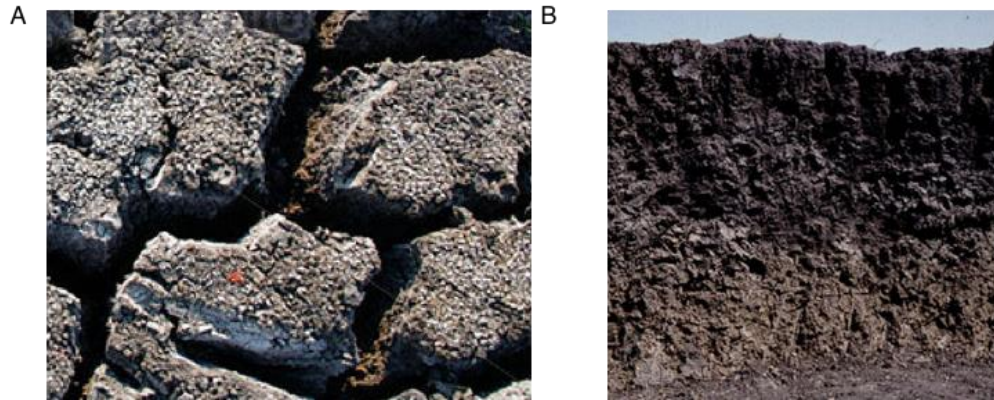


Figura 2.5. Vertisol. A: Vista de la capa superficial con grietas y cuñas características; B: Perfil de suelo tipo Vertisol [37].

Finalmente, se consideran **antrosoles** (del griego: *anthropos*, hombre) aquellos suelos alterados significativamente por actividades humanas como la agricultura, horticultura, actividades industriales o domésticas, entre otras [38]. Su material madre es virtualmente cualquier material edafológico modificado a través del cultivo, excavación o adición de material [18].

### 2.1.2. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

La función primaria del suelo en relación con su calidad química para producción de hortalizas es la de proveer nutrientes para el crecimiento de las plantas [39]. La concentración soluble de un elemento o compuesto en el suelo frecuentemente determina la capacidad de las plantas para absorberlo, la fitotoxicidad y la movilidad de contaminantes se debe a las propiedades del mismo, las cuales cambian de un lugar a otro y está influenciado por muchos factores, entre los que se encuentran la naturaleza de la roca madre, el proceso de evolución y meteorización, procesos ambientales y biológicos, entre otros [40]. Entre las propiedades del suelo que pueden ser analizadas para evaluar la calidad del suelo se encuentran el color, la distribución del tamaño de las partículas que lo componen, la textura, la estructura, la porosidad, la permeabilidad, la composición química, humedad, densidad, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, entre otros [41] (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Características para evaluar la calidad del suelo [41].

Propiedad del suelo			
Física	Textura	Densidad aparente	Tasa de infiltración
Química	Capacidad de intercambio catiónico	Concentración orgánica de carbono	pH
Biológica	Respiración biológica	Presencia de lombrices	Biodiversidad microbiana

### 2.1.2.1. Propiedades físicas.

Las propiedades físicas determinan varios procesos edafológicos clave tales como la capacidad de los usos a los que el hombre los sujeta, como el potencial agronómico del suelo. La condición física de un suelo determina la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad de penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes (Figura 2.6) [42].

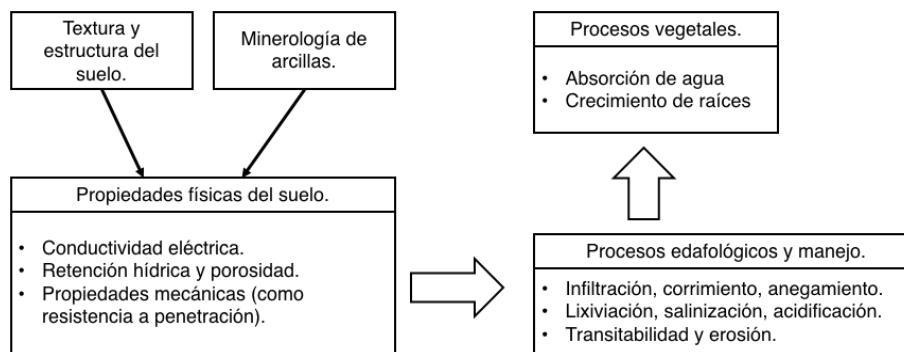


Figura 2.6. Descripción de las propiedades físicas del suelo y los procesos edafológicos y problemas de manejo relacionados (Adaptado de [43]).

La **textura** del suelo se refiere a la proporción de cada partícula (arena, arcilla o limo). Se dice que un suelo tiene buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y facilitan su nutrición [44]. Para conocer el origen de la textura de un suelo, se considera en primer término a la roca madre, ya que a partir de esta el suelo



tendrá una tendencia a ser arcilloso, limoso o arenoso, lo cual puede ser favorecido o contrarrestado por la evolución del suelo [28] (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Clasificación de partículas de suelo de acuerdo a su tamaño [45].

<b>Fracción del suelo</b>	<b>Diámetro de partículas (mm)</b>
Grava	> 2
Arena:	
Arena muy gruesa	2 a 1
Arena gruesa	1 a 0.5
Arena media	0.5 a 0.25
Arena fina	0.25 a 0.1
Arena muy fina	0.1 a 0.05
Limo	0.05 a 0.002
Arcilla	< 0.002

Para conocer la textura de un suelo se emplean tamices que separan las partículas más gruesas y posteriormente se recurre a otras técnicas como el del hidrómetro de Bouyoucos o de Robinson para separar las más finas de acuerdo a su tamaño, basándose en la sedimentación. La clase textural se determina utilizando diagramas triangulares, conocidos como triángulo textural, en el cual cada uno de los lados está graduado en fracciones de 10, siguiendo una escala de 0 a 100, que se relaciona con el porcentaje (cantidad) del elemento que cada lado representa (arena, limo y arcilla), y de acuerdo a la intersección del contenido de cada uno se conoce la denominación del suelo, de esta manera, teniendo el porcentaje de cada una de las fracciones de dichas partículas se puede conocer la textura del suelo (Figura 2.7).

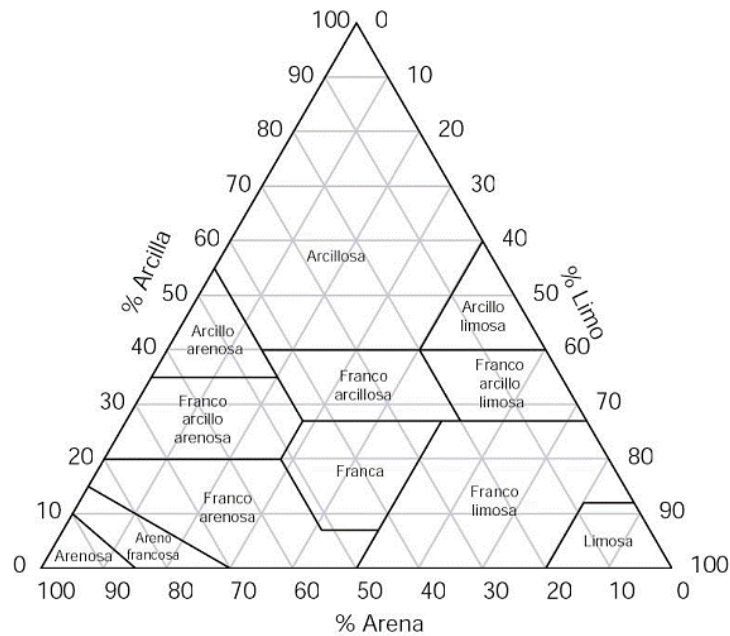


Figura 2.7. Triángulo textural según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA) [45].

La **densidad** se refiere al peso por volumen del suelo y este valor está íntimamente relacionado con la porosidad: un suelo poroso será menos denso que uno poco poroso, además si el suelo tiene un gran contenido de materia orgánica, será menos poroso y por lo tanto, su densidad será menor. Este valor puede dividirse en densidad real y densidad aparente, la densidad aparente se refiere exclusivamente al peso volumétrico o la masa contenida en una unidad de volumen de una muestra de suelo que comprende partículas sólidas y espacios que forman los poros, por lo que la densidad aparente considera los tamaños de partícula y el aire existente tanto en los espacios que forman los poros como en las partículas [46].

La **conductividad eléctrica** (CE) del suelo se define como el valor proporcional a las sales ionizadas y disueltas contenidas en una disolución acuosa; esta propiedad se asocia con las condiciones climáticas y es la cantidad de corriente que pasa a través de la disolución contenida en el suelo, y depende de la viscosidad del medio, del tipo, carga y movilidad de los iones presentes. Si se considera al agua como el medio en que se mueven los iones, a mayor temperatura, la viscosidad disminuirá y por consiguiente, el transporte iónico o conductividad aumentará [24].

#### 2.1.2.2. Propiedades químicas.

Desde el punto de vista agronómico, el suelo es el soporte para las plantas y actúa como una reserva de agua y nutrientes. La química de suelos está dominada por la interacción entre sus componentes sólidos (principalmente los compuestos insolubles de sílice, calcio y aluminio) y su fase acuosa [41].

El **pH** del suelo está relacionado con los protones ( $H^+$ ) retenidos por los coloides del suelo (arcillas, materia orgánica y óxidos) en una escala logarítmica de 0 a 14, cuando el suelo contiene más iones  $H^+$ , se habla de un suelo ácido, cuando hay menor cantidad de  $H^+$  (y más iones  $OH^-$ ), se habla de un suelo alcalino. El pH del suelo se determina en el laboratorio como la medida en suspensiones de suelo en soluciones acuosas o salinas (generalmente  $CaCl_2$  0.1 M o KCl 1 M). El grado de acidez o alcalinidad en el suelo es una propiedad relevante que afecta muchas otras características fisico-químicas o biológicas. Los parámetros de fertilidad de suelo afectados por el pH incluyen la disponibilidad de nutrientes en el suelo, la actividad de microorganismos y puede afectar el nivel de aluminio (Al) intercambiable [39] (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Parámetros de fertilidad del suelo afectados por el pH [39].

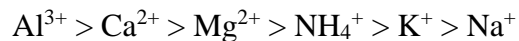
Factor	Efecto
Disponibilidad de elementos minerales para las plantas	Valores de pH bajos aumentan el riesgo de deficiencia de nutrientes básicos (Ca, Mg, K); la solubilidad de compuestos de Mo y P también se ven reducidos. En el caso opuesto, la concentración de Al se incrementa (generalmente en valores de pH menores a 5.5) incrementando su toxicidad. Con valores altos de pH, la solubilidad de muchos metales y elementos traza disminuyen, incluyendo nutrientes esenciales como Fe, Mn, Cu o Zn. La deficiencia de Fe en plantas, conocida como clorosis de Fe, es muy frecuente en suelos básicos (suelos calcáreos).
Propiedades biológicas	Valores extremos de pH disminuyen la actividad microbiana en suelos, lo cual afecta muchos procesos del mismo (por ejemplo, descomposición de materia orgánica, nitrificación, fijación biológica de N <sub>2</sub> en condiciones ácidas del suelo).
Propiedades físicas	Concentraciones bajas de Ca en suelos ácidos se encuentran generalmente relacionadas con la dispersión de coloides intercambio de Al disponible. Esto hace que los suelos ácidos tengan propiedades físicas pobres, incluyendo mala estabilidad estructural o permeabilidad baja.

La **materia orgánica** (MO) del suelo es una de las fuentes de nutrientes para las plantas y está influenciada por el clima, la topografía, el material parental, la vegetación y el tiempo. Estos nutrientes pueden ser liberados para que las plantas los consuman mediante la descomposición por medio de la acción de microorganismos. El humus es materia orgánica altamente descompuesta que contiene sitios de adsorción reactivos o grupos funcionales que retienen cationes en el sistema del suelo. Los nutrientes básicos catiónicos (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) y el amonio pueden ser retenidos como cationes intercambiables debido a adsorción química específica. La capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica es alta incluso comparada con la capa 2:1 de minerales de silicato, y por tanto, contribuye de manera sustancial a la capacidad de intercambio catiónico del suelo. La materia orgánica es el factor dominante para la remoción de pesticidas de una solución de suelo [47]. La materia orgánica puede encontrarse en el suelo formando parte de tres tipos de compuestos (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Compuestos frecuentes de materia orgánica en el suelo [48].

Compuesto	Ejemplo
Formas próximas al carbono elemental	Carbón vegetal, grafito, carbón de hulla.
Residuos biológicos	Residuos de plantas, animales y microorganismos alterados y resistentes (humus).
Residuos orgánicos	Residuos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos.

Los iones intercambiables son aquellos que se absorben de manera pobre por parte de las partículas de suelo y por tanto, pueden ser desplazados de los sitios de sorción por otros iones en la solución, estos iones son esenciales para el mantenimiento de los nutrientes para las plantas en el suelo [49]. La **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** se mide como la cantidad de iones (equivalentes o moles de carga) que pueden ser extraídos mediante una solución catiónica altamente concentrada. Este valor generalmente se encuentra dominado por Ca, Mg, Na, K, Al y otros protones; la selectividad o afinidad relativa de los cationes por las superficies adsorbentes se basa en el tamaño y carga del ion: si el radio hidratado es menor (catión + moléculas de agua que interactúan mediante interacción ion-dipolo), mayor es la afinidad (iones con radios deshidratados pequeños tienen radios hidratados grandes); entre mayor es la valencia, mayor es la preferencia de intercambio por el catión. La escala de afinidad para los cationes dominantes se simplifica como:



La saturación básica se define como el radio de cationes básicos intercambiables (Ca, Mg, K y Na) para la CIC total, que disminuye cuando disminuye el pH en el suelo. El Ca, Mg y K son nutrientes para las plantas, por lo que una saturación de bases se traduce como una mayor reserva de nutrientes que una saturación básica baja para la misma CIC. Una saturación básica baja relacionada con acidez del suelo puede traducirse como una deficiencia de Ca para los cultivos. Para garantizar buenas propiedades físicas del suelo (agregación, estabilidad estructural, buena aireación, buen drenaje) y nutrición para los

cultivos, el nivel de Ca debe ser el catión dominante en el complejo intercambiable (de manera ideal > 50% de CIC); también es deseable que el radio Ca/Mg sea 5-10 y el radio K/Mg de 0.2-0.3 para evitar desórdenes nutricionales (antagonismos) para las plantas que pueda conllevar a una deficiencia de nutrientes promovida por un alto nivel de nutrientes antagonicos [41].

Desde el punto de vista general, la composición elemental de los suelos varía de acuerdo a la naturaleza de la roca madre y los cambios producidos por la meteorización, acumulación de materia orgánica y prácticas de manejo. La **especiación química** se refiere a la distribución de un elemento o compuesto en todas sus formas químicas presentes en las fases sólida, acuosa y gaseosa del suelo, y está controlada por procesos químicos (reacciones) que ocurren en el microambiente del suelo [49]. En este sentido, es importante mencionar que el SiO<sub>2</sub> es el constituyente más abundante en las rocas ígneas y en la mayoría de los suelos, en cambio, las bases Ca, Mg, K y Na presentan porcentajes más bajos en los suelos que en las rocas ígneas debido a su remoción preferencial durante la meteorización [50].

Las fracciones del suelo no son uniformes en composición química, debido a que el cuarzo (SiO<sub>2</sub>) es dominante en la arena y limo y estas dos fracciones son inactivas químicamente, en algunos casos, algunos limos que contienen minerales de potasio, tales como las micas (que abandonan el potasio) pueden abastecer con suficiente rapidez las necesidades de las plantas y finalmente, las arcillas son silicatos aluminicos que pueden tener Fe, Mg, Na, K, entre otros en su estructura y tienen, además, la capacidad de absorber y ceder una serie de iones [28]. Por lo tanto, las arenas que están formadas principalmente por cuarzo tienen menor contenido de nutrientes y la fracción arcillosa contiene mayor cantidad de estos (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Ejemplo de composición química de un suelo (en %) [51].

<b>Fracciones</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>3</sub></b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>
Arena	86.3	5.19	6.77	1.05	0.37	1.02
Limo grueso	81.3	5.19	6.77	1.05	0.37	0.82
Limo fino	64.0	9.42	12.0	1.05	0.32	2.22
Arcilla gruesa	45.1	13.5	21.1	0.96	0.38	2.09
Arcilla fina	30.2	17.1	22.8	0.88	0.08	1.77

### 2.1.2.3. Propiedades biológicas.

El suelo alberga una red compleja de organismos que pueden influir en la evolución y propiedades físicas y químicas específicas, por ejemplo la actividad de lombrices aumenta la tasa de infiltración, la actividad microbiana reduce la materia orgánica mediante el proceso de mineralización [52]. Estas propiedades biológicas (Tabla 2.8) se encuentran interconectadas con otras propiedades físicas y químicas: por ejemplo, la aireación, la materia orgánica y el pH pueden influir sobre muchos microorganismos del suelo, los cuales a su vez pueden influir en actividades de ciclado de nutrientes y carbono, por lo cual, los cambios en propiedades del suelo debidas a manejo pueden afectar significativamente como un aumento en el drenaje del suelo debido a actividad microbiana [41].

Tabla 2.8. Algunas propiedades biológicas del suelo y cómo determinarlas [41].

<b>Propiedad</b>	<b>Forma de determinarla</b>
Tasa de respiración	Evolución de CO <sub>2</sub> bajo condiciones estándar de laboratorio o en campo.
Potencial de mineralización de N o C	Incremento en el contenido de C o N mineral bajo condiciones estándar de laboratorio.
Lombrices	Densidad de lombrices.
Biomasa bacteriana	Biomasa bacteriana total para una masa de suelo determinada.
Diversidad bacteriana	Puede determinarse por grupos funcionales, o describiendo la diversidad genética.
Presencia de patógenos	Mediante diferentes técnicas de patología, a través de cultivos de DNA.

La **rizósfera** es el volumen de suelo que se encuentra alterado por la acción de las raíces de las plantas y es la parte del perfil de suelo donde la concentración de C es apropiada para el

desarrollo de muchos microorganismos, además, los compuestos orgánicos exudados por las raíces de las plantas (que incluyen aniones orgánicos de bajo peso molecular) alteran las propiedades químicas del suelo e incrementan la actividad microbiana comparado con el resto del suelo. La rizósfera es el espacio de interacción de las raíces de las plantas con los microorganismos, los cuales son llamados microorganismos de la rizósfera y estos pueden afectar significativamente la producción de reguladores del crecimiento de las plantas, reduciendo la incidencia de enfermedades de las mismas e incrementando los nutrientes disponibles en el suelo [53].

En resumen, una propiedad física, química o biológica del suelo es aquella que caracteriza al suelo, tal como la composición química y la estructura física que están determinadas por el tipo de material geológico a partir del cual se origina, la cubierta vegetal con la cual está relacionado, el tiempo que han actuado los agentes atmosféricos para su degradación, la topografía, además de los cambios resultantes de las actividades humanas a través del tiempo [39].

Los criterios más importantes para evaluar la calidad del suelo son, en primer lugar, la selección de los parámetros que expresen mejor la calidad de un suelo; segundo, el establecimiento de umbrales de referencia para los indicadores de la calidad del suelo que permitan la identificación de relaciones entre atributos medidos de los suelos y su función que toleren comparaciones válidas a través de las variaciones del clima, tipo de suelo, uso que se le da al mismo y sistemas de gestión; finalmente, el desarrollo de un índice práctico para la evaluación de la calidad de los mismos [54]. Las propiedades básicas de los suelos que integran propiedades físicas, químicas y biológicas, se muestran en la Tabla 2.9.



Tabla 2.9. Resumen de indicadores de calidad físicos, químicos y biológicos (Modificado de [55], [56].)

Parámetro del suelo	Relación entre el estado del suelo y función	Unidad de medida
<b>Parámetros físicos</b>		
Textura	Controla la retención y transporte del agua y nutrientes, retención, asimilación e intercambio de oxígeno.	% arena, arcilla y limos.
Profundidad de enraizamiento del suelo	Influencia en la mayoría de los recursos: agua, oxígeno y nutrientes disponibles para las plantas por unidad de área.	Grosor del suelo (cm).
Densidad aparente	Controla el porcentaje de compactación del suelo. Afecta propiedades y procesos que influyen en el agua y suministro de oxígeno, productividad y erosividad	g cm <sup>-1</sup>
Capacidad de retención de agua	Relaciona la retención de agua, transporte y erosión; agua disponible.	Agua (cm).
Porosidad	Indicador de cambios físicos inducidos por gestión que conducen al desequilibrio en el aire y agua. Retención de agua. Crecimiento de las raíces.	% volumen del suelo.
Estabilidad estructural	Controla los desequilibrios en el aire y agua. Crecimiento de las raíces.	Método de tamiz húmedo.

Tabla 2.9. Resumen de indicadores de calidad físicos, químicos y biológicos (Modificado de [55], [56].) Continuación....

<b>Parámetro del suelo</b>	<b>Relación entre el estado del suelo y función</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>Parámetros químicos</b>		
Materia orgánica	Papel fundamental en estabilidad de agregados, porosidad, reacción con oxígeno intercambiable, agua disponible, reserva en el ciclo de carbono y reposición de nutrientes.	g kg <sup>-1</sup> de C
pH	Define el umbral para la actividad química y biológica. Parámetro de disponibilidad de nutrientes para productividad de plantas y componentes medioambientales.	-
Capacidad de intercambio catiónico	Diferencias en la gestión de nutrientes.	-
Conductividad eléctrica	Define umbrales para la actividad microbiológica y de plantas.	dS/m
P, N, Fe y K intercambiable	Nutrientes disponibles para plantas y potencial de pérdida de nitrógeno; indicador de calidad de productividad y medio ambiente.	-
<b>Parámetros biológicos</b>		
Biomasa microbiana	Potencial catalítico microbiano y reposición de carbono y nitrógeno	Kg de N o C/Ha-30 cm
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y N disponible.	Kg N/Ha – 30 cm/d
Respiración del suelo	Actividad relativa de biomasa microbiana	Medida de actividad microbiana
Actividades enzimáticas	Informa del cambio de calidad en suelos debido a la actividad humana	-

## 2.2. El suelo como medio de crecimiento para las plantas.

Un ecosistema es una unidad de organismos que interactúan entre ellos en determinado espacio y con componentes ambientales abióticos de manera que el flujo de materiales y energía dentro del sistema tiende a permanecer en un equilibrio dinámico (Figura 2.8). Estos pueden estar categorizados como ecosistemas acuáticos y ecosistemas terrestres de manera burda, aunque existen otras clasificaciones que incluyen ecosistema de bosque, ecosistema de pastizal, ecosistema marino, ecosistema lacustre, etc. [57]. El suelo es un componente de todos los ecosistemas terrestres, sin embargo, en sí mismo el suelo es un ecosistema ya que alberga un gran número de organismos que interactúan entre ellos y con el ambiente físico y químico del mismo [46].

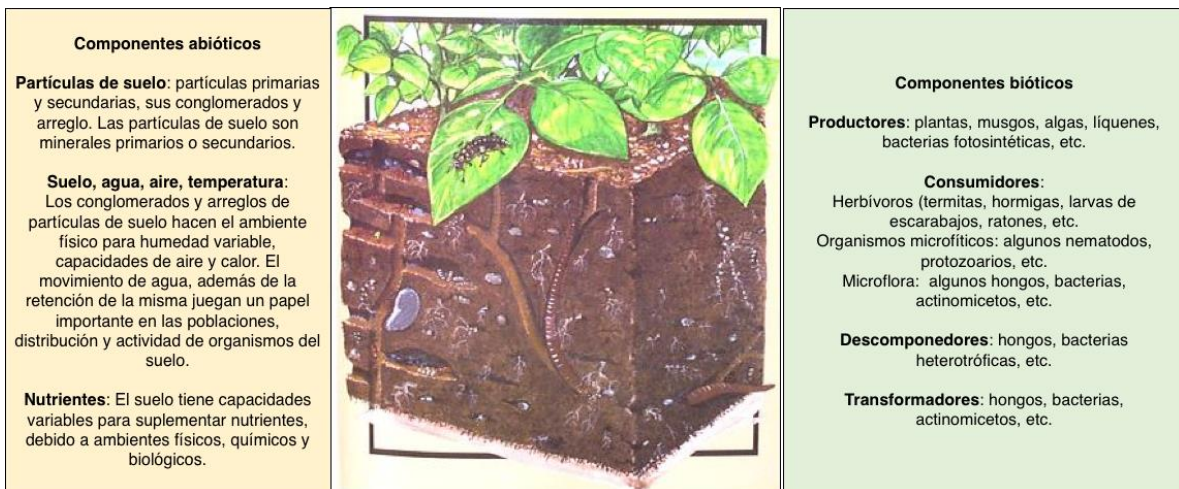


Figura 2.8. Componentes del ecosistema terrestre [58].

El suelo es uno de los factores del crecimiento de las plantas, ya que estas necesitan del suelo como medio de anclaje, fuente de agua, aire, nutrientes y protección contra toxinas en la zona radical para un mejor crecimiento y productividad (Figura 2.9) [59]. Las plantas difieren en cuanto a los requerimientos que necesitan del suelo, de acuerdo a su especie e incluso en algunos casos por su etapa de desarrollo, por ejemplo: *Lantana camara* crece en suelos ácidos y *Casuarina equisetifolia* prefiere suelos salinos. La capacidad de los suelos para suplementar nutrientes en formas asimilables y en cantidades específicas para un

balance adecuado y que prevenga intoxicación, se conoce como fertilidad del suelo. Por otro lado, la capacidad del suelo para generar un rendimiento adecuado bajo condiciones apropiadas de manejo agrícola se conoce como productividad del suelo [60].



Figura 2.9. Componentes ambientales que rodean a los organismos [61].

### 2.3. Las plantas.

Las **plantas** siempre han sido importantes para el humano, ya sea como alimento, como material o por sus propiedades medicinales. El uso de las plantas como alimento incrementó considerablemente con el progreso de la agricultura y con ella se desarrollaron las primeras civilizaciones, las cuales domesticaron la mayoría de las plantas que actualmente se utilizan. El mejoramiento de las técnicas de cultivo se ha acelerado durante el siglo XX, además del uso de híbridos y empleo de fertilizantes para aumentar la producción; a partir de 1970, la tendencia a mejorar las técnicas de cultivo se ha enfocado en cuestiones biotecnológicas en las que se incluyen cultivos celulares, variación somaclonal, rescate de embriones, cultivo de anteras, mutagénesis / selección y selección asistida por marcadores genéticos [62].

Una planta es uno de los numerosos organismos dentro del reino biológico Plantae, que en general se considera de movilidad limitada y son autótrofos. Esta definición incluye organismos como árboles, hierbas, arbustos, pastos, vides, helechos y musgos, que de manera convencional poseen características tales como multicelularidad, estructura celular con paredes que contienen celulosa y se consideran organismos capaces de realizar el proceso fotosintético [63], además de contener compartimentos especializados llenos de

fluidos llamados vacuolas que están delimitados por una membrana llamada tonoplasto y estructuras especializadas llamadas plastidios, los cuales son de especial importancia en el proceso de fotosíntesis, las células vegetales poseen paredes celulares complejas en las cuales hay una pared primaria, una pared secundaria completa o parcial y estas dos están separadas la una de la otra por la laminilla del medio. Las plantas contienen, también, una estructura especializada conocida como cloroplasto que es un organelo plastídico maduro que consiste de siete compartimentos delimitados por membranas, que participan en el transporte fotosintético de electrones (Figura 2.10) [64].

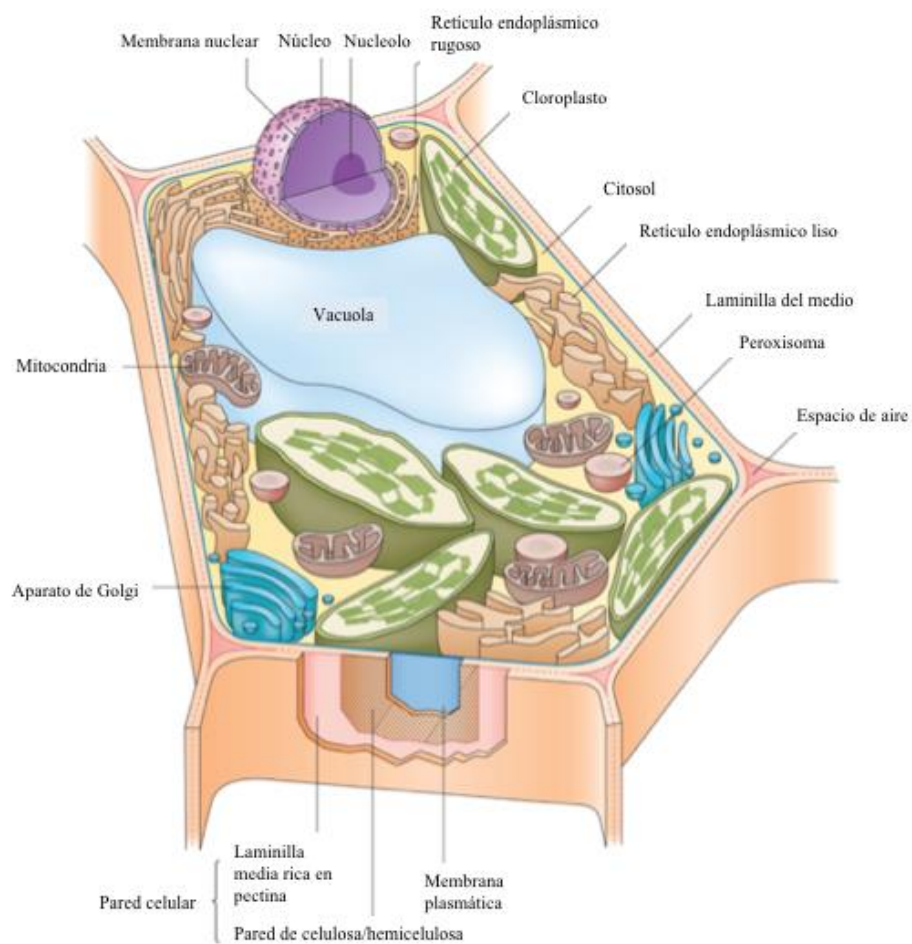


Figura 2.10. Representación esquemática de una célula vegetal (adaptado de [64]).

Las necesidades básicas de las plantas terrestres incluyen dióxido de carbono, agua y luz para llevar a cabo la fotosíntesis. Las plantas necesitan, además, O<sub>2</sub>, iones inorgánicos

como el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, etc.; para conseguir estas necesidades, estos organismos tienen una arquitectura característica (Figura 2.11), en la cual la parte que queda situada sobre el suelo que incluyen el sistema de ramas, el tallo, las hojas, los meristemos apicales y la parte que está insertada en el suelo, entre las que se encuentran las raíces y algunas estructuras especializadas como son bulbos, tumores, entre otros y que son las que la fijan al suelo [65], [66].

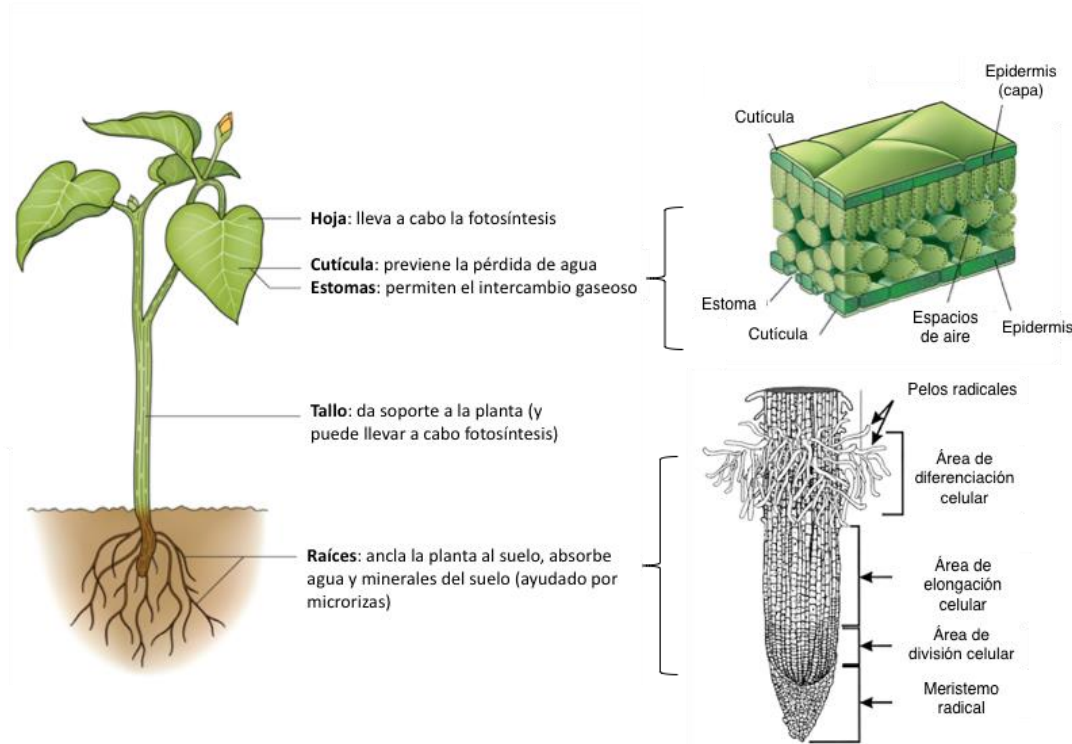


Figura 2.11. Representación esquemática de una planta [64].

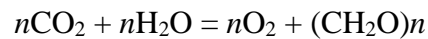
Las plantas son organismos que resultan muy sensibles a los estímulos ambientales, que pueden provocar cambios en fisiología y desarrollo para adaptarse a las condiciones ambientales específicas [67].

### 2.3.1. Procesos de nutrición vegetal.

El desarrollo de las plantas está gobernado por factores tanto ecológicos como ambientales, los cuales incluyen parámetros meteorológicos como la temperatura, la precipitación, la velocidad del viento, la disponibilidad de luz solar; además de factores edafológicos como

cantidad de nutrientes, humedad, textura, grado de compactación del suelo y factores ecológicos que incluyen la competencia por recursos como agua, nutrientes y luz [68].

La mayor parte de la biomasa generada por las plantas deriva de la atmósfera a través de un proceso llamado **fotosíntesis**, en el cual la mayoría de las plantas utilizan la energía proveniente de la luz solar para convertir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), proveniente de la atmósfera, más agua en azúcares simples, su forma general es:



Sin embargo, en el proceso real es necesario poner en consideración un mecanismo más fino que involucra intermediarios químicos, compuestos catalíticos y enzimas (Figura 2.12) [69].

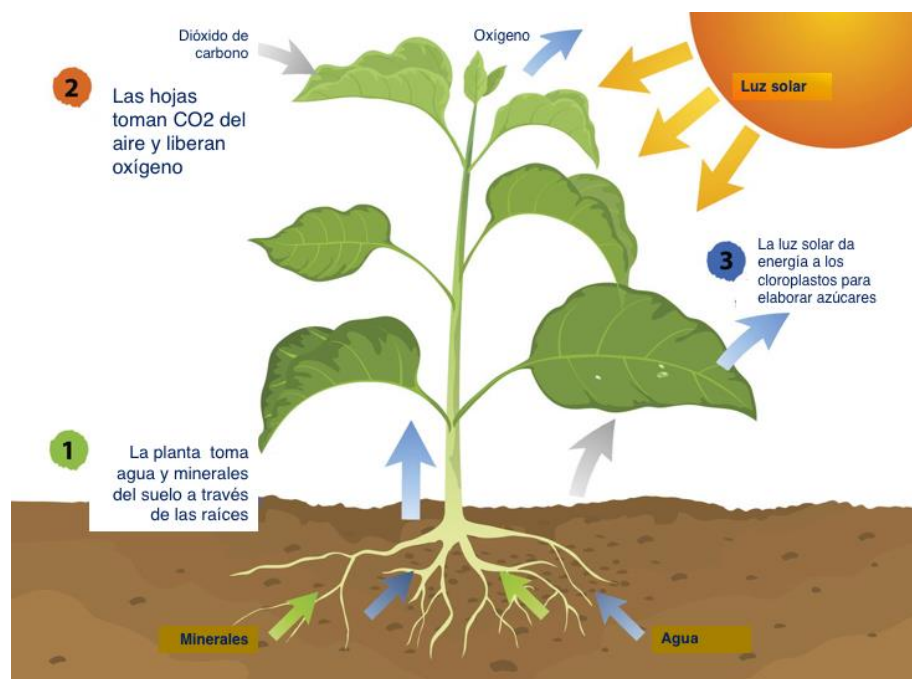


Figura 2.12. Ciclo de la fotosíntesis [68].

A través de la fotosíntesis, las plantas pueden elaborar virtualmente cualquier compuesto que contenga solamente carbono, hidrógeno y oxígeno. Para generar compuestos más complejos se requieren otros elementos, tales como el ADN, que requiere nitrógeno y fósforo, y la elaboración de proteínas que requieren azufre. Aunque existen algunas plantas



que pueden obtener estos elementos directamente del ambiente y no necesitan de un sistema radical (por ejemplo, *Tillandsia*), la mayoría depende totalmente de sus raíces para coleccionar estos nutrientes directamente del suelo [28]. Se han identificado alrededor de 90 elementos presentes en las plantas, pero de estos solo 26 han demostrado ser esenciales [41].

Para este efecto, las **raíces** penetran en niveles más profundos y más amplios del suelo a través de la generación de pelos radicales, los cuales se encuentran en íntimo contacto con las partículas de suelo y estos pelos radicales liberan iones  $H^+$  a través de una bomba ATPasa de protones, la cual tiene varios efectos, principalmente baja el pH en las zonas circundantes a la rizósfera (a alrededor de 5.5) y ajusta el pH del suelo para alcanzar el óptimo para la solubilidad de los iones, además, la presencia de altas concentraciones de iones  $H^+$  favorece el intercambio de estos por cationes minerales como son  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $NH_4^+$  que se encuentran ligados a las partículas de suelo (Figura 2.13). Otro efecto de este proceso es que la presencia de un pH bajo fuera de las raíces permite que los cotransportadores funcionen, bombeando los iones liberados dentro de las células de la raíz. Además, el bombeo de los cationes  $H^+$  fuera de las células de la raíz genera una carga eléctrica negativa dentro de la célula, que favorecerá el movimiento de cationes del suelo a través de la membrana plasmática hacia el interior de la célula [62].

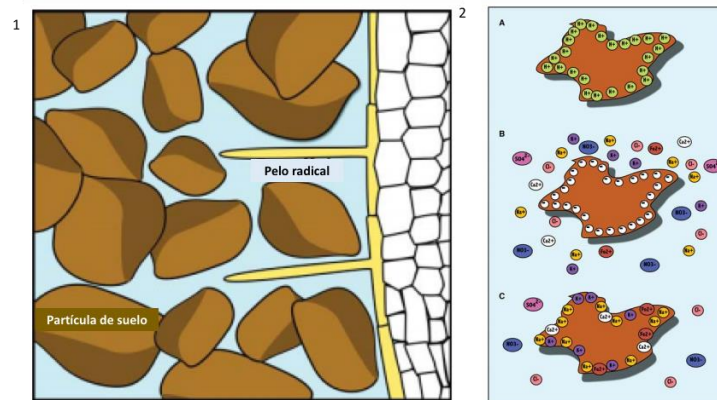


Figura 2.13. Relación entre la raíz y el suelo: (1) Raíces primarias y secundarias y su relación con el suelo; (2) Micelas de suelo. Las arcillas y el humus forman un complejo llamado micela arcilla-humus (A), que puede estar en suspensión con agua en el suelo y adquirir carga negativa (B), permitiendo que otras cargas positivas en el suelo se intercambien (C) [70].



La presencia de la **bomba de protones ATPasa** provee la energía para la mayoría del transporte activo de iones minerales hacia el interior de las células de la raíz, conocido como transporte activo secundario, ya que utiliza la energía asociada con el gradiente de  $H^+$ , más que el relacionado con la hidrólisis de ATP, y, aunque el proceso de hacer que los nutrientes que se encuentran cerca de las raíces es indiscriminado (todos los minerales se ven afectados indiscriminadamente), el control de toma de nutrientes se encuentra regulado por estructuras llamadas transportadores y cotransportadores; la mayoría de los iones tienen transportadores específicos que los llevan a través de la membrana plasmática (Figura 2.14) [71].

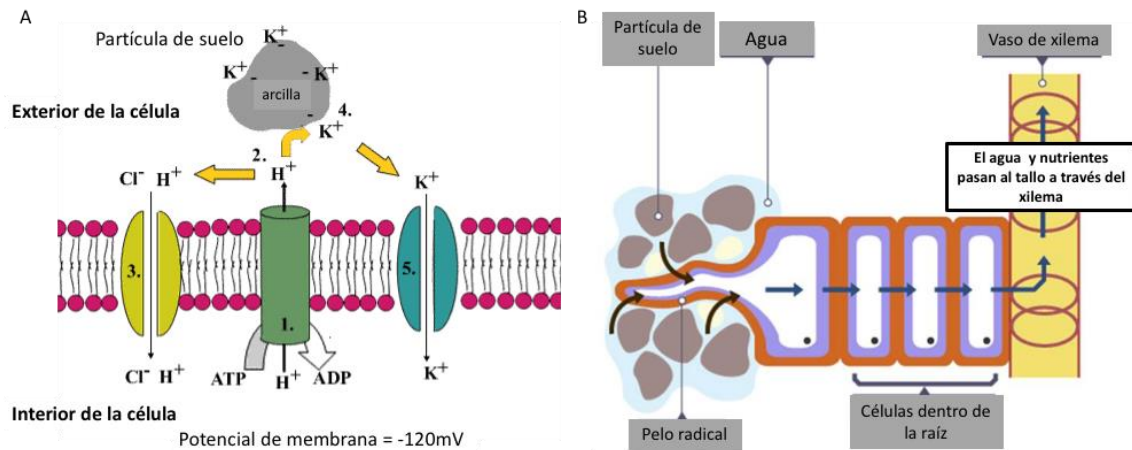


Figura 2.14. Mecanismos de transporte de nutrientes y agua al interior de las células de la raíz: (A) mecanismos en la membrana de células de la raíz y las partículas de suelo y (B) proceso de movimiento de agua y nutrientes entre el suelo y la raíz hasta llegar al xilema [72].

### 2.3.2. El metabolismo de las plantas.

En las plantas, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) entra al interior de las hojas a través de poros llamados **estomas**, el cual se difunde hacia el estroma de los cloroplastos, que es el sitio donde se producen las reacciones del ciclo de Calvin, donde se sintetiza el azúcar, también llamadas independientes de la luz, debido a que no las causa directamente (Figura 2.15). En el **ciclo de Calvin** los átomos de carbono de  $CO_2$  se incorporan a moléculas orgánicas en el estroma de los cloroplastos y se utilizan para formar azúcares de tres carbonos, lo cual es

estimulado por el ATP y el NADPH que provienen directamente de las reacciones dependientes de luz en la membrana tilacoideal [73], [74].

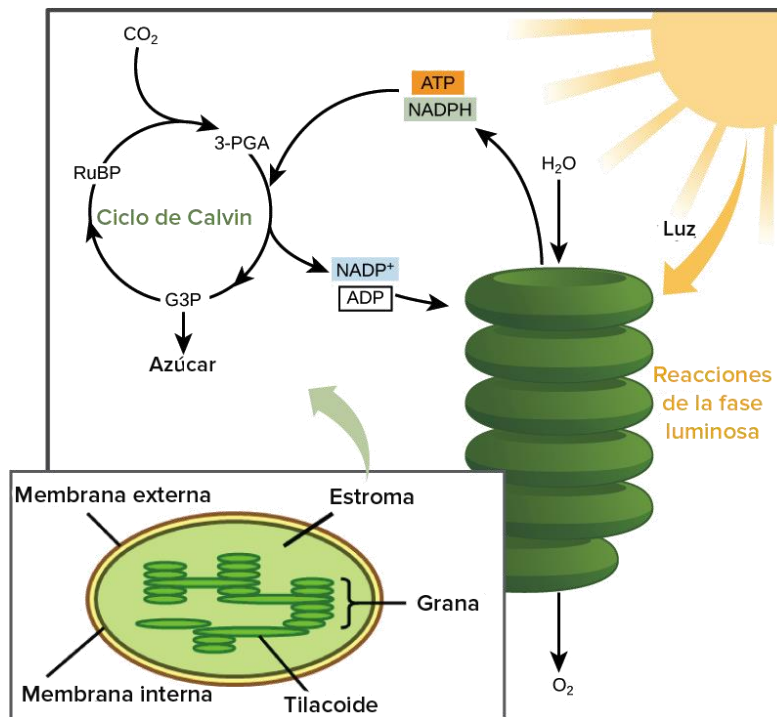


Figura 2.15. Diagrama general del metabolismo de plantas incluyendo las reacciones dependientes e independientes de luz. En el recuadro se muestra un esquema de la anatomía de un tilacoide [75].

La mayor cantidad de carbono orgánico en la tierra es fijado por medio de la enzima ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), la cual funciona tanto como oxigenasa como carboxilasa utilizando tanto  $\text{CO}_2$  como  $\text{O}_2$  dependiendo de la concentración de cada uno de estos; generando, en el caso de la carboxilación, ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA) y mediante la oxigenación 2-fosfoglicolato (2-PG) [76] (Figura 2.16).

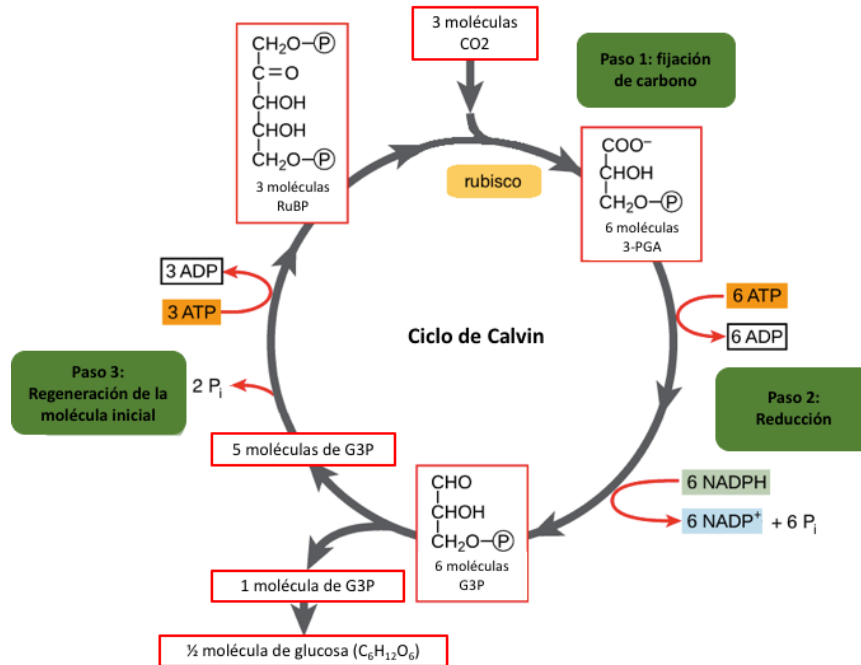


Figura 2.16. Diagrama general del ciclo de Calvin [70].

La **fotorespiración**, que es la ruta usada para regenerar el 2-PG ocurre en los cloroplastos, peroxisomas y mitocondrias y consume ATP y NADPH con una pérdida de  $\text{CO}_2$  para la planta, lo que reduce la eficiencia de fijación de carbono en 30% bajo condiciones secas y calientes [77], lo cual se debe principalmente a que la enzima Rubisco, en el proceso de fijación de carbono en lugar de incorporar  $\text{CO}_2$  a una molécula orgánica durante la primera etapa del ciclo de Calvin utiliza  $\text{O}_2$ , lo cual inicia un proceso que conlleva a la pérdida de carbono fijado en forma de  $\text{CO}_2$  [78]. El proceso de fotorespiración gasta energía y reduce la síntesis de azúcares y dado que la enzima Rubisco tiene mayor afinidad por el  $\text{CO}_2$  en temperaturas bajas con un radio  $\text{CO}_2:\text{O}_2$  alto y mayor afinidad por el  $\text{O}_2$  en temperaturas elevadas con un radio bajo de  $\text{CO}_2:\text{O}_2$ , debido a esto, algunas plantas han desarrollado adaptaciones anatómicas y bioquímicas [77].

Las plantas se adaptan a estas modificaciones ambientales a través de funciones bioquímicas y fisiológicas, por lo cual diferentes tipos de metabolismo fotosintético se han desarrollado en las plantas, como son  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  y el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) [79]. Las plantas  $\text{C}_4$  evolucionaron a partir de las plantas  $\text{C}_3$  en respuesta a la reducción de las concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$  durante el tiempo geológico,

mientras que las plantas CAM realizaron modificaciones para hacer frente a temperaturas elevadas [80].

### 2.3.2.1. Metabolismo $C_3$ .

Las plantas con metabolismo  $C_3$  se caracterizan por no tener adaptaciones fotosintéticas para reducir la fotorespiración. La anatomía básica se muestra en la Figura 2.17. En este tipo de metabolismo, el primer paso del ciclo de Calvin es la fijación de  $CO_2$  por la enzima Rubisco, generando un compuesto de tres carbonos, el gliceraldehído-3-fosfato (3-PGA). Cerca del 85% de las plantas en el planeta llevan a cabo este tipo de metabolismo, incluyendo al arroz, trigo, soya y todos los árboles [81].

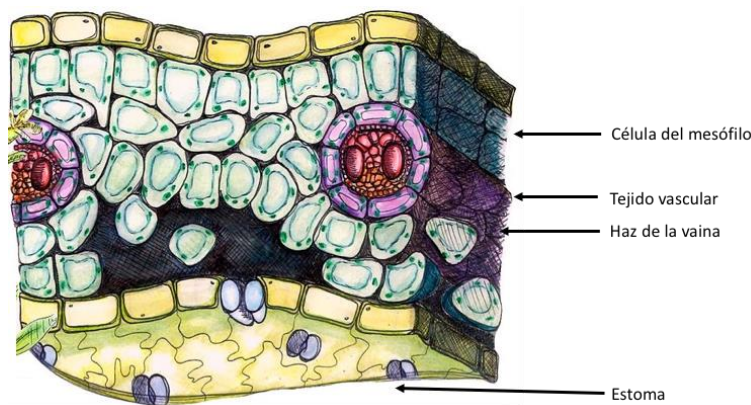


Figura 2.17. Anatomía de la hoja de una planta  $C_3$  (Modificado de [82]).

### 2.3.2.2. Metabolismo $C_4$ o Hatch-Slack.

En las plantas  $C_4$ , el proceso fotosintético y su ruta bioquímica se encuentran relacionados con la anatomía altamente especializada de las hojas, que son características de este tipo de plantas (Figura 2.18). Existen dos tipos de células fotosintéticas en las plantas  $C_4$  que generalmente están arregladas en capas concéntricas con una interfaz común. Por otro lado, las células del mesófilo se localizan justo debajo de la epidermis de las hojas y a un lado de las células del haz de la vaina que forman un anillo de células alrededor de los haces vasculares [83].

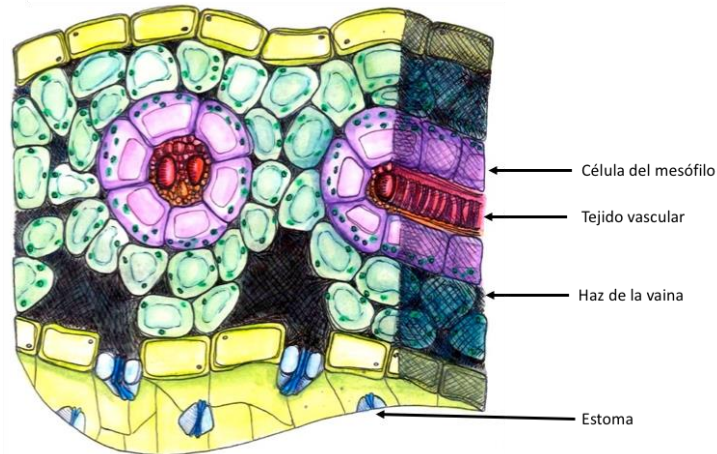


Figura 2.18. Anatomía de la hoja de una planta C<sub>4</sub> (Modificado de [84]).

Las plantas C<sub>4</sub> se caracterizan por tener niveles fotosintéticos elevados, además de un uso eficiente de agua y recursos de nitrógeno, debido a su mecanismo de concentración de CO<sub>2</sub>, pueden reducir su conductancia estomatal y ahorrar agua; incluso pueden utilizar menos enzima Rubisco. Esto les permite ahorrar fuentes de nitrógeno, dado que la enzima trabaja mejor en condiciones elevadas de CO<sub>2</sub> [76].

El ciclo C<sub>4</sub> por sí mismo involucra la fijación inicial de CO<sub>2</sub> en la forma de bicarbonato en las células del mesófilo mediante la enzima fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC), resultando en la producción de un compuesto de cuatro carbonos, oxalacetato, que se convierte en los metabolitos de transporte malato o aspartato, los cuales son transportados a las células del haz de la vaina donde se libera el CO<sub>2</sub> por una descarboxilasa, que puede ser una enzima málica dependiente de NADP, la enzima fosfoenolpiruvato carbocinasa o una combinación de ellas [83], [85], [86]. El piruvato resultante se transfiere de regreso al mesófilo, donde se regenera el fosfoenolpiruvato por la ortofosfato dicinasa; el CO<sub>2</sub> liberado en el haz de la vaina se vuelve a fijar por la Rubisco, que se localiza exclusivamente en las células del haz de la vaina en las plantas C<sub>4</sub> [87].

#### 2.3.2.3. Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM).

Algunas plantas que se encuentran adaptadas a ambientes secos, como los cactus y las piñas, utilizan el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) para minimizar la fotorrespiración, en el cual, en lugar de separar las reacciones dependientes de luz y las de

fijación de  $\text{CO}_2$  del ciclo de Calvin de manera espacial, lo separan de manera temporal, es decir, durante la noche las plantas CAM abren sus estomas, permitiendo el  $\text{CO}_2$  difundir hacia el interior de las células de las hojas, el cual es fijado en oxalacetato por acción de la enzima PEP-carboxilasa, al igual que en las plantas  $\text{C}_4$ , que después es convertido a malato u otro tipo de ácido orgánico [88]. La ruta CAM requiere ATP a través de sus pasos, por lo que al igual que la fotosíntesis  $\text{C}_4$ , requiere de mucha energía. Sin embargo, las especies de plantas que utilizan la ruta CAM no solo evitan la fotorrespiración, sino que también optimizan el uso de agua ya que sus estomas se abren solo durante la noche, cuando la humedad tiende a ser más alta y las temperaturas ambientales más bajas, por lo cual están adaptadas a un clima caliente y seco, como en los desiertos (Figura 2.19) [74].

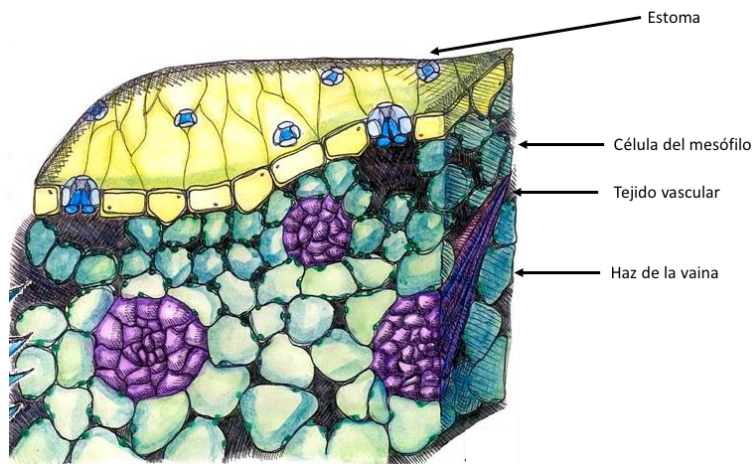


Figura 2.19. Anatomía típica de una planta tipo CAM (Tomado y modificado de [89]).

Por lo tanto, a manera de resumen, en la Figura 2.20 se muestran las principales diferencias entre los tres tipos de metabolismo, señalando las modificaciones anatómicas y los cambios en el proceso de fijación de carbono tanto espaciales ( $\text{C}_4$ ) como espacio - temporales (CAM), así como algunos ejemplos de plantas características para cada uno de estos tipos de rutas metabólicas.



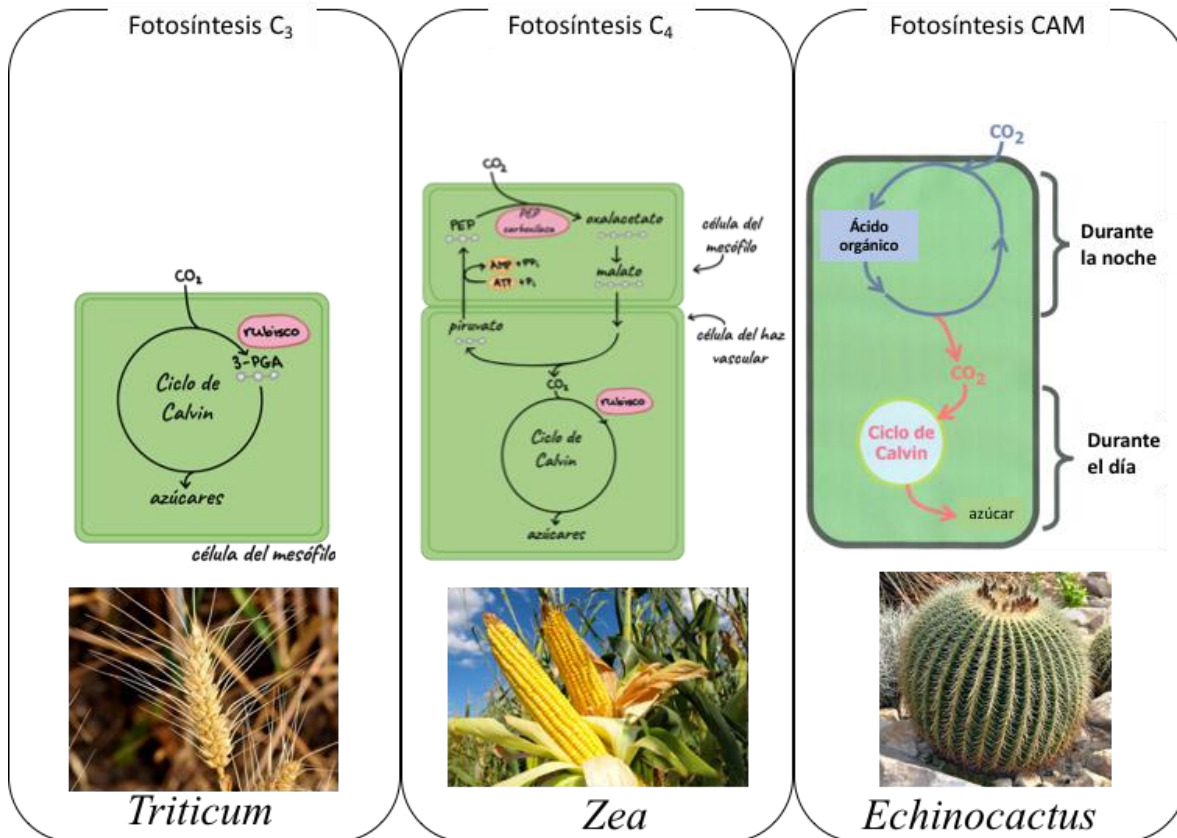


Figura 2.20. Reacciones fotosintéticas en plantas C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM (modificado de [90]).

#### 2.4. Degradación del suelo por actividades industriales y agronómicas.

Para el año 2014, en los países en vía de desarrollo había una población estimada de 5.5 mil millones, gran cantidad de ellos dependen de actividades como la agricultura para satisfacer sus necesidades diarias [91]. Debido a que estas personas tienen recursos limitados y poco acceso a insumos, se requiere un manejo integrado de la calidad del suelo para fortalecer y sostener el medio ambiente en donde viven [92].

La degradación del suelo es un problema mundial agravado en el presente siglo, que se considera especialmente severo en las zonas tropicales y subtropicales, algunos estimados indican que la degradación del suelo ha afectado el 60% de los ecosistemas tropicales entre 1950 y 2010 [93]. Se han reportado que alrededor de 500 millones de hectáreas se

encuentran afectadas en las zonas de los trópicos y, de manera global, cerca del 33% de la superficie de la tierra se encuentra afectada por algún tipo de degradación [94]. Se conoce que la degradación del suelo puede conllevar a otros problemas, como el crecimiento económico, especialmente en los países donde la agricultura es el principal motor de desarrollo [95].

La degradación del suelo, necesariamente implica una alteración a la calidad del suelo, que afecta de igual manera los procesos de los ecosistemas que la presentan. De manera conceptual, existen cuatro tipos de degradación de suelo: (1) física, (2) química, (3) biológica y (4) ecológica (Figura 2.21). Esta degradación en la calidad del suelo generalmente resulta en una reducción de los atributos estructurales que incluyen la geometría y continuidad de los poros, lo cual agrava la susceptibilidad de muchos suelos al encostramiento de la superficie, compactamiento, reducción de la capacidad para infiltrar agua, un incremento en escurrimiento de la superficie, erosión por viento y agua, incrementa la temperatura del suelo e incrementa la propensión a la desertificación [96].

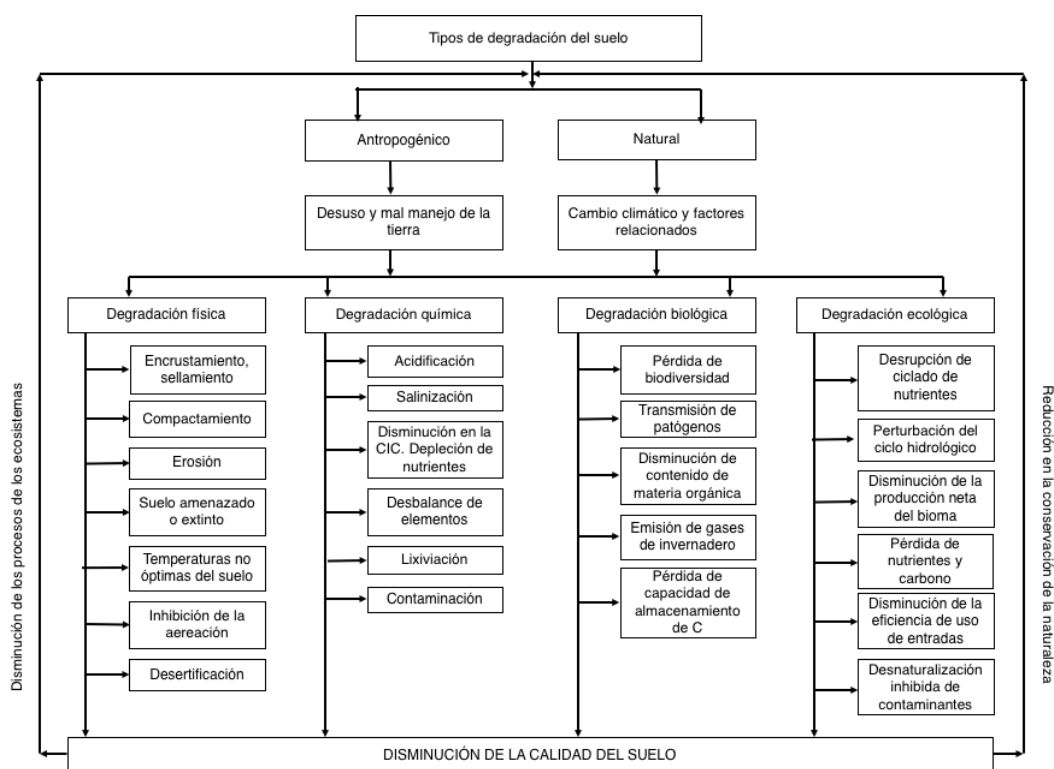


Figura 2.21. Tipos de degradación de suelos (Modificado de [97]).



La degradación del suelo tiene dos componentes principales, que son la pérdida del mismo suelo a través de la erosión y la pérdida de fertilidad del suelo. Ambos componentes conllevan a la disminución progresiva de la productividad agrícola, incrementando los costos de producción, abandono de tierras y posteriormente la desertificación. La principal causa de la degradación de suelos agronómicos es la labranza [97], [98].

La fertilidad de los suelos permite que las cosechas produzcan cerca de los límites impuestos por el ambiente, como son humedad y radiación, mientras el manejo del cultivo sea apropiado y los factores que se encuentran íntimamente relacionados con la fertilidad del suelo son las características físicas, químicas y biológicas. Cualquier afectación a uno de estos factores disminuirá la productividad agrícola [97].

#### 2.4.1. Contaminación de los suelos por hidrocarburos y metales pesados.

Durante las últimas décadas del Siglo XX se ha incrementado el interés por los suelos como un componente ambiental y se reconoce la necesidad de mantener o aumentar sus capacidades que le permitan llevar a cabo sus distintas funciones. De forma similar, se ha confirmado que el suelo no es un recurso inagotable y que, si se usa de manera incorrecta o se maneja erróneamente, sus características se pueden perder en un periodo corto de tiempo, y las tecnologías para su regeneración son limitadas [1], [99].

En este sentido, en la geosfera (la capa terrestre) que corresponde con la parte de la tierra donde habitan los seres humanos y de donde se extraen el máximo de los recursos, se considera muy frágil y vulnerable a afectaciones que se suscitan por estas actividades antropogénicas y de acuerdo con Manahan (10), la definición de contaminante se puede describir como el incremento de las concentraciones de cierta sustancia a niveles más altos de los que ocurriría naturalmente, que surgen de una fuente externa y generalmente se relacionan con la actividad humana.

Predecir la conducta de un compuesto xenobiótico en el suelo resulta muy complicado dada su composición compleja y heterogénea, así, el conocimiento de las características físico-químicas del contaminante y del ambiente donde se depositan es fundamental para entender esta dinámica [100]. Muchos suelos tienen la capacidad de asimilar y neutralizar dichos

contaminantes debido a fenómenos biológicos y químicos que son capaces de atenuar la naturaleza perjudicial de esos contaminantes. Estos procesos incluyen la óxido-reducción, hidrólisis, reacciones ácido-base, precipitación, absorción y degradación bioquímica, que degradan los contaminantes a productos inocuos en el suelo y los metales pueden ser absorbidos, inmovilizados o mineralizados [101].

#### 2.4.1.1. Contaminación por hidrocarburos.

De acuerdo a Leblond [102], se espera que se produzcan 95 millones de barriles de petróleo diariamente para satisfacer las necesidades de la población que tienen necesidad de este producto. El petróleo crudo es una mezcla compleja constituida mayoritariamente por hidrocarburos, compuestos orgánicos sulfurados, nitrógeno y oxígeno [103]. Aunque cerca del 80% de la producción total de petróleo crudo se genera en fuentes continentales, existen pocos estudios relativos al impacto que este tiene sobre el suelo [104].

Los estudios de toxicidad del petróleo han mostrado que algunas especies presentan una sensibilidad más elevada a estos contaminantes. La supervivencia de las lombrices (*Eisenia andrei* y *E. fetida*) y enquitreidos (*Enchytraeus crypticus*) se puede ver reducida en suelos contaminados con petróleo crudo [105], [106]. Por otro lado, la abundancia de Isopoda e Hymenoptera en áreas contaminadas con mezclas complejas derivadas de refinerías puede ser superior comparada con áreas no contaminadas [107].

Dentro de las sustancias que se liberan en el suelo por actividades del hombre y que pueden afectar sus propiedades se encuentran los hidrocarburos, o derivados del petróleo y los metales pesados [108]. En los suelos contaminados con hidrocarburos y sus derivados, algunos contaminantes son más agresivos que otros, como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) e hidrocarburos de petróleo totales (TPH) [109], [110]. Por otra parte, la contaminación con metales pesados se deriva principalmente de las actividades del hombre, generalmente las asociadas con procesos industriales y orígenes naturales, como lo son las erupciones volcánicas [111].

#### 2.4.1.1.1. Tipos de hidrocarburos presentes en los sitios contaminados.

*Hidrocarburos acíclicos saturados.* Llamados también parafínicos, del griego *parum*, pequeño y *affinis*, afinidad. Este tipo de hidrocarburos no reaccionan fácilmente con otros compuestos. Su fórmula general es  $C_nH_{2n+2}$ . Ejemplos de esta serie son el metano ( $CH_4$ ), el etano ( $C_2H_6$ ), y el butano ( $C_4H_{10}$ ), los cuales son los principales componentes de los gases del petróleo [112].

*Hidrocarburos cíclicos saturados o naftalénicos.* Su fórmula general es  $C_nH_{2n}$ . Ejemplos de estos compuestos son el ciclopentano ( $C_5H_{10}$ ) y el ciclohexano ( $C_6H_{12}$ ) [113]. La gran mayoría de estos compuestos tienen una serie de constituyentes de importancia menor y, a semejanza de los isoprenoides, también están formados por precursores específicos, sea de plantas o de animales. Dichos compuestos son empleados como marcadores moleculares y tienen gran uso e importancia en estudios geoquímicos y de comportamiento de derrames [112].

*Hidrocarburos cíclicos no saturados.* Dentro de los derivados de petróleo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), cuya fórmula general es  $C_nH_{2n-6}$  (Donker), tienen un papel importante, ya que, químicamente, son compuestos aromáticos formados por dos o más anillos de benceno, constituidos exclusivamente por átomos de carbono e hidrógeno, dispuestos en una forma lineal, angular o agrupados [114], y son residuos de combustión, refinación de petróleos y otras actividades industriales que involucran temperaturas elevadas [115]. Existen miles de estas sustancias en el ambiente, cada una difiere de la otra por el número y la posición de sus anillos de aromáticos [116], pero sólo 16 sustancias tienen importancia ecológica: acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluorantreno, benzo(gi)perileno, benzo(k)fluorantreno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, fenantreno, fluoranteno, fuoreno, indeno(1,2,3-cd)pireno, naftaleno y pireno (Figura 2.22) [117].

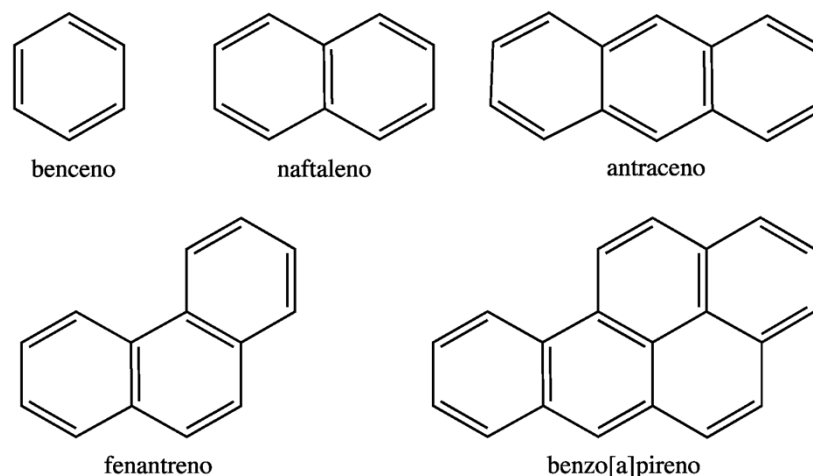


Figura 2.22. Estructura química de algunos de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).

*Hidrocarburos acíclicos no saturados.* Llamados también etilénicos u olefinas ( $C_nH_{2n}$ ), diolefinas ( $C_nH_{2n-2}$ ), acetilénicos ( $C_nH_{2n-2}$ ), además de otros hidrocarburos formados por la combinación de anillos y cadenas que pueden semejarse a varias de las series precedentes [113].

Generalmente estos compuestos se localizan en sitios en los que han ocurrido derrames de petróleo, y no se conoce con exactitud el efecto tóxico o la capacidad de acumulación que tienen estos contaminantes en las fracciones de partículas que constituyen al suelo. En México, los límites máximos de hidrocarburo están reglamentados en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2012, donde se establecen los límites máximos de hidrocarburo en suelo permisibles en un suelo dependiendo de su uso (Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Límites máximos permisibles de hidrocarburo en suelo de acuerdo a la NOM-138-SEMARNAT/SS-2012 [118].

Fracción de hidrocarburos	Uso de suelo predominante ( $mg\ kg^{-1}$ base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1200	1200	5000
Pesada	3000	3000	6000

#### 2.4.1.2. Contaminación por metales pesados.

La presencia de metales pesados en suelos resultan, en primera instancia debido a la meteorización del material madre y por actividades humanas, que incluyen minería, fundición de metales, aplicación de lodos, descarga de aguas residuales, etc [119]. Los suelos contaminados con metales pesados se han convertido en un problema mundial debido a la amenaza que representa para el ambiente [120], causando pérdidas en la producción agrícola y problemas sanitarios peligrosos cuando estos contaminantes entran en la cadena alimenticia [121].

Estos compuestos incluyen un grupo determinado de elementos químicos inorgánicos, siendo los más comunes en los sitios contaminados el plomo (Pb), cromo (Cr), arsénico (As), zinc (Zn), cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg) y níquel (Ni) [122]. El suelo es el principal depósito para los metales pesados liberados en el ambiente y, a diferencia de lo que ocurre con los contaminantes orgánicos que pueden ser oxidados a óxido de carbono (IV) por medio de acción microbiana, la mayoría de los metales no pasan por este proceso [123], y su concentración total en los suelos persiste incluso en tiempos largos después de haber sido introducidos en este [124]. Aun así, cambios en sus especies químicas (especiación) son posibles y se sabe, igualmente, que la presencia de metales tóxicos en el suelo puede inhibir severamente la biodegradación de contaminantes orgánicos (6).

En este sentido, los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre y pueden entrar al organismo a través de la comida, agua potable y aire; aunque en pequeñas cantidades algunos metales pesados son esenciales para mantener el metabolismo del cuerpo humano, cuando hay hiperacumulación se tornan venenosos a medida que se bioacumulan y no pueden ser metabolizados o excretados, entre más alta sea la vida media de estos compuestos, mayor es el riesgo de envenenamiento, incluso si los niveles ambientales de las toxinas son bajos [120].

## 2.5. Técnicas de remediación de suelos contaminados.

La contaminación de suelos y mantos acuíferos se ha convertido en un problema de gran importancia a nivel mundial, especialmente en aquellos lugares donde los orígenes de contaminación no son controlados de manera adecuada, como son actividades industriales, malas prácticas agrícolas y acciones de consumo [125]. Cada año, alrededor de 600 millones de toneladas de desechos sólidos se producen debido a la producción industrial, que continúa creciendo a un ritmo de 10% por año y se estima que alrededor del 64% del total de agua subterránea se encuentra contaminada en las zonas urbanas [126]. La actividad agrícola se encuentra también como uno de los principales factores para la contaminación de suelo y agua debido a que alrededor de 0.8 millones de toneladas de plástico son dejados en el suelo después de haber sido utilizados en varias prácticas agrícolas y 25% del total de nitrógeno proveniente de fertilizantes se libera hacia los mantos acuíferos a través de permeación o escurrimientos, y muchas veces el fertilizante aplicado no se maneja adecuadamente y permanece en los suelos [27].

Las técnicas de remediación juegan un papel fundamental en la recuperación de estos sitios y se refiere al proceso de limpieza de contaminantes para reducir o eliminar la contaminación de suelos o agua subterránea. Incluyen tanto la transferencia de contaminantes de una matriz a otra para tratamiento posterior, confinamiento o destrucción de los contaminantes en la misma zona. Bajo estas alternativas, los principios de las técnicas de remediación se pueden dividir en físicos, químicos y biológicos. Las tecnologías frecuentemente usadas incluyen contención, bombeo y tratamiento, extracción, estabilización/solidificación, lavado de suelo, extracción de aire, precipitación, vitrificación, desorción térmica y biorremediación [127]. Actualmente, existen tecnologías para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y metales pesados, que se utilizan tanto en condiciones *in situ* y *ex situ*.

La remediación física incluye principalmente métodos de reemplazo de suelos y desorción térmica. En el primero se utiliza suelo limpio para reemplazar el suelo contaminado para disminuir las concentraciones de contaminantes, incrementar la capacidad ambiental de los suelos y por tanto, remediarlo [128], [129]; mientras que la desorción térmica se basa en la

volatilidad de los contaminantes mediante el calentamiento del suelo utilizando vapor, microondas, radiación infrarroja, para hacer que el contaminante se volatilice [130].

El segundo tipo de remediación de suelos es la remediación química, que incluye la lixiviación química, en la cual se lava el suelo contaminado utilizando agua fresca, reactivos u otros fluidos o gases [131], [132] que puedan filtrar los contaminantes del suelo. La fijación química se refiere a la adición de reactivos o materiales en el suelo contaminado para convertirlos a una forma insoluble o de difícil remoción y menos tóxica, lo cual disminuye la migración de metales y otros contaminantes al agua [133]. La remediación electrocinética o electro-remediación es una tecnología novedosa [134] que se basa en la aplicación de voltaje en dos lados del suelo mediante el empleo de electrodos para formar un gradiente eléctrico, y que el contaminante sea arrastrado hacia uno de los electrodos mediante procesos electrocinéticos [135], [136]. Finalmente, la tecnología de vitrificación se refiere al calentamiento del suelo a temperaturas de 1400-2000 °C, para que la materia se volatilice o descomponga [137].

El tercer grupo de tecnologías de remediación es la remediación biológica, la cual incluye la fitoremediación, la bioremediación y remediación combinada de estos dos procesos. La fitoremediación se refiere al uso de plantas verdes para fijar, absorber, limpiar o reducir la toxicidad de contaminantes. En este existen diferentes tipos, pero los tres principales son la fitoestabilización, la fitovolatilización y la fitoextracción [138]. La remediación biológica se basa en la capacidad de los microorganismos para degradar o destruir los contaminantes, ya sea afectando la migración o transformación a través de modificaciones de sus características físicas o químicas, lo que incluye acomplejamiento extracelular, precipitación, óxido-reducción, acumulación y reactividad intracelular [139]. Un tipo más de bioremediación es la remediación animal, que se refiere a la utilización de animales para absorber, degradar, favorecer la migración y remover los contaminantes, estos animales pueden ser organismos como las lombrices, las cuales han demostrado efectivamente ayudar a remover concentraciones altas de plomo [140].

En la Tabla 2.11 se muestran las ventajas y desventajas en el uso de algunas tecnologías de remediación de suelos contaminados [109], [141].

Tabla 2.11. Ventajas y desventajas en el uso de diferentes técnicas de remediación de suelos contaminados con compuestos de petróleo y metales pesados [101].

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Solidificación / estabilización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño simple.</li> <li>• Económico.</li> <li>• Se pueden tratar grandes volúmenes de suelo.</li> <li>• Muy recomendable para metales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No promueve el tratamiento del contaminante, solo su inmovilización.</li> <li>• Es de corta vida.</li> <li>• Depende de las características del suelo y la homogeneidad de la mezcla.</li> <li>• Los procesos se obstaculizan por la profundidad de la contaminación.</li> </ul>
Procesos de oxidación avanzada (AOP).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económico.</li> <li>• Tiene capacidad de mineralización.</li> <li>• Recomendado para suelos con permeabilidad alta.</li> <li>• Se pueden utilizar diferentes reactivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hay transferencia de masa de la fase absorbida a la fase acuosa.</li> <li>• Existe riesgo de contaminación de los acuíferos por los solventes no recuperados.</li> <li>• Limitaciones aplicación en escalas grandes (tratamiento <i>ex situ</i>).</li> <li>• El uso de ácidos fuertes causa la destrucción de la estructura básica del suelo.</li> </ul>
Desorción térmica o extracción con CO <sub>2</sub> supercrítico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia cuando se usa para compuestos volátiles.</li> <li>• La aireación del suelo facilita el proceso de bioremediación.</li> <li>• Es un proceso rápido.</li> <li>• Tiene bajo impacto ambiental.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia reducida para suelos con permeabilidad baja.</li> <li>• No se recomienda en áreas saturadas.</li> <li>• Se requiere un tratamiento para los vapores liberados.</li> </ul>
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia.</li> <li>• Proceso rápido.</li> <li>• Los compuestos se mineralizan.</li> <li>• Puede ser utilizada donde otras tecnologías no sean efectivas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo es elevado.</li> <li>• Se liberan compuestos secundarios a la atmósfera.</li> <li>• Se requiere monitoreo riguroso y periódico.</li> <li>• El tratamiento <i>in-situ</i> no es posible.</li> </ul>
Adsorción con arcillas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económico.</li> <li>• Diseño simple.</li> <li>• Puede ser utilizado con otras tecnologías.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se requiere un intercambio de suelo.</li> <li>• Está limitado por la capacidad tampón del suelo.</li> <li>• Hay selectividad por iones específicos.</li> </ul>
Electrocínético	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia.</li> <li>• Se puede realizar tratamiento <i>in situ</i>.</li> <li>• Se puede combinar con técnicas de bioremediación, como fitoremediación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El tratamiento depende de la distancia entre los electrodos.</li> <li>• El pH cambia en las áreas cercanas al electrodo.</li> <li>• El costo depende de la concentración del contaminante en el suelo.</li> <li>• Es menos efectivo en suelos con baja permeabilidad.</li> </ul>



A continuación, se presentan las principales técnicas para el mejoramiento de suelos tanto limpios como contaminados, los cuales intentan recuperar las características originales antes de ser perturbados o mejorar su productividad.

### 2.5.1. Fitorremediación de suelos contaminados.

Distintas plantas han sido propuestas para ser utilizadas en procesos de remediación, las cuales son elegidas por sus propiedades para estabilizar o extraer contaminantes del suelo y que generalmente presentan una etapa corta de desarrollo, resistencia alta a plagas y patógenos, desarrollo elevado de raíces, alta producción de biomasa en las partes aéreas de la planta, alta tolerancia a presencia de metales o metaloides en el suelo, y que se adapten de manera exitosa a ambientes difíciles. La fitorremediación (FR) se puede definir como un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas. Existen cinco métodos diferentes de fitorremediación que se agrupan en dos conjuntos: los que se utilizan como medio de contención (fitoestimulación y fitoestabilización) y los que se utilizan como medio de eliminación (fitodegradación, fitovolatilización y fitoextracción), dependiendo del contaminante y su concentración, además del medio en que se encuentre dicho contaminante (Figura 2.23) [142]–[145].

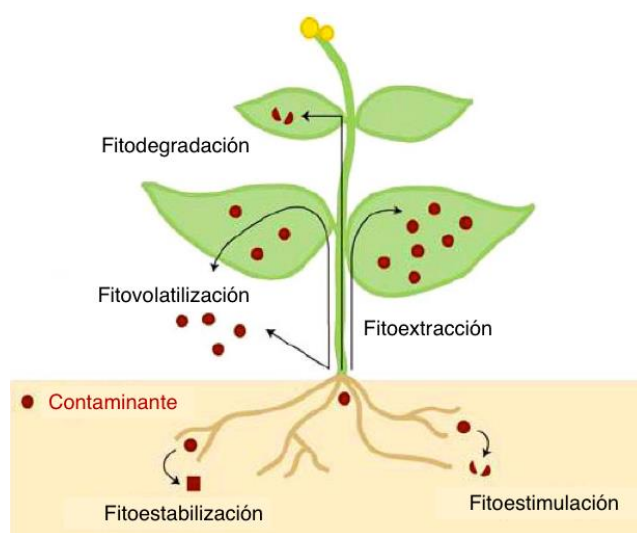


Figura 2.23. Representación de los procesos involucrados en la fitorremediación [146].

La **fitoestabilización** permite inmovilizar en el suelo los contaminantes a través de su absorción y acumulación en las raíces de las plantas utilizadas o por precipitación en la zona de la rizósfera; la **fitoextracción**, que es también conocido como fitoacumulación, consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas; la **fitovolatilización** se utiliza para la eliminación de contaminantes del medio hídrico a través de los tejidos de las plantas; en la **fitodegradación**, las plantas y los microorganismos que se encuentran asociados a ellas degradan los contaminantes en productos inofensivos y, finalmente, la **fitoestimulación** utiliza las raíces de las plantas para que estimulen a los microorganismos presentes en la zona de la rizósfera para que degraden los contaminantes [147].

El tiempo que tarda en hacer efecto la FR depende de los factores de cada sitio, la clase de contaminante, la concentración, el método de fitoremediación y el tipo de planta que se utilice. La FR es una tecnología de remediación de suelos y agua contaminados que resulta económica y ambientalmente amigable, ya que promueve la conservación de las propiedades del agua y el suelo además de incrementar la actividad microbiana, y aunque se ha probado que es eficaz en casos donde la extensión contaminada es grande, funciona mejor en ambientes donde hay baja concentración de contaminantes. Esta tecnología tiene serias limitaciones entre las que se encuentran el periodo de remediación, las condiciones climáticas, la cantidad y profundidad a que llegan las raíces, la producción de biomasa y la naturaleza y variedad de contaminantes que existan en el terreno contaminado [148]. Se han realizado distintos experimentos utilizando diferentes plantas para evaluar la efectividad de esta tecnología (Tabla 2.12).

Tabla 2.12. Algunos estudios de fitoremediación en suelos con contaminantes mixtos (Tomado de [149]).

Planta	Contaminantes
<i>Lolium</i>	Cu, Zn y 2,4-diclorofenol
<i>Lolium perenne</i> y <i>Raphanus sativus</i>	Cu y pentaclorofenol
<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Populus deltoides</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>L. perenne</i> , <i>Trifolium repens</i>	Contaminantes orgánicos y metálicos provenientes de actividades de mantenimiento de autobuses
<i>Alyssium lesbiacum</i>	Ni, fenantreno y criseno
<i>Echinochloa crus-galii</i> , <i>Helianthus annuus</i> , <i>Abutilon avicennae</i> y <i>Aeschynomene indica</i>	Cd, Pb y 2,4,6-trinitrotolueno
<i>Brassica juncea</i> y <i>Festuca arundinacea</i>	Zn y pireno
<i>Triticum aestivum</i>	Zn, Cu, Mn, ácido 2,4-diclorofenoxiacético y ácido 4-cloro-2-metilfenoxiacético
<i>Zea mays</i>	Cd y pireno
<i>Lupinus luteus</i>	Ni y tricloroetileno
<i>L. luteus</i>	Ni y tolueno
<i>Ricinus communis</i>	Cd y diclorodifeniltricloroetano (DDT)

Tabla 2.12. (Continuación).

Planta	Contaminante
<i>Tagetes patula</i>	Cd, Cu, Pb y benzo(a)pireno
<i>Medicago sativa</i>	Cd y tricloroetileno
<i>B. juncea</i>	Cd, Pb y aceite de motor usado
<i>Elsholtzia splendens, Houlttuynia cordata, M. sativa y Sedum plumbizincicola</i>	Cd, Cu y bifenilos policlorados
<i>Sedum alfredii</i>	Cd y DDT
<i>Solanum lycopersicum</i>	Cd y fenantreno
<i>T. patula</i>	Cd y benzo(a)pireno
<i>B. juncea</i>	Cu y pireno
<i>M. sativa</i>	Cr y benzo(a)pireno
<i>Z. mays</i>	Cd y pentaclorofenol
<i>M. sativa</i>	Cd y tricloroetileno
<i>Phragmites australis</i>	Cd y pentaclorofenol
<i>S. alfredii y F. arundinacea</i>	Cd, Pb, Zn y éter decabromodifenil

### 2.5.2. Electroremediación de suelos contaminados.

La electro-remediación (E-R), o remediación electro-cinética (REC) es una tecnología que involucra la utilización de campos eléctricos de baja intensidad para remover contaminantes mediante los procesos que ocurren en el suelo (Figura 2.24), a saber, la electro-ósmosis, la electro-migración y la electroforesis [150]. La aplicación de corriente eléctrica tiene varios efectos en el suelo: primero, produce un frente ácido en la zona anódica que se transporta a través del suelo y elimina contaminantes de la superficie; segundo, se inicia el proceso conocido como **electro-migración** de iones presentes en el suelo hacia el electrodo de carga opuesta, y tercero, establece una diferencia de potencial eléctrico que puede conllevar a un proceso de **electro-osmosis** generando el flujo de diversas especies. Además, de la **electro-foresis** que se define como el flujo de masa de partículas, bacterias o coloides presentes en el suelo cargadas, debido a la imposición de un campo eléctrico [151].

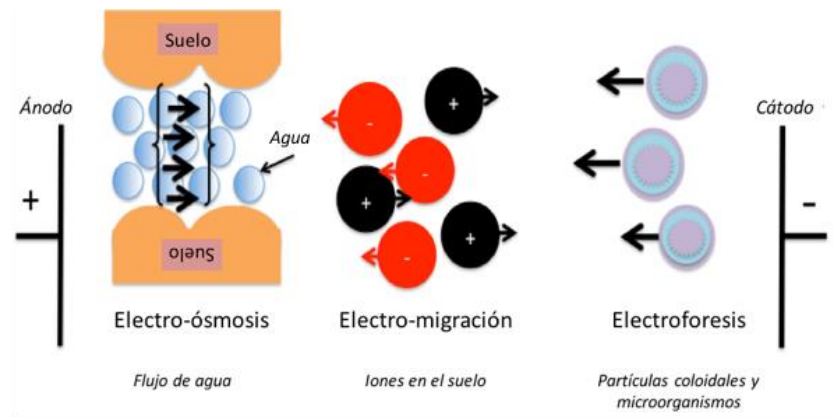


Figura 2.24. Representación esquemática de los procesos electro-cinéticos durante la imposición de un campo eléctrico en el suelo.

Otros fenómenos de transporte de masa que ocurren durante el proceso de ER son la difusión, que es el movimiento de las especies químicas debido a los gradientes de concentración y la advección generada por gradientes hidráulicos [135]. En la Tabla 2.13 se

muestran algunos estudios de electro-remediación de suelos, así como el juego de electrodos empleado, el potencial aplicado, el porcentaje de remoción alcanzado y el tiempo de aplicación.

Tabla 2.13. Diferentes estudios para la electro-remediación de contaminantes [152].

Contaminante	Electrodos utilizados	Potencial (V)	Remoción (%)	Tiempo
HAPs y fenol	Pt y Ti	NR	NR	NR
Hexaclorobenceno, fluorantreno, fenantreno y hexano	Ti	1.5 V/cm	NR	10 días
Cadmio	Mallas de Ti/Ru	20 V	99	Diferentes tiempos
Hidrocarburos	Ánodo: IrO <sub>2</sub> -Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  Ti y cátodo Ti	20 V	95	4 horas

### 2.5.3. Electro-fitoremediación de suelos contaminados.

La combinación de la fitoremediación y la electro-remediación ha dado una alternativa donde se plantea que como consecuencia de la fuerza motriz producida por el paso de corriente eléctrica, los contaminantes pueden migrar a través del suelo, de ánodo a cátodo o de cátodo a ánodo dependiendo del tipo de contaminante, y esto puede facilitar la absorción de contaminantes por las plantas [153].

Por tanto, la electro-fitoremediación (EFR) se refiere a la técnica en la cual se utiliza la electricidad en campos eléctricos de baja intensidad, ya sea mediante corriente directa (CD), corriente alterna (CA) (Figura 2.25) o mediante CD con inversión de polaridad (CD-IP) para movilizar o degradar contaminantes en el suelo, Esta técnica se ha analizado con diferentes arreglos de electrodos y de soluciones coadyuvantes [154], las cuales son soluciones que actúan disolviendo los contaminantes o que forman complejos solubles para

ayudar a su remoción, y evaluadas en distintos trabajos utilizando diferentes contaminantes [155], [156].

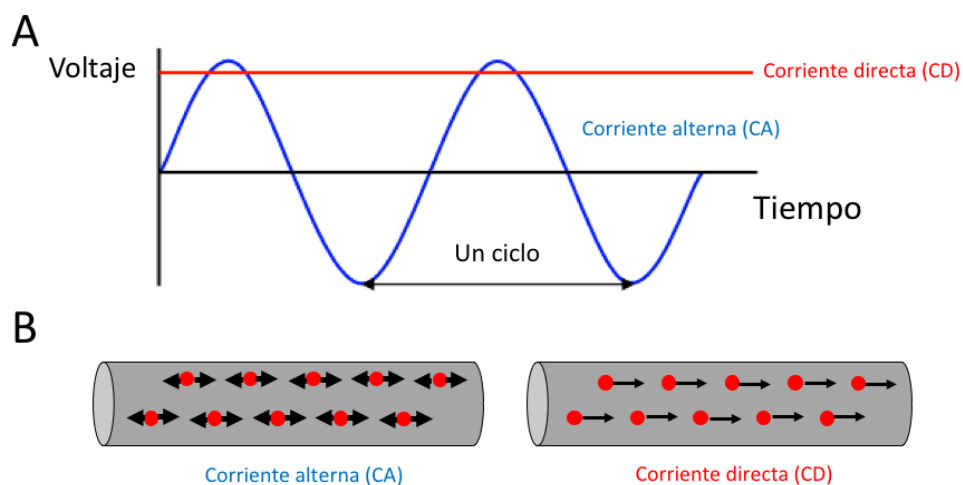


Figura 2.25. Diferencias entre corriente alterna y corriente directa: (A) Comportamiento de voltaje contra tiempo, y (B) Comportamiento de los electrones bajo la influencia de corriente alterna y corriente directa.

El uso de maíz para realizar estudios de fitoremediación de hidrocarburos ha sido abordado por distintos autores. Liao y colaboradores [157] evaluaron el crecimiento y respuestas bioquímicas de plantas de maíz creciendo en suelo contaminado con petróleo crudo, así como la acumulación de estos en los tejidos de la planta, encontrando que las plantas de maíz crecen apropiadamente en suelos contaminados con bajas concentraciones de petróleo crudo ( $< 147 \text{ mg/Kg}$ ) e incluso incrementan el desarrollo de las plantas, mientras que concentraciones superiores a este valor no tienen efecto inhibitorio en su desarrollo, aunque tampoco se encontró que se potenciara su crecimiento, y cuando analizaron el tejido vegetal no encontraron acumulación en ningún tejido evaluado de la planta, aunque hubo una disminución de la concentración de hidrocarburos en el suelo. En otro juego de experimentos realizados por Zhang y colaboradores en el 2009 [126], donde se evaluó el uso de maíz para la remediación de suelos contaminados con pireno y cadmio se encontró que el maíz puede remover de un 12 a un 27% del cadmio en el suelo y un 21-31% de

pireno, por lo que la planta puede ser candidato para la remediación tanto de metales pesados como de hidrocarburos.

En la Tabla 2.14 se muestran algunos estudios representativos en los que se utilizan plantas de la familia Poaceae y Brassicaceae para remediar suelos y aguas contaminados con metales pesados, el contaminante removido, el período de tratamiento, el voltaje o intensidad aplicada y si se utilizó algún coadyuvante para facilitar la degradación del contaminante en cuestión.



Tabla 2.14. Algunos estudios de electro-fitoremediación para suelos contaminados con metales pesados [150].

Planta	Contaminante	Período de tratamiento	Coadyuvante	Tiempo de aplicación	Voltaje/Intensidad
<i>Lolium</i> (Poaceae)	Cu, Cd, As	98 días	Ninguno	CD continua 5 días después de la germinación	CD:30V
Mostaza índica	Pb	12 semanas	EDTA	EDTA y corriente después de 12 semanas de tratamiento	CD: 0-40V
<i>Lolium</i> (Poaceae)	Cu, Zn	50 días	EDTA, EDDS	Adició después de 42 días de corriente eléctrica (6 horas diarias por 7 días)	CD: 10 A m <sup>-2</sup>
Papa	Zn, Pb, Cu, Cd	Apagado: 35 días; prendido: 16 días	Ninguno	CD o CA directa 30 días después de sembrar	CD y CA: 500 mA
Lechuga	Cd	60 días	Ninguno	Cultivo hidropónico, solución de nutrientes + Cd; CA	C: 1 V/cm <sup>-1</sup> , 10 o 50 Hz
Mostaza índica	Cd, Cu, Pb, Zn	Apagado: 35 días; encendido: 16 días	Ninguno	CD continua 8 h diarias por 16 días	CD: 0. 1. 2 y 4 V cm <sup>-1</sup>
Tabaco y colza (canola)	Cd, Zn y Pb	Canola: 90 días; tabaco: 180 días	Ninguno	30 días para la canola, 90 días para el tabaco	CD: 1 V cm <sup>-1</sup> cambiando la polaridad cada 3 h
Pasto Kentucky Bluegrass	Pb	-	Ninguno	Se pre-cultivarón las plantas con CD, 15 días.	CD: 500 mA

## 2.6. Técnicas de mejoramiento de suelo para actividades agrícolas.

Según la FAO [158], la agricultura en el siglo XXI se enfrenta a más retos entre los que se encuentra la necesidad de producir más alimentos a fin de alimentar a una población creciente con una mano de obra menor, producir más materias primas para un mercado de la bioenergía que será potencialmente enorme, contribuir al desarrollo de los numerosos países en desarrollo dependientes de la agricultura y adoptar métodos de producción más eficaces y sostenibles, que permitan adaptarse al cambio climático. Ya que se prevé que la población mundial aumente en más de un tercio, o 2300 millones de personas, entre 2009 y 2050 y se prevé que casi todo este crecimiento tenga lugar en los países en desarrollo (Figura 2.26).

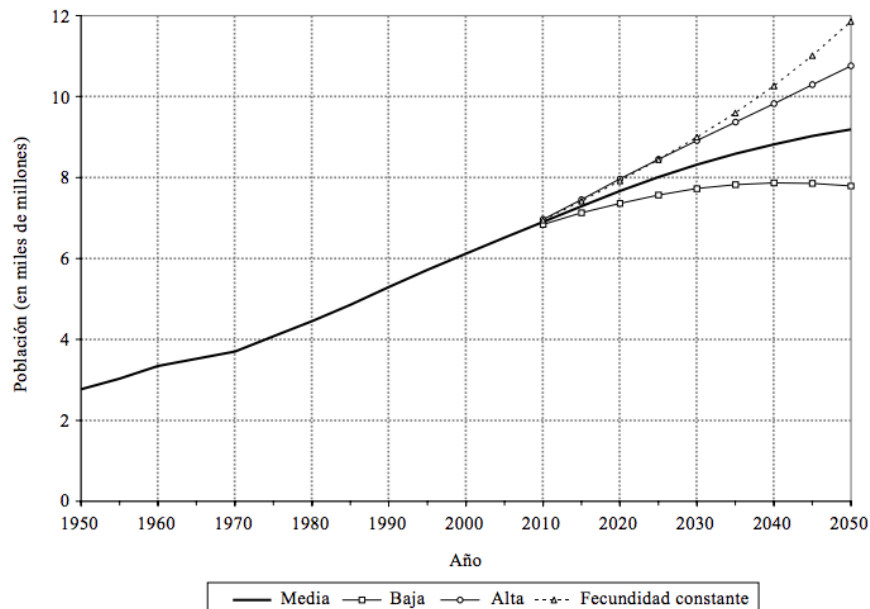


Figura 2.26. Población mundial, de 1950 a 2050, por variante de proyección [159].

Las proyecciones muestran que para alimentar una población mundial de 9100 millones de personas en 2050, será necesario aumentar la producción de alimentos en un 70% entre 2005 y 2050, por lo que la producción agrícola en países en desarrollo casi tendría que

duplicarse y esto implicaría un aumento importante en la producción de varios productos básicos fundamentales como la producción anual de cereales, que tendría que aumentarse en casi mil millones de toneladas [158].

La agricultura contribuye al desarrollo en su calidad de actividad económica, como medio de subsistencia y como proveedora de servicios ambientales, ya que crea oportunidades de inversión para el sector privado e impulsa en gran medida las industrias relacionadas con la agricultura y la economía rural no agrícola, además, dos tercios del valor agregado de la agricultura se genera en los países en desarrollo donde es responsable, en promedio, del 29% del producto interno bruto (PIB) y emplea al 65% de la fuerza laboral [160].

El rendimiento de los cultivos ya sea vegetativo o reproductivo depende en gran medida en el acceso a un suministro adecuado de nutrientes minerales esenciales, por lo cual el uso de fertilizantes y pesticidas para lograr este objetivo es una práctica común en las actividades agrícolas, aunque los efectos nocivos sobre el ambiente y la salud humana de estos son bien conocidos [39]. Es por esto que en los últimos años se han generado alternativas para mejorar la calidad de los cultivos consumidos por el hombre entre los que destacan los organismos genéticamente modificados, aunque esta tecnología tiene poca aceptación entre la población debido al poco entendimiento de sus fundamentos y los problemas socio-culturales y ecológicos que representa [161]. Existen otras alternativas biotecnológicas como cultivo *in vitro*, hidroponía, cultivo agroecológico que se han implementado para aumentar la producción de hortalizas, pero estas tecnologías suelen ser costosas, requieren de transferencia de las plantas entre distintas matrices, lo cual disminuye la viabilidad de los cultivos debido al estrés al que son sometidas y esto conduce a la necesidad de evaluar tecnologías alternativas que permitan que las plantas aumenten su productividad [60], [97], [162].

#### 2.6.1. La técnica de electro-cultivo.

Los factores ambientales como temperatura, humedad en el aire, nivel de humedad en el suelo y radiación solar pueden influir directamente en el desarrollo de las plantas ya que una de las propiedades fundamentales de los organismos vivos es su capacidad para

colectar información del ambiente en el que se desarrollan y expresan procesos fisiológicos para mantener la homeostasis [163]. Se conoce además, que la aplicación de energía eléctrica, magnetismo, luz monocromática y sonido también pueden estimular el crecimiento de las plantas. Existen diversos estudios enfocados en los efectos causados por la imposición de campos eléctricos en las plantas, y algunas de las respuestas funcionales se encuentran bien determinadas [164] (Figura 2.27).

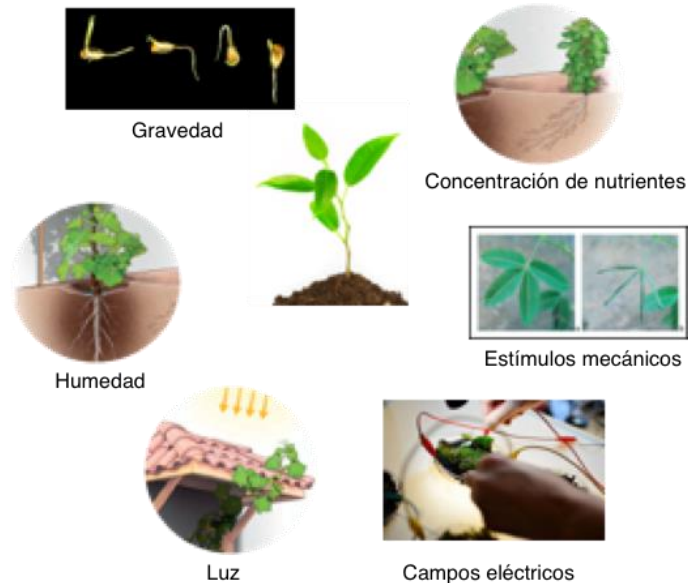


Figura 2.27. Las plantas pueden responder a distintos estímulos entre los que se encuentran la gravedad, la luz, la humedad, la concentración de nutrientes y otros como la energía eléctrica [163].

La propagación de plantas es el juego de técnicas que incluyen distintos métodos para asegurar la conservación de la biodiversidad o incrementar las poblaciones vegetales y sus objetivos son la multiplicación del número de individuos de una especie y actualmente las tecnologías convencionales para propagar plantas incluyen el cultivo de tejidos *in vitro*, la germinación *in vitro*, la reproducción vegetativa, o mediante la germinación de semillas [165]. Aunque estas tecnologías resultan ser muy útiles, cuentan con distintas problemáticas entre las que destaca la supervivencia de las plantas cuando estas tienen que ser cambiadas de un medio de cultivo temporal a uno definitivo.

La tecnología que utiliza la aplicación de campos eléctricos en el suelo para mejorar la eficiencia de la germinación y desarrollo de plantas es conocida como electro-cultivo o electro-farming, que se define como cualquiera y todas las aplicaciones de la energía eléctrica en la agricultura [166]. Esta tecnología ha sido utilizada para diferentes objetivos incluyendo tratamiento de semillas, crecimiento de plántulas, control de plagas, entre otros [167]. La técnica de electro-cultivo (E-C) se refiere al uso de electricidad para favorecer las propiedades de suelos degradados por cuestiones ambientales o por cuestiones antropogénicas. Además, el E-C aumenta la germinación y desarrollo de las plantas tratadas para que estas mejoren su porcentaje de germinación, el tamaño de las plantas y el rendimiento final de las mismas para uso agrícola. De esta manera, con el E-C se genera una alternativa que solucione los problemas relacionados con el aumento masivo de la población y aunado a esto, la inseguridad alimentaria que impera actualmente y amenaza con intensificarse en un futuro próximo [166], [168], [169].

En la Figura 2.28 se esquematiza el proceso de electro-cultivo, en la que se muestran los procesos que ocurren cuando se aplica un campo eléctrico para potenciar el desarrollo de las plantas, considerando la electro-migración de iones que es el movimiento de nutrientes de acuerdo a su carga de un electrodo u otro.

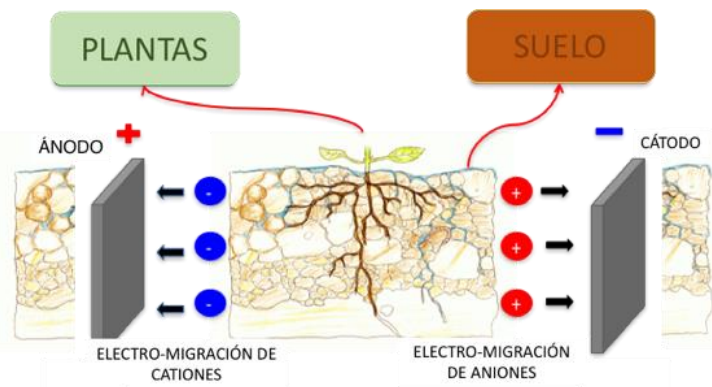


Figura 2.28. Representación esquemática de la técnica de electro-cultivo [170].

### 3. Antecedentes



De acuerdo con Anna Aladjadjiyan [171] y las patentes US 5464456 A [172] y EP0218538 B1 [173], en las cuales se indica que el electro-cultivo, también llamado electro-farming, entre otros, es una técnica que se utiliza para estimular la germinación y el crecimiento de las plantas ya sea aplicándolo en el ambiente circundante a estas o directamente sobre ellas, ya sea mediante campos eléctricos en pulsos o de manera continua. Esta técnica se ha utilizado en los últimos años para resolver problemas de germinación y producción de plantas de interés tanto económico como ambiental.

Se ha documentado anteriormente el papel de la aplicación de campos eléctricos sobre el control de comportamientos biológicos utilizando factores físicos, los cuales pueden ser aplicados directamente en las semillas y en plantas adultas de interés. Estos factores físicos incluyen tratamiento con ondas electromagnéticas, campos magnéticos, campos eléctricos, ultrasonido y radiación ionizante. De acuerdo con A. Aladjadjiyan [174] se cree que son efectivos debido a la amplia comunicación existente entre las células vegetales y su entorno. La aplicación de electricidad a semillas y plantas adultas puede tener una influencia importante en la germinación y desarrollo.

Según Blackman, V. H. (1924), los experimentos para aumentar el crecimiento de plantas utilizando electricidad remontan a principios del siglo XVIII con los primeros experimentos de Mambray llevados a cabo en Edimburgo en 1746, y a partir de éste otros autores han hecho contribuciones acerca del tema utilizando diferentes tipos de corriente como corriente alterna, corriente directa e intercambio de polaridad utilizando ambos tipos de corriente, arreglos de electrodos, tales como configuraciones frente-frente y radial; coadyuvantes, entre los que se encuentran agua, hidróxido de sodio entre otros y tipo de planta empleada como maíz, soya, papa, por mencionar algunos [175].

J. H. Priestley (1907) analizó el efecto de la imposición de electricidad sobre plantas [176], donde describe los experimentos del Sr. J. E. Newman, empleando electricidad como estimulante para aumentar el desarrollo de plantas en gran escala. En estos experimentos, Newman electrificó 418 m<sup>2</sup> en las cuales creció pepino encontrando 17% de aumento de talla comparada con el control, fresas, las cuales crecieron de 36 – 80% más que su control;

y tomates, en los cuales no se encontró efecto, lo cual se deja como una pregunta abierta. Adicionalmente, este trabajo reportó que hubo una disminución considerable en el desarrollo de bacterias patógenas en las plantas de pepino comparadas con el control que no fue tratado con electricidad. En otro juego de experimentos se sembraron zanahorias y éstas crecieron 50% más que su contraparte sin tratamiento; mientras que por otro lado se estudió betabel, el cual se desarrolló 30% más que el control, encontrando en éstas últimas un ligero incremento de 1% en la cantidad total de azúcares en los tubérculos, lo cual se asocia con el proceso de electromigración de iones.

En 1937, C. S. Dorchester estudió el posible efecto de aplicar corriente eléctrica débil similares a las existentes naturalmente en plantas aplicándolos directamente sobre la raíz de estos organismos utilizando electrodos en placa colocados uno frente al otro en ambos extremos de la cama de germinación y utilizando corrientes de intensidad baja de 0.2 a 0.4 mA, lo cual incrementaba la productividad entre un 22 a 58%, en donde una mayor eficiencia se relaciona con la mayor corriente impuesta [177].

En 1971, J. D. Black y colaboradores analizaron los efectos de la aplicación de ligeros incrementos de corriente directa y el desarrollo de plantas de tomate, encontrando incrementos significativos en el desarrollo del 5 al 30%, además de un aumento en la captura de iones tales como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $P^+$  cuando se aplicaron corrientes de 15 y  $3\mu A$  utilizando electrodos no polarizados a cada planta, los autores señalan que esta captura de iones puede ser atribuida a la aplicación de corrientes eléctricas pequeñas que pueden estimular y activar bombas iónicas o alterar la distribución interna de compuestos reguladores del crecimiento de una manera más bien errática [178].

En 1972, según la patente 128876 [179], existe una descripción de un proceso para preparar un activador para emplearlo en electrocultivo de plantas que comprende moler y clasificar un mineral que contiene magnetita para proporcionar gránulos de tamaño de malla 100 o menor en el cual se aplica una carga electromagnética por medio de un electroimán que es energizado con 440 V de corriente directa y luego se separan del resto del material en el mineral los gránulos de magnetita cargados.



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**



**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**

**Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.**