



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SINALOA DE LEYVA

PERIODO SABÁTICO: REPORTE FINAL

1RO DE AGOSTO DE 2024 AL 1RO DE FEBRERO DE 2025

B) PROGRAMA PARA LA ELABORACIÓN DE APUNTES, LIBROS, OBJETIVOS EDUCACIONALES Y REACTIVOS DE EVALUACIÓN

MODALIDAD B.1 ELABORACIÓN DE APUNTES / B 1.2 ELABORACIÓN DE APUNTES DE ASIGNATURA (S):

REMEDIACIÓN DE SUELOS: IHF-1024

INGENIERÍA HIDROLÓGICA 2010-236

ELABORADO POR: JORGE LUIS LÓPEZ VARGAS

Sinaloa de Leyva Sinaloa, febrero 2025



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Carretera Sinaloa de Leyva – León Fonseca, km 3.5

C.P. 81900, Sinaloa de Leyva, Sinaloa,

Tel. (687) 8750911. e-mail: info@sleyva.tecnm.mx
tecnm.mx | sleyva.tecnm.mx





REMEDIACIÓN DE SUELOS

IHF-1024

INGENIERÍA HIDROLÓGICA

2010-236





CONTRIBUCIÓN ACADÉMICA:

La elaboración de apuntes académicos en la asignatura de Remediación de Suelos representa un esfuerzo significativo en la consolidación del conocimiento científico y técnico en el ámbito de la ingeniería hidrológica. Este material didáctico proporciona una base estructurada para que los estudiantes comprendan los principios fundamentales de la contaminación del suelo, las metodologías de evaluación y las estrategias de remediación. Al desarrollar un compendio de información relevante, se facilita el acceso a conceptos clave y se promueve un aprendizaje más eficiente y autodidacta.

Uno de los principales aportes de estos apuntes es la sistematización del conocimiento en torno a los procesos de degradación del suelo y sus soluciones. En ellos se abordan desde los tipos de contaminantes más comunes, como metales pesados, hidrocarburos y residuos industriales, hasta las técnicas más utilizadas para su recuperación, tales como la biorremediación, la fitorremediación y los métodos físico-químicos. La inclusión de estudios de caso y ejemplos prácticos enriquece la comprensión y permite a los estudiantes visualizar la aplicabilidad de los conceptos en situaciones reales.

Además, estos apuntes fortalecen la enseñanza al servir como una herramienta complementaria a las clases presenciales y prácticas de laboratorio. Con un enfoque pedagógico claro, los contenidos se organizan de manera progresiva, desde los fundamentos teóricos hasta las aplicaciones prácticas. De esta manera, se favorece una mejor asimilación de los conocimientos y se proporciona un material de referencia útil para consultas futuras en el ejercicio profesional de los estudiantes.





Otro aspecto fundamental es la incorporación de tablas comparativas, esquemas y gráficos explicativos que facilitan la interpretación de datos y la toma de decisiones en la remediación de suelos. Estos elementos visuales mejoran la comprensión de las interacciones entre los diferentes factores que influyen en la contaminación y recuperación del suelo, permitiendo a los estudiantes desarrollar habilidades analíticas y de resolución de problemas en escenarios diversos.

La actualización constante de los apuntes es otro factor clave en su relevancia académica. La incorporación de avances científicos y tecnológicos en la disciplina garantiza que el contenido se mantenga alineado con las tendencias actuales en el campo de la remediación ambiental. De esta manera, se fomenta en los estudiantes una mentalidad crítica y proactiva para la investigación y la innovación en la resolución de problemas ambientales.

Desde el punto de vista metodológico, la creación de estos apuntes implica un proceso de selección y adaptación de información proveniente de fuentes científicas y normativas reconocidas. Esto asegura la rigurosidad del contenido y su alineación con los estándares nacionales e internacionales en materia de remediación de suelos. Además, el diseño del material tiene en cuenta estrategias didácticas que favorecen el aprendizaje significativo y la aplicación de los conocimientos adquiridos.

Por otra parte, el desarrollo de estos apuntes contribuye a la formación integral de los futuros ingenieros hidrólogos al proporcionarles una visión holística sobre la importancia de la conservación y recuperación del suelo. Al entender los impactos ambientales de la contaminación y las posibles estrategias de mitigación, los estudiantes adquieren competencias esenciales para la gestión sostenible de los recursos naturales y la toma de decisiones en proyectos de remediación.





En conclusión, la creación de apuntes de Remediación de Suelos representa una contribución académica valiosa para la enseñanza y el aprendizaje en la ingeniería hidrológica. No solo facilita la adquisición de conocimientos especializados, sino que también promueve el desarrollo de habilidades analíticas, críticas y técnicas en los estudiantes. Al consolidar un material de referencia de calidad, se fortalece la educación en esta área y se impulsa la formación de profesionales capacitados para enfrentar los retos ambientales relacionados con la contaminación del suelo.



RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS:

AL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

AL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SINALOA DE LEYVA

A LA ACADEMIA DE INGENIERÍA HIDROLÓGICA

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
TEMA 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	3
1.1.1. PROPIEDADES DEL SUELO AFECTADAS POR CONTAMINANTES..	7
1.1.2. DEGRADACIÓN FÍSICA DEL SUELO.....	8
1.1.1.1 ¿QUÉ FACTORES AFECTAN A LA PERMEABILIDAD DEL SUELO?	11
1.1.1.2. LA PERMEABILIDAD DEL SUELO SE RELACIONA CON SU TEXTURA Y ESTRUCTURA	12
1.1.3. DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL SUELO	13
1.1.3.1. LA REACCIÓN QUÍMICA DEL SUELO: EL PH.....	14
1.1.3.2. TIPOS DE DEGRADACIONES.....	16
1.1.3.3. CONSECUENCIAS DE LA DEGRADACIÓN.....	21
1.1.4. DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DEL SUELO.....	22
1.2. IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN EN EL SUELO.....	25
1.3. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES	30
TEMA 2. TIPOS DE AFECCIONES AL SUELO	32
2.1. POR DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	32
2.1.1. CONTAMINACIÓN QUÍMICA POR METALES PESADOS Y COMPUESTOS ORGÁNICOS	32
2.1.2. EUTROFIZACIÓN DEL SUELO.....	32
2.1.3. SALINIZACIÓN DEL SUELO	33
2.1.4. ALTERACIÓN BIOLÓGICA DEL SUELO	33
2.1.5. CAMBIOS EN EL PH DEL SUELO	34
2.2. POR METALES.....	34

2.2.1.	METALES PESADOS Y ELEMENTOS TRAZA.....	35
2.2.2.	PODER DEPURADOR DE LOS SUELOS.....	36
2.2.3.	EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS TRAZA EN LOS SUELOS.....	37
2.3.	POR EL USO DE FERTILIZANTES.....	42
2.4.	POR RESIDUOS SÓLIDOS.....	44
2.5.	POR HIDROCARBUROS.....	46
2.6.	COMPLEMENTOS EDUCACIONALES.....	48
TEMA 3.	CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS.....	49
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE UN SUELO.....	49
3.1.1.	LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SUELO.....	51
3.2.	MUESTREO DE SUELO PARA SU ANÁLISIS.....	55
3.2.1.	IMPLEMENTOS REQUERIDOS.....	56
3.2.2.	PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MUESTRAS.....	57
3.2.3.	DELIMITACIÓN DEL SUELO.....	58
3.2.4.	CUIDADOS AL TOMAR LA MUESTRA.....	58
3.2.5.	ÉPOCA DE MUESTREO.....	59
3.2.6.	RECOMENDACIONES GENERALES.....	60
3.3.	EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	61
3.3.1.	DISPERSIÓN DE LOS PLAGUICIDAS EN EL MEDIO AMBIENTE.....	61
3.3.2.	EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PLAGUICIDAS EN EL SUELO	65
3.3.3.	EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE QUE LOS DERRAMES LLEGUEN A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	67
3.3.4.	DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PLAGUICIDAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	68

3.3.5. EVALUACIÓN DE LA TASA DE EMISIÓN DE PLAGUICIDAS FUERA DEL ALMACÉN	71
3.4. REMEDIACIÓN	72
3.4.1. REMEDIAR NO ES SÓLO EXCAVAR	73
3.4.2. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	74
3.4.6. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO	78
3.5. TRATAMIENTOS FÍSICOS	79
3.5.1. LAVADO DE SUELOS	80
3.6. TRATAMIENTOS QUÍMICOS	82
3.7. ESTABILIZACIÓN	82
3.8. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS	83
3.9. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES	85
TEMA 4. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS	87
4.1. INTRODUCCIÓN	87
4.2. CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN	87
4.3. ELEMENTOS QUE DEFINEN EL ÉXITO DE LA REMEDIACIÓN	89
4.4. PRUEBAS DE TRATABILIDAD	90
4.4.1. BIOREMEDIACIÓN	90
4.4.2. FITORREMEDIACIÓN	90
4.4.3. TRATAMIENTO TÉRMICO	90
4.4.4. ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN	91
4.4.5. EXTRACCIÓN DE VAPOR DEL SUELO (SVE, SOIL VAPOR EXTRACTION)	91
4.5. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES	92
BIBLIOGRAFIA	93
SITIOS WEB	94

INSTRUMENTACIÓN DIDÁCTICA PARA LA FORMACIÓN Y DESARROLLO DE COMPETENCIAS PROFESIONALES	95
---	----

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Comparación entre suelos con estructura sana y suelos compactados por contaminantes.....	9
Ilustración 2. Estanque construido en suelo impermeable perderá poca agua por filtración.....	10
Ilustración 3. Al planificar el diseño de un estanque se debe evitar la presencia de una capa permeable en el fondo para impedir una pérdida de agua excesiva hacia el subsuelo a causa de la filtración.....	10
Ilustración 4. Posición relativa de las capas permeables e impermeables	11
Ilustración 5. Comparación de diques de estanque.....	11
Ilustración 6. Grafico para determinar el PH.....	15
Ilustración 7. Degradación de la fertilidad.....	16
Ilustración 8. Reconstrucción de la posible evolución de un suelo	18
Ilustración 9. Comparación de suelo original y suelo con erosión natural	18
Ilustración 10. Relieves de erosión plana	19
Ilustración 11. Relieves colinados	20
Ilustración 12. Acumulación de hojarasca de <i>Medicago strasserii</i>	23
Ilustración 13. Aguas residuales.....	34
Ilustración 14. Movilidad de elementos trazas y su incorporación a los suelos ...	38
Ilustración 15. El papel fundamental de los microorganismos en la transformación y degradación de los minerales.....	38
Ilustración 16. Solubilidad de metales pesados en función del pH y Eh (a) los principales minerales que controlan la solubilidad de los metales pesados; (b) tendencia de incremento de la solubilidad	41
Ilustración 17. Tabla Munsell.....	51
Ilustración 18. Triángulo de texturas.....	52
Ilustración 19. Estructura del suelo.....	53
Ilustración 20. Formación de la estructura.....	54
Ilustración 21. Ácidos del suelo	54
Ilustración 22. Implementos requeridos.....	56
Ilustración 23. Procedimiento de muestreo.....	58

Ilustración 24. Diferentes formas del terreno para delimitar	58
Ilustración 25. Dispersión de los contaminantes de un almacén al medio ambiente	62
Ilustración 26. Sistema de remediación	76
Ilustración 27. Disposición de un contaminante líquido (C)	77
Ilustración 28. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA 1997 y 1999	79
Ilustración 29. Esquema de lavado con agua (in situ)	81
Ilustración 30. Tratamiento microbiológico (in situ)	84
Ilustración 31. Esquema de un método de biorremediación (on site)	84
Ilustración 32. Principales factores que influyen en la eficiencia de una remediación	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Impacto de contaminantes en las propiedades físicas del suelo	8
Tabla 2. Permeabilidad según la textura del suelo	12
Tabla 3. Permeabilidad según la estructura del suelo	12
Tabla 4. Complementos educacionales del tema 1. Introducción	30
Tabla 5. Tipos de Residuos Solidos.....	44
Tabla 6. Complementos educacionales del Tema 2. Tipos de afecciones al suelo	48
Tabla 7. Formato Cuadro 1.1. Determinación de los plaguicidas pertinentes	63
Tabla 8. Formato Cuadro 1.2. Distinción entre plaguicidas	64
Tabla 9. Formato cuadro 1.3. Enumeración de plaguicidas.....	64
Tabla 10. Formato cuadro 2.1. Concentración de plaguicidas en el suelo.....	66
Tabla 11. Formato cuadro 2.2. Concentración de plaguicidas en el suelo.....	67
Tabla 12. Formato cuadro 3.1. Determinación de concentración de plaguicidas en las aguas subterráneas	68
Tabla 13. Formato cuadro 3.2. Calculo de concentración de plaguicidas en las aguas subterráneas.....	70
Tabla 14. Formato cuadro 3.3. Valores típicos para la conductividad hidráulica de varios sedimentos no consolidados y rocas	70
Tabla 15. Formato cuadro 4.1. Evaluación de la tasa de emisión de plaguicidas fuera del almacén	71
Tabla 16. Complementos educacionales del Tema 3. Control de la contaminación de suelos	85
Tabla 17. Complementos educacionales Tema 4. Tecnología de remediación de suelos.....	92

REMEDIACIÓN DE SUELOS

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo es un problema ambiental de gran relevancia, derivado de actividades industriales, agrícolas y urbanas. Su impacto en los ecosistemas y la salud humana ha llevado al desarrollo de diversas estrategias de remediación, cuyo conocimiento es esencial para los futuros ingenieros hidrólogos. En este contexto, la elaboración de apuntes especializados en Remediación de Suelos busca proporcionar un recurso académico estructurado y actualizado que facilite la comprensión de los procesos de descontaminación y recuperación del suelo.

Este material didáctico aborda los fundamentos de la contaminación del suelo, los métodos de evaluación de su calidad y las principales técnicas de remediación, como la biorremediación, la fitorremediación y los tratamientos físico-químicos. Además, integra ejemplos prácticos, estudios de caso y normativas vigentes, promoviendo un aprendizaje significativo y aplicado.

La creación de estos apuntes responde a la necesidad de disponer de un documento accesible y sistemático, que complemente la enseñanza en el aula y fortalezca la formación de profesionales capacitados para enfrentar los desafíos ambientales. Su desarrollo no solo contribuye a la educación superior, sino que también fomenta el pensamiento crítico y la innovación en soluciones para la recuperación del suelo.

TEMA 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural vital que sustenta la vida en la Tierra, sirviendo como la base sobre la cual se desarrollan los ecosistemas terrestres, la agricultura y la civilización humana. A lo largo de la historia, el suelo ha sido una fuente crucial de nutrientes y soporte para las plantas, que a su vez proporcionan alimento, fibras, combustibles y otros productos esenciales para la vida humana y animal. Sin embargo, a pesar de su importancia, el suelo es un recurso finito y no renovable en la escala temporal de la vida humana, lo que lo hace vulnerable a la degradación y contaminación como resultado de las actividades antropogénicas.

Los suelos se forman a través de procesos naturales que involucran la meteorización de rocas y la acumulación de materia orgánica a lo largo de miles a millones de años. Estos procesos resultan en una compleja mezcla de minerales, materia orgánica, agua y aire que conforman la estructura del suelo. La composición y las propiedades del suelo varían significativamente dependiendo de factores como el clima, la topografía, la biota y el tiempo, lo que da lugar a diferentes tipos de suelos con características físicas, químicas y biológicas únicas. Estas propiedades determinan la capacidad del suelo para cumplir sus múltiples funciones, tales como la regulación del ciclo del agua, la retención y liberación de nutrientes, y la provisión de un hábitat para innumerables organismos.

No obstante, el suelo está bajo una presión creciente debido a las actividades humanas. La expansión agrícola, la urbanización, la deforestación, la minería y la industrialización han provocado una pérdida y degradación de los suelos a una velocidad alarmante. Uno de los principales problemas que enfrentan los suelos hoy en día es la contaminación. La contaminación del suelo ocurre cuando sustancias nocivas, como pesticidas, fertilizantes químicos, residuos industriales y metales pesados, se introducen en el suelo y alteran sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Esta contaminación puede tener efectos adversos en la salud de los ecosistemas, la productividad agrícola y la salud humana.

Además de la contaminación, la erosión, la salinización y la compactación son formas de degradación del suelo que afectan su capacidad para sostener la vida. La erosión del suelo, por ejemplo, puede resultar en la pérdida de la capa superficial del suelo, que es la más fértil y rica en materia orgánica. La salinización, común en áreas irrigadas, puede hacer que el suelo sea inhóspito para muchas plantas. La compactación, a menudo causada por el uso de maquinaria pesada, reduce la porosidad del suelo y limita la infiltración de agua y la circulación de aire, lo que perjudica el crecimiento de las raíces y la actividad microbiana.

La importancia del suelo en el contexto de la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria ha llevado a un reconocimiento creciente de la necesidad de gestionar este recurso de manera responsable. La gestión sostenible del suelo implica prácticas que mantengan su salud y productividad a largo plazo, como la agricultura de conservación, la reforestación, la restauración de tierras degradadas y la reducción del uso de químicos sintéticos en la agricultura. Estas prácticas no solo ayudan a preservar el suelo, sino que también contribuyen a la mitigación del cambio climático al aumentar la capacidad del suelo para secuestrar carbono.

1.1. CONTAMINACIÓN DEL SUELO

El suelo es un recurso finito, lo que significa que su pérdida y degradación no es recuperable en el transcurso de una vida humana. Los suelos afectan a los alimentos que comemos, al agua que bebemos, al aire que respiramos, a nuestra salud y la de todos los organismos del planeta. Sin suelos sanos no podríamos producir nuestros alimentos. De hecho, se calcula que el 95% de nuestros alimentos se producen directa o indirectamente en los suelos.

Unos suelos sanos son la clave para la seguridad alimentaria y para un futuro sostenible. Ayudan a mantener la producción de alimentos, a mitigar y adaptarse al cambio climático, filtrar el agua, mejorar la resiliencia ante inundaciones y sequías y mucho más. Sin embargo, una amenaza invisible está poniendo en peligro los suelos y todo lo que nos ofrecen.

La contaminación del suelo provoca una reacción en cadena. Altera la biodiversidad del suelo, reduciendo la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro. También se contamina el agua almacenada en el suelo y el agua subterránea, provocando un desequilibrio de sus nutrientes. Entre los contaminantes del suelo más comunes se encuentran los metales pesados, los contaminantes orgánicos persistentes y los contaminantes emergentes, como los productos farmacéuticos y los destinados al cuidado personal.

La contaminación del suelo es devastadora para el medio ambiente y tiene consecuencias para todas las formas de vida a las que afecta. Las prácticas agrícolas insostenibles reducen la materia orgánica del suelo y pueden facilitar la transferencia de contaminantes a la cadena alimentaria. Por ejemplo, el suelo contaminado puede liberar contaminantes en las aguas subterráneas que luego se acumulan en los tejidos de las plantas y pasan a los animales que pastan, a las aves y finalmente a los humanos que se alimentan de las plantas y los animales. Los contaminantes en el suelo, aguas subterráneas y en la cadena alimentaria pueden causar diversas enfermedades y una excesiva mortalidad en la población, desde efectos agudos a corto plazo –como intoxicaciones o diarrea–, hasta otros crónicos a largo plazo, como el cáncer.

Más allá del impacto en el medio ambiente, la contaminación del suelo tiene también un elevado coste económico, debido a la reducción de los rendimientos y la calidad de los cultivos. La prevención esta contaminación debería ser una prioridad en todo el mundo. El hecho de que la gran mayoría de los contaminantes sean resultado de la acción humana significa que somos directamente responsables de realizar los cambios necesarios para garantizar un futuro con menos contaminación y más seguro (Agricultura, 2018).

Los suelos deben ser reconocidos y valorados por su capacidad productiva, así como por su contribución a la seguridad alimentaria y al mantenimiento de servicios ecosistémicos clave. He aquí algunas razones por las que la contaminación del suelo no puede subestimarse:

1. La contaminación del suelo afecta a todos los ámbitos. Los alimentos que comemos, el agua que bebemos, el aire que respiramos, nuestra salud y la de todos los organismos del planeta dependen de un suelo sano. El contenido de nutrientes de los tejidos de una planta está directamente relacionado con el contenido de nutrientes del suelo y su capacidad para intercambiar nutrientes y agua con las raíces de esa planta.
2. La contaminación del suelo es invisible. Hoy en día, un tercio de nuestros suelos están moderadamente o muy degradados debido a la erosión, la pérdida de carbono orgánico, la salinización, compactación, acidificación y la contaminación química. Se necesitan aproximadamente 1 000 años para formar 1 cm de capa arable superficial, lo que significa que no podremos producir más suelo en el transcurso de nuestras vidas. El suelo que vemos es todo el que hay disponible. Sin embargo, los suelos se enfrentan aún a más presión debido a la contaminación. La tasa actual de degradación del suelo amenaza la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades más básicas.
3. La contaminación del suelo afecta a su capacidad de filtrado. Los suelos actúan de filtro y amortiguador para los contaminantes. Pero el potencial del suelo para hacer frente a esta presión es finito. Si se supera la capacidad del suelo para protegernos, los contaminantes se filtrarán (y se filtran) a otros elementos del entorno, como nuestra cadena alimentaria.
4. La contaminación del suelo puede ser resultado de malas prácticas agrícolas. Las prácticas agrícolas insostenibles reducen la materia orgánica del suelo, comprometiendo su capacidad para degradar los contaminantes orgánicos. Esto aumenta el riesgo de que los contaminantes se liberen al medio ambiente. En muchos países, la producción agrícola intensiva ha agotado los suelos, poniendo en peligro nuestra capacidad para mantener la producción en estas áreas en el futuro. Por lo tanto, las prácticas de producción agrícola sostenible se han convertido en un imperativo para revertir la tendencia a la degradación del suelo y garantizar la seguridad alimentaria actual y futura a nivel mundial.

5. La contaminación del suelo puede poner en riesgo nuestra salud. Una parte importante de los antibióticos –utilizados ampliamente en la agricultura y en el ámbito de la salud humana– se liberan en el medio ambiente tras ser excretados del organismo al que se les administró. Estos antibióticos pueden filtrarse en los suelos y propagarse en el ambiente. Esto produce bacterias resistentes a los antimicrobianos, lo que disminuye la eficacia de los antibióticos. Cada año, unas 700 000 muertes son atribuibles a bacterias resistentes a los antimicrobianos. Para 2050, si no se ataja el problema, la resistencia a los antimicrobianos matará a más personas que el cáncer y tendrá un coste global mayor que el actual volumen de la economía mundial.

Pero, ¿Qué es la contaminación del suelo?, La contaminación del suelo se refiere a la presencia de sustancias tóxicas, residuos o materiales nocivos que alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Esta contaminación puede ser causada por actividades humanas como la agricultura, la minería, la industria y la disposición inadecuada de residuos. La presencia de contaminantes en el suelo puede tener efectos adversos sobre los ecosistemas, la salud humana y la productividad agrícola.

Un suelo contaminado también podrá contaminar el aire y el agua, expandiendo así el rango de afección.

A continuación, veremos los tipos de contaminación del suelo:

- **Contaminación natural:** Se concentra toxicidad entre los que determinan algunos elementos metálicos presentes en los minerales originales de ciertas rocas. Esta contaminación es producida debido a la presencia de compuestos naturales en el suelo. Algunos ejemplos son las erupciones volcánicas o los incendios forestales.
- **Contaminación antrópica:** Se produce cuando los contaminantes son introducidos en la atmósfera a consecuencia de las actividades humanas, como por ejemplo los gases producidos por los automóviles, calefactores, procesos industriales etc.

- **Contaminación por sustancias químicas:** Son generadas por el hombre, provocando daños y cambios en el ecosistema del suelo y afectando al agua y al aire. Algunos ejemplos son los pesticidas, hidrocarburos y solventes.
- **Contaminación por infiltración:** Se desarrolla cuando el agua de la superficie es filtrada por el suelo, produciendo un efecto que dependerá directamente de la cantidad del agua en superficie y del tipo de suelo.
- **Contaminación por superficies de escorrentía:** Producido por el arrastre de contaminantes como fertilizantes, petróleo y plaguicidas, debido a la presencia de nieve o lluvias que erosionan y se filtran en el suelo.
- **Contaminación por instalaciones comerciales e industriales abandonadas:** También denominado como terreno baldío que determinadas industrias y comercios dejan abandonados. Estos, poseen concentraciones de elementos, contenedores y tambores que tienen contaminantes ambientales y residuos peligrosos

1.1.1. PROPIEDADES DEL SUELO AFECTADAS POR CONTAMINANTES

El suelo es un sistema dinámico con propiedades físicas, químicas y biológicas que interactúan entre sí para sostener la vida vegetal y animal. Cuando el suelo se contamina, estas propiedades se ven alteradas de diversas formas, afectando su capacidad para funcionar de manera adecuada. Los contaminantes pueden modificar la estructura física del suelo, alterar su composición química y disminuir la actividad biológica, lo que a su vez afecta su fertilidad, capacidad de retención de agua y capacidad de soporte de los ecosistemas (Pérez et al., 2018).

Los procesos de degradación de un suelo pueden ser múltiples y frecuentemente interrelacionados. Tradicionalmente se ha venido agrupando a las diferentes clases de degradación en tres categorías:

- Degradación física
- Degradación química
- Degradación biológica

1.1.2. DEGRADACIÓN FÍSICA DEL SUELO

Las propiedades físicas del suelo incluyen la estructura, textura, densidad y porosidad, todas ellas fundamentales para el movimiento del agua y el aire, así como para el crecimiento de las raíces de las plantas. Los contaminantes, tanto químicos como físicos, pueden alterar estas propiedades.

Estructura del suelo: La estructura se refiere a la disposición de las partículas de suelo (arena, limo y arcilla) y la forma en que se agregan en estructuras más grandes llamadas agregados. La introducción de contaminantes, especialmente los metales pesados y los hidrocarburos, puede romper estos agregados, causando que el suelo se compacte y pierda su porosidad. La compactación reduce la capacidad del suelo para absorber y almacenar agua, además de dificultar el crecimiento de las raíces de las plantas (Rodríguez y Hernández, 2019).

Tabla 1. Impacto de contaminantes en las propiedades físicas del suelo

Contaminante	Efecto en la estructura del suelo	Efecto en la porosidad
Metales pesados (Pb)	Desagregación de partículas	Reducción de la porosidad
Hidrocarburos	Compactación	Dificultad en la infiltración de agua
Pesticidas	Alteración de la estructura	Menor movimiento de aire y agua

Un suelo sano está constituido aproximadamente por un 50% de espacios vacíos – llamados “poros”–, a través de los cuales filtran el aire y el agua: precisamente el paso de estos elementos permite el desarrollo de las raíces de las plantas y su mayor crecimiento. El término “compactación del terreno” significa la pérdida gradual de la porosidad del suelo, de la cual resulta la reducción de la sustancia orgánica: por causa de la escasez de poros, al aire y al agua le cuesta llegar al subsuelo y la planta se queda desprovista de nutrientes. El problema de la

compactación del suelo es significativo: este fenómeno puede generar picos elevados (hasta el 20%) de pérdida de cultivos, con un fuerte impacto financiero para la empresa.

Las causas de la compactación del suelo son muy variadas y pueden clasificarse entre naturales y acción humana. En el primer caso, una reducción en los espacios existentes entre las partículas del suelo podría ser la consecuencia de lluvias particularmente abundantes o de un abultamiento y formación de grietas en el suelo. En cuanto a los factores humanos, nos referimos principalmente al uso de maquinaria muy pesada y a su paso continuo en el suelo para realizar las diversas actividades agrícolas (trituración, arado, paso de gradas, formación de mesas, etc.

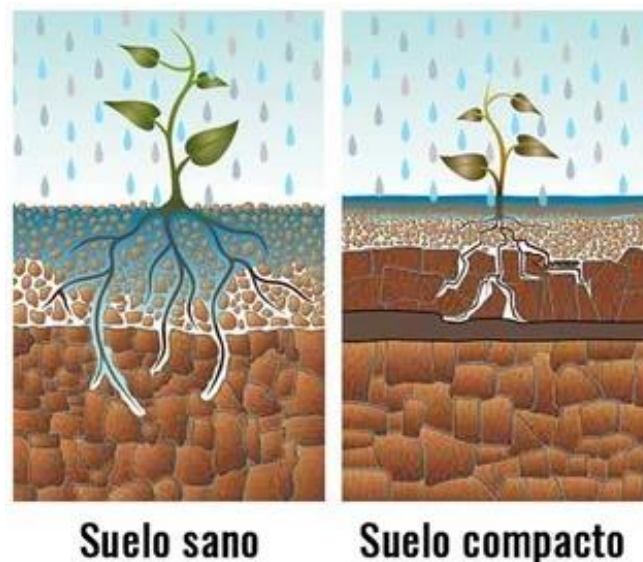


Ilustración 1. Comparación entre suelos con estructura sana y suelos compactados por contaminantes

Porosidad y permeabilidad: Los contaminantes afectan negativamente la porosidad del suelo al alterar la distribución de los espacios porosos. La disminución de los poros se traduce en una reducción de la permeabilidad, lo que impide la infiltración adecuada de agua y aire en el suelo. Esto puede causar problemas de anegamiento o escorrentía superficial, aumentando el riesgo de erosión (Alimentación, sf).

La permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire y es una de las cualidades más importantes que han de considerarse para la piscicultura.

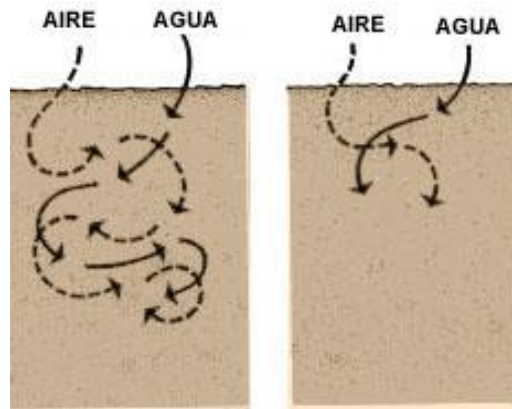


Ilustración 2. Estanque construido en suelo impermeable perderá poca agua por filtración

Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de estanque es preciso aplicar técnicas de construcción especiales. En un volumen de esta colección que aparecerá próximamente se ofrecerá información sobre dichas técnicas.

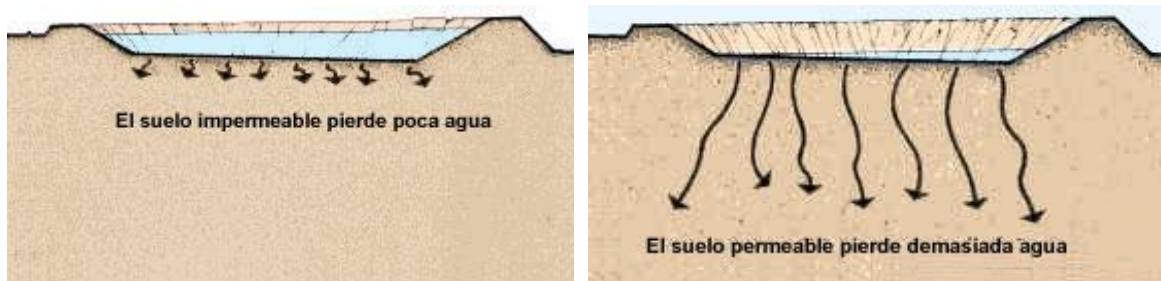


Ilustración 3. Al planificar el diseño de un estanque se debe evitar la presencia de una capa permeable en el fondo para impedir una pérdida de agua excesiva hacia el subsuelo a causa de la filtración

Por lo general, los suelos se componen de capas y, a menudo, la calidad del suelo varía considerablemente de una capa a otra. Antes de construir un estanque, es importante determinar la posición relativa de las capas permeables e impermeables.

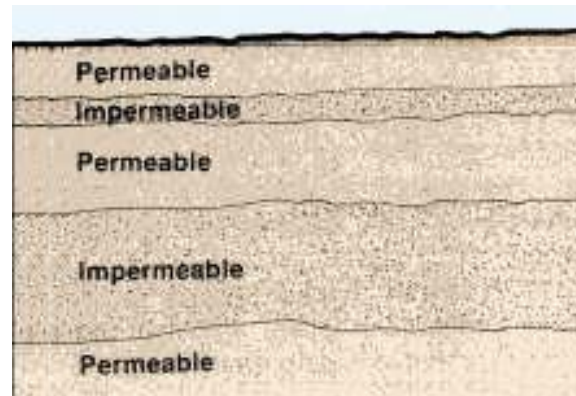


Ilustración 4. Posición relativa de las capas permeables e impermeables

Los diques del estanque se deben construir con un tipo de suelo que garantice una buena retención del agua. La calidad del suelo tendrá que comprobarse, repetimos, teniendo presente ese aspecto.

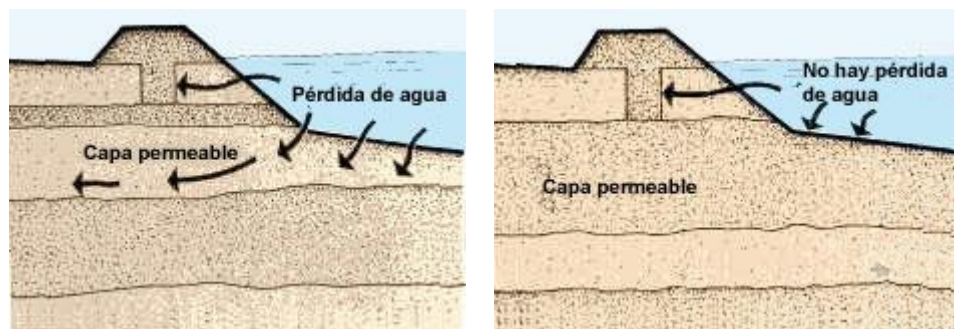


Ilustración 5. Comparación de diques de estanque

1.1.1.1 ¿QUÉ FACTORES AFECTAN A LA PERMEABILIDAD DEL SUELO?

Muchos factores afectan a la permeabilidad del suelo. En ocasiones, se trata de factores en extremo localizados, como fisuras y cárcavas, es difícil hallar valores representativos de la permeabilidad a partir de mediciones reales. Un estudio serio de los perfiles de suelo proporciona una indispensable comprobación de dichas mediciones. Las observaciones sobre la textura del suelo, su estructura, consistencia, color y manchas de color, la disposición por capas, los poros visibles y la profundidad de las capas impermeables como la roca madre y la capa de arcilla, constituyen la base para decidir si es probable que las mediciones de la permeabilidad sean representativas.

1.1.1.2. LA PERMEABILIDAD DEL SUELO SE RELACIONA CON SU TEXTURA Y ESTRUCTURA

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

- **Variación de la permeabilidad según la textura del suelo**

Por regla general, como se muestra a continuación, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad:

Tabla 2. Permeabilidad según la textura del suelo

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelos arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	

- **Variación de la permeabilidad según la estructura del suelo**

La estructura puede modificar considerablemente las tasas de permeabilidad mostradas anteriormente de la forma siguiente:

Tabla 3. Permeabilidad según la estructura del suelo

Tipo de estructura		Permeabilidad
Laminar	- Gran traslapo	De muy lenta a muy rápida
	- Ligerito traslapo	
En bloque		
Prismática		
Granular		

Los contaminantes pueden alterar diversas propiedades del suelo:

- **Estructura del suelo:** Los contaminantes, especialmente los metales pesados y compuestos orgánicos, pueden afectar la agregación de las partículas del suelo, disminuyendo su porosidad y permeabilidad. Esto puede conducir a la compactación del suelo y a una menor infiltración de agua, lo que a su vez afecta la disponibilidad de agua para las plantas (Brady & Weil, 2016).
- **Composición química:** La contaminación puede modificar el pH del suelo, afectando su capacidad para retener nutrientes y alterar la solubilidad de ciertos elementos. Por ejemplo, la acidificación del suelo por la deposición ácida puede reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales, lo que impacta negativamente el crecimiento vegetal (Sposito, 2008).
- **Capacidad de retención de agua:** La contaminación puede reducir la capacidad del suelo para retener agua, lo que afecta su función como reservorio hídrico y aumenta la susceptibilidad a la erosión (Lal & Stewart, 2012).

1.1.3. DEGRADACIÓN QUÍMICA DEL SUELO

Las propiedades químicas del suelo se refieren a los aspectos que determinan la composición química y la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, así como las interacciones entre los compuestos presentes en el suelo. Estas propiedades son clave para entender la fertilidad del suelo y su capacidad para sostener la vida vegetal.

La meteorización del material de partida por el agua determina, en gran medida, la composición química del suelo que por último se ha producido. Algunas sustancias químicas de la lixiviación en las capas inferiores del suelo donde se acumulan, mientras que otras sustancias químicas, que son menos solubles, quedan en las capas superiores del suelo. Las sustancias químicas que se eliminan con más rapidez son los cloruros y los sulfatos, a los que siguen el calcio, el sodio, el magnesio y el potasio.

Los silicatos y los óxidos del hierro y el aluminio se descomponen con mucha lentitud y apenas se lixivian*. Cuando algunos de estos productos se ponen en contacto con el aire del suelo, tienen lugar reacciones químicas como, en particular la oxidación, que provoca la formación de sustancias químicas más solubles o más frágiles que las originales. En consecuencia, se aceleran los procesos de meteorización, aumenta la lixiviación* de las sustancias químicas y se producen otros cambios en la composición química del suelo.

La degradación química del suelo implica cambios en su composición química debido a la contaminación:

- Acidificación: La acumulación de ácidos en el suelo, derivada del uso de fertilizantes nitrogenados y la deposición ácida, puede reducir el pH del suelo, afectando la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica del suelo (Sposito, 2008).
- Salinización: La salinización es un proceso en el que se acumulan sales solubles en el suelo, generalmente como resultado de prácticas de riego inadecuadas. Esto puede afectar la estructura del suelo y la capacidad de las plantas para absorber agua (Lal & Stewart, 2012).
- Contaminación por metales pesados: Los metales pesados, como plomo, cadmio y mercurio, pueden acumularse en el suelo debido a actividades industriales, mineras y agrícolas. Estos elementos son tóxicos para las plantas y los microorganismos, lo que afecta la fertilidad del suelo y la salud de los ecosistemas (Alloway, 2013).

1.1.3.1. LA REACCIÓN QUÍMICA DEL SUELO: EL PH

¿Qué significa el pH?: Los suelos pueden tener una reacción ácida o alcalina, y algunas veces neutral. La medida de la reacción química del suelo se expresa mediante su valor de pH. El valor de pH oscila de 0 a 14, y el pH = 7 es el que indica que el suelo tiene una reacción neutra. Los valores inferiores a 7 indican acidez y los superiores a 7 alcalinidad. Mientras más distante esté la medida del punto neutro, mayor será la acidez o la alcalinidad.

¿Cómo se mide el pH?: El método de mayor precisión para la determinación del pH del suelo es el que se realiza mediante un contador eléctrico del pH, que ofrece una lectura directa del valor de pH cuando los electrodos de vidrio se introducen en una solución que se obtiene mezclando una parte de la muestra del suelo y dos partes de agua destilada.

Como indicación general del pH del suelo, se pueden utilizar sobre el terreno el papel de tornasol y los indicadores cromáticos. El papel de tornasol que adquiere un color rojo en condiciones ácidas y azul en condiciones alcalinas, es relativamente poco costoso y, por lo general, se puede comprar en farmacia. Dicho papel se sumerge parcialmente en una suspensión de suelo que se obtiene mezclando una parte de suelo y dos partes de agua destilada o, si fuese necesario, de agua de lluvia pura recogida directamente en un recipiente limpio. También se pueden adquirir equipos para ensayos de campo, incluidos diversos indicadores cromáticos. Como se indica en las instrucciones, normalmente se mezcla una pequeña muestra de suelo con un poco de agua destilada y una sustancia química, y se agregan varias gotas de un indicador cromático. El color de la solución cambia y ese nuevo color se compara con un gráfico que acompaña al equipo de ensayo, a partir de lo cual se determina el valor de pH.

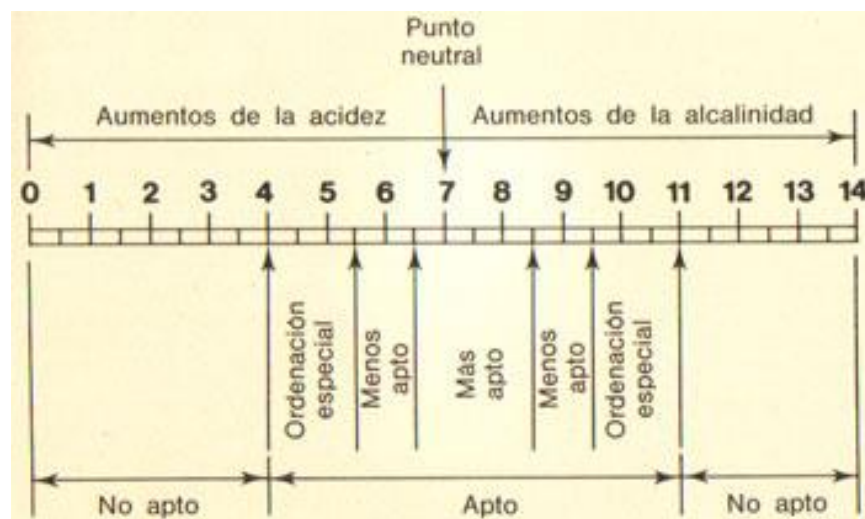


Ilustración 6. Grafico para determinar el PH

1.1.3.2. TIPOS DE DEGRADACIONES

Degradación de la fertilidad: Es la disminución de la capacidad del suelo para soportar vida. Se producen modificaciones en sus propiedades físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas que conllevan a su deterioro.

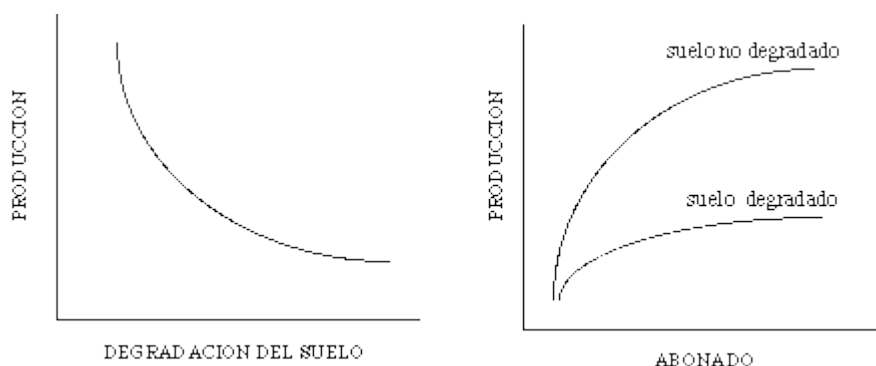


Ilustración 7. Degradación de la fertilidad

Al degradarse el suelo pierde capacidad de producción y cada vez hay que añadirle más cantidad de abonos para producir siempre cosechas muy inferiores a las que produciría el suelo si no se presentase degradado.

Puede tratarse de una degradación química, que se puede deber a varias causas: pérdida de nutrientes, acidificación, salinización, sodificación, aumento de la toxicidad por liberación o concentración de determinados elementos químicos. El deterioro del suelo a veces es consecuencia de una degradación física, por: pérdida de estructura, aumento de la densidad aparente, disminución de la permeabilidad, disminución de la capacidad de retención de agua. En otras ocasiones se habla de degradación biológica, cuando se produce una disminución de la materia orgánica incorporada.

Erosión: La erosión es la pérdida selectiva de materiales del suelo. Por la acción del agua o del viento los materiales de las capas superficiales van siendo arrastrados. Si el agente es el agua se habla de erosión hídrica y para el caso del viento se denomina erosión eólica.

El concepto de erosión del suelo se refiere a la erosión antrópica, que es de desarrollo rápido. Frente a ella está la erosión natural o geológica, de evolución muy lenta.

La erosión geológica se ha desarrollado desde siempre en la Tierra, es la responsable del modelado de los continentes y sus efectos se compensan en el suelo, ya que actúan con la suficiente lentitud como para que sus consecuencias sean contrarrestadas por la velocidad de formación del suelo. Así en los suelos de las superficies estables se reproduce el suelo, como mínimo, a la misma velocidad con que se erosiona.

Es más, es muy importante destacar que la erosión natural es un fenómeno muy beneficioso para la fertilidad de los suelos.

Efectivamente, como es sabido, todas las propiedades del suelo, y por tanto su profundidad, son consecuencia de una determinada combinación de los factores formadores. En una determinada región aparecerá un suelo cuya profundidad será el resultado de un clima concreto (temperatura y precipitaciones), sometido a la actividad de unos determinados organismos, en un tipo de relieve, que actúan sobre una clase de roca durante un tiempo. Si no actuase la erosión natural esa profundidad de material se iría alterándose progresivamente cada vez más conforme el suelo se fuese volviendo más antiguo y llegaría un momento que todos los minerales originales se habrían transformado totalmente, ya no aportarían ningún nutriente nuevo al suelo y este quedaría constituido por un residuo totalmente infértil. Prácticamente toda la Tierra estaría recubierta de una capa inerte, sin posibilidad de soportar vida alguna.

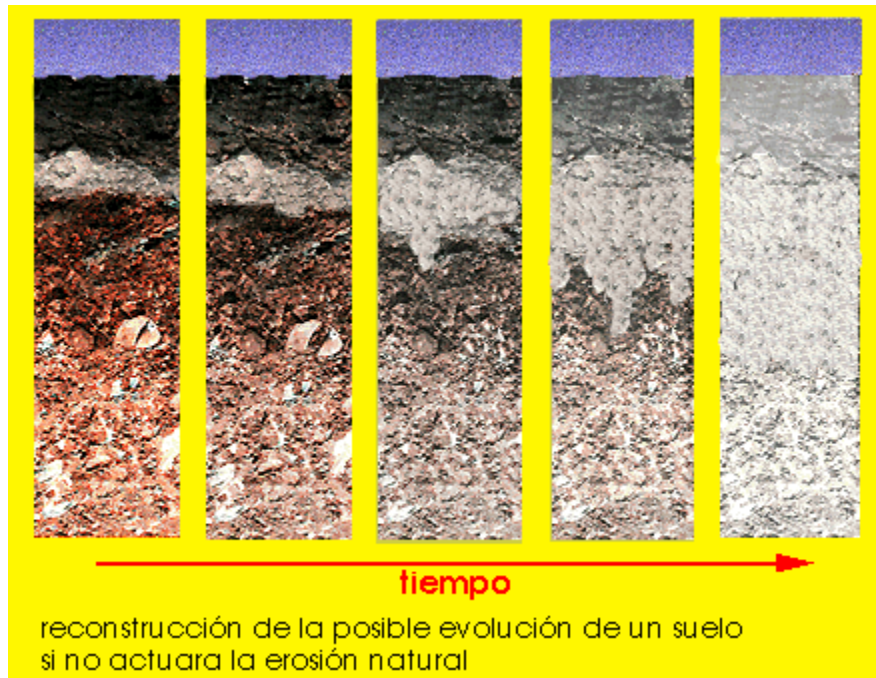


Ilustración 8. Reconstrucción de la posible evolución de un *suelo*

Afortunadamente este panorama aterrador no se presenta precisamente debido a la erosión geológica. Esta lenta erosión va decapitando lentamente las capas superiores de los suelos con lo que va disminuyendo el espesor del suelo y este se va progresivamente profundizando hacia capas más internas donde se encuentra el material original sin transformar (para mantener su profundidad de equilibrio con las condiciones ambientales).

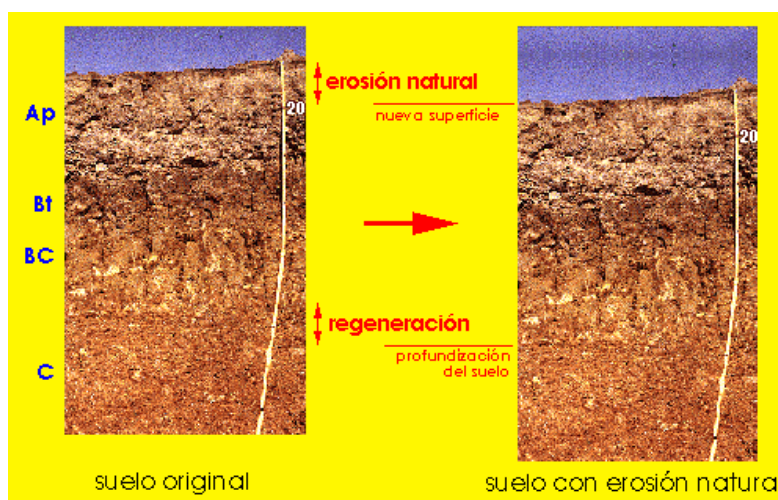


Ilustración 9. Comparación de suelo original y suelo con erosión natural

Así, de esta manera se van incorporando continuamente nuevos materiales al suelo (materiales frescos, no alterados, con abundantes minerales que al alterarse aportan nutrientes a los suelos). El tipo de suelo será siempre el mismo (mientras no se produzca un cambio en las condiciones ambientales) pero, ¡se irá desplazando con el tiempo! Hacia el interior de la tierra en los relieves planos y caminando lateralmente en los relieves colinados (los valles se van ensanchando).

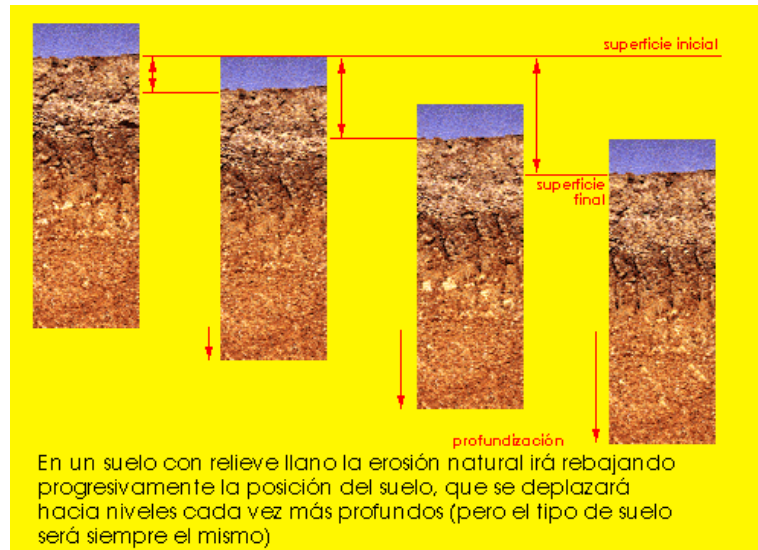


Ilustración 10. Relieves de erosión plana

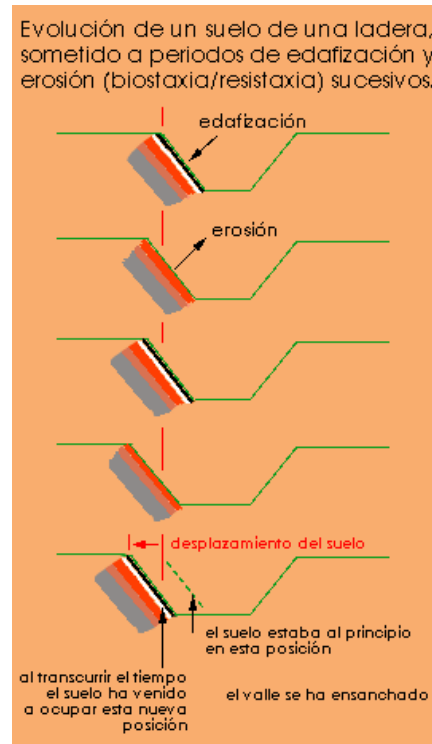


Ilustración 11. Relieves colinados

Contaminación: el suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en el comportamiento de los suelos.

La FAO define la contaminación como una forma de degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo.

El diccionario de la Real Academia define la contaminación como la alteración de la pureza de alguna cosa, como los alimentos, el agua, el aire, etc.

La acumulación de sustancias tóxicas para los organismos suele producirse de una manera artificial, como consecuencia de las actividades humanas, pero también puede ocurrir de manera natural, la edafización libera sustancias contenidas en las rocas (heredadas o neoformadas) que se concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos.

1.1.3.3. CONSECUENCIAS DE LA DEGRADACIÓN

La degradación tiene importantes consecuencias. Veamos las referidas al suelo en sí mismo y dejaremos las medioambientales y socioeconómicas para otras disciplinas (avalanchas, inundaciones, empobrecimientos, migraciones, etc).

- Pérdida de elementos nutrientes (N, P, S, K, Ca, Mg.). Puede ser de manera directa, bien al ser eliminados por las aguas que se infiltran en el suelo o bien por erosión a través de las aguas de escorrentía, o de una forma indirecta, por erosión de los materiales que los contienen o que podrían fijarlos.
- Modificación de las propiedades fisicoquímicas: acidificación, desbasificación y bloqueo de los oligoelementos que quedan en posición no disponible.
- Deterioro de la estructura. La compactación del suelo produce una disminución de la porosidad, que origina una reducción del drenaje y una pérdida de la estabilidad: como consecuencia se produce un encostramiento superficial y por tanto aumenta la escorrentía.
- Disminución de la capacidad de retención de agua: por degradación de la estructura o por pérdida de suelo. Esta consecuencia es especialmente importante para los suelos andaluces sometidos a escasas precipitaciones anuales.
- Pérdida física de materiales: erosión selectiva (parcial, de los constituyentes más lábiles, como los limos) o masiva (pérdida de la capa superficial del suelo, o en los casos extremos de la totalidad del suelo).
- Incremento de la toxicidad. Al modificarse las propiedades del suelo se produce una liberación de sustancias nocivas.

En definitiva, se produce un empeoramiento de las propiedades del suelo y una disminución de la masa de suelo. Estos efectos tienen dos consecuencias generales: a corto plazo, disminución de la producción y aumento de los gastos de explotación (cada vez el suelo necesita mayor cantidad de abonos y cada vez produce menos). A largo plazo: infertilidad total, abandono, desertización del territorio.

1.1.4.DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DEL SUELO

Si bien es cierto que la erosión puede ser un agente muy activo capaz de ocasionar una pérdida de materia orgánica, en ocasiones muy importante, la degradación biológica sólo considera la disminución del contenido de materia orgánica humificada del suelo como consecuencia de la mineralización de la misma y, en consecuencia, en su evaluación nos centraremos en los procesos que aumentan la velocidad de mineralización del humus.

La pérdida de la biodiversidad (organismos vivos) y de la materia orgánica (organismos de origen animal y vegetal, parcial y/o totalmente descompuestos o transformados) constituyen los efectos más notorios debidos a la ocurrencia de los procesos de degradación biológica. Esto repercute sobre diferentes funciones del suelo como, entre las más importantes para suelos agrícolas están la transformación, reciclado y posterior asimilación de los nutrientes por las plantas. También el acomodamiento y la persistencia de los minerales del suelo en unidades específicas (estructura) que contribuyen a sostener el espacio poroso que va a asegurar el traslado del agua de lluvia y/o de riego por el suelo y la eliminación de los excesos. Además del desplazamiento del aire dentro y fuera del suelo. Está ampliamente demostrado que el uso intensivo del suelo y la aplicación de tecnología inadecuada se constituyen en las principales causas de la ocurrencia de estos procesos de degradación biológica en suelos agrícolas (Pisticelli, 2015).

Los parámetros ambientales que más condicionan la actividad microbiana son la temperatura y la humedad edáficas. Respecto a la humedad del suelo, juega un papel de primera magnitud en los procesos de humificación¹² y mineralización¹³. La repercusión de un contenido en humedad alto es máxima cuanto mayor sea la temperatura del suelo, lo cual normalmente sucede durante la primavera. Por el contrario, para bajos niveles de humedad, la actividad microbiana es reducida y la mineralización es pequeña. No obstante, lo anterior, algunos microorganismos aerobios responsables de la mineralización pueden tener una actividad apreciable aún con contenidos de humedad próximos al punto de marchitez¹⁴ de las plantas.

Estos procesos adquieren una importancia especial en los ambientes áridos y semiáridos.

Cuando tiene lugar una degradación biológica, el resultado inmediato es la pérdida de materia orgánica, cuyas consecuencias principales son un aumento de la degradación física, una pérdida de nutrientes y un aumento de la escorrentía que acelera el proceso de la erosión hídrica.

La potente aireación del suelo como consecuencia del laboreo continuado, colabora de forma muy intensa en favorecer la actividad microbiana aerobia, responsable de realizar los procesos anteriores. A lo anterior, hay que sumar el hecho de que en un suelo sometido a laboreo la temperatura del mismo durante la primavera y el verano es mayor que la de otro al que no se le han dado labores, lo que activará la acción de los microorganismos. Por tanto, la actividad antrópica va a influir de forma decisiva sobre la degradación biológica.



Ilustración 12. Acumulación de hojarasca de *Medicago strasserii*

Desde esta óptica, el laboreo innecesario que requieren los barbechos, al airear y "ahuecar" la capa de laboreo, favorece el desarrollo de la actividad microbiana aerobia. Consecuentemente, la pérdida de la materia orgánica provocada, va a influir sobre el manejo del suelo y la cubierta vegetal.

La velocidad de descomposición varía según la textura del suelo, siendo más rápida en los arenosos que en los arcillosos, así como de la naturaleza de la materia orgánica (especialmente de la razón C/N o de ácidos fúlvicos¹⁵/ácidos húmicos¹⁶), del pH, del porcentaje de CaCO₃ y del contenido de agua superior a la capacidad de campo ya que la falta de aireación disminuye considerablemente la velocidad de descomposición del humus.

Respecto a la acidez del suelo, ésta tiene escaso efecto sobre la degradación biológica en tanto el pH se halle comprendido entre 4,5 y 7,5, pero fuera de éste umbral la velocidad de descomposición se ve reducida. Tal es el caso de los suelos sulfúricos y sódicos.

La orientación de la ladera (solanas o umbrías) influye indirectamente en la medida que condiciona tanto la temperatura como la humedad del suelo. Del mismo modo, la altitud influirá indirectamente en razón de su efecto sobre la temperatura.

Por el contrario, el papel que ejerce la pendiente tendrá mayor o menor repercusión en la medida de que sea la responsable de generación de escorrentía y, por tanto, actuando indirectamente sobre la humedad del suelo.

Sin embargo, interesa más el equilibrio entre la adición de materia orgánica y la pérdida debida por mineralización del humus que la descomposición en sí, ya que la degradación biológica sólo existirá cuando el balance sea negativo.

Este balance negativo se ha venido propiciando desde la PAC al subvencionar la retirada de tierras que habían de entrar en una rotación, es decir, estimulando el barbecho blanco, lo que ha sido especialmente perjudicial en aquellas zonas áridas y semiáridas. Esta técnica de laboreo, medida encaminada a mantener el suelo desnudo, favorece un incremento de la temperatura del suelo, lo que acarrea una mayor velocidad de mineralización de la materia orgánica humificada.

Otros factores antrópicos que influyen sobre este tipo de degradación y relacionados con el manejo del suelo, son aquellos que inciden directamente sobre la cantidad de residuos que se dejen tras las cosechas o sobre el grado de cobertura vegetal que los cultivos otorgan al suelo (Bienes & Marqués, 2015).

Los suelos de ecosistemas áridos y semiáridos pueden presentar degradación biológica asociada al cambio de uso de suelo, la cual tiene como consecuencia la pérdida o disminución de la capacidad de estos para proporcionar servicios ambientales (Campuzano, 2022).

La degradación biológica del suelo se refiere a la disminución de la actividad biológica y la biodiversidad en el suelo debido a la presencia de contaminantes:

- Reducción de la actividad microbiana: Los contaminantes pueden ser tóxicos para los microorganismos del suelo, disminuyendo la descomposición de la materia orgánica y afectando la cicatrización de nutrientes esenciales para las plantas.
- Pérdida de biodiversidad: La contaminación puede llevar a la pérdida de especies vegetales, animales y microorganismos, afectando la estructura y función de los ecosistemas del suelo.
- Disminución de la materia orgánica: Los contaminantes pueden interferir con la descomposición de la materia orgánica, reduciendo su contenido en el suelo y disminuyendo la fertilidad y productividad del mismo.

1.2. IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN EN EL SUELO

El suelo es un recurso finito, lo que significa que su pérdida y degradación no es recuperable en el transcurso de una vida humana. Los suelos afectan a los alimentos que comemos, al agua que bebemos, al aire que respiramos, a nuestra salud y la de todos los organismos del planeta. Sin suelos sanos no podríamos producir nuestros alimentos. De hecho, se calcula que el 95% de nuestros alimentos se producen directa o indirectamente en los suelos.

Unos suelos sanos son la clave para la seguridad alimentaria y para un futuro sostenible. Ayudan a mantener la producción de alimentos, a mitigar y adaptarse al cambio climático, filtrar el agua, mejorar la resiliencia ante inundaciones y sequías y mucho más. Sin embargo, una amenaza invisible está poniendo en peligro los suelos y todo lo que nos ofrecen.

La contaminación del suelo provoca una reacción en cadena. Altera la biodiversidad del suelo, reduciendo la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro. También se contamina el agua almacenada en el suelo y el agua subterránea, provocando un desequilibrio de sus nutrientes. Entre los contaminantes del suelo más comunes se encuentran los metales pesados, los contaminantes orgánicos persistentes y los contaminantes emergentes, como los productos farmacéuticos y los destinados al cuidado personal.

La contaminación del suelo es devastadora para el medio ambiente y tiene consecuencias para todas las formas de vida a las que afecta. Las prácticas agrícolas insostenibles reducen la materia orgánica del suelo y pueden facilitar la transferencia de contaminantes a la cadena alimentaria. Por ejemplo, el suelo contaminado puede liberar contaminantes en las aguas subterráneas que luego se acumulan en los tejidos de las plantas y pasan a los animales que pastan, a las aves y finalmente a los humanos que se alimentan de las plantas y los animales. Los contaminantes en el suelo, aguas subterráneas y en la cadena alimentaria pueden causar diversas enfermedades y una excesiva mortalidad en la población, desde efectos agudos a corto plazo como intoxicaciones o diarrea, hasta otros crónicos a largo plazo, como el cáncer.

Más allá del impacto en el medio ambiente, la contaminación del suelo tiene también un elevado coste económico, debido a la reducción de los rendimientos y la calidad de los cultivos. La prevención esta contaminación debería ser una prioridad en todo el mundo. El hecho de que la gran mayoría de los contaminantes sean resultado de la acción humana significa que somos directamente responsables de realizar los cambios necesarios para garantizar un futuro con menos contaminación y más seguro.

Los suelos deben ser reconocidos y valorados por su capacidad productiva, así como por su contribución a la seguridad alimentaria y al mantenimiento de servicios ecosistémicos clave. He aquí algunas razones por las que la contaminación del suelo no puede subestimarse:

1. La contaminación del suelo afecta a todos los ámbitos. Los alimentos que comemos, el agua que bebemos, el aire que respiramos, nuestra salud y la de todos los organismos del planeta dependen de un suelo sano. El contenido de nutrientes de los tejidos de una planta está directamente relacionado con el contenido de nutrientes del suelo y su capacidad para intercambiar nutrientes y agua con las raíces de esa planta.
2. La contaminación del suelo es invisible. Hoy en día, un tercio de nuestros suelos están moderadamente o muy degradados debido a la erosión, la pérdida de carbono orgánico, la salinización, compactación, acidificación y la contaminación química. Se necesitan aproximadamente 1 000 años para formar 1 cm de capa arable superficial, lo que significa que no podremos producir más suelo en el transcurso de nuestras vidas. El suelo que vemos es todo el que hay disponible. Sin embargo, los suelos se enfrentan aún a más presión debido a la contaminación. La tasa actual de degradación del suelo amenaza la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades más básicas.
3. La contaminación del suelo afecta a su capacidad de filtrado. Los suelos actúan de filtro y amortiguador para los contaminantes. Pero el potencial del suelo para hacer frente a esta presión es finito. Si se supera la capacidad del suelo para protegernos, los contaminantes se filtrarán (y se filtran) a otros elementos del entorno, como nuestra cadena alimentaria.
4. La contaminación del suelo afecta a la seguridad alimentaria al reducir el rendimiento y la calidad de los cultivos. Unos alimentos inocuos, nutritivos y de buena calidad solo pueden producirse si nuestros suelos se mantienen sanos. Si no lo están, no podremos producir suficientes alimentos para alcanzar el #HambreCero.
5. La contaminación del suelo puede ser resultado de malas prácticas agrícolas. Las prácticas agrícolas insostenibles reducen la materia orgánica del suelo, comprometiendo su capacidad para degradar los contaminantes orgánicos. Esto aumenta el riesgo de que los contaminantes se liberen al

medio ambiente. En muchos países, la producción agrícola intensiva ha agotado los suelos, poniendo en peligro nuestra capacidad para mantener la producción en estas áreas en el futuro. Por lo tanto, las prácticas de producción agrícola sostenible se han convertido en un imperativo para revertir la tendencia a la degradación del suelo y garantizar la seguridad alimentaria actual y futura a nivel mundial.

6. La contaminación del suelo puede poner en riesgo nuestra salud. Una parte importante de los antibióticos –utilizados ampliamente en la agricultura y en el ámbito de la salud humana– se liberan en el medio ambiente tras ser excretados del organismo al que se les administró. Estos antibióticos pueden filtrarse en los suelos y propagarse en el ambiente. Esto produce bacterias resistentes a los antimicrobianos, lo que disminuye la eficacia de los antibióticos. Cada año, unas 700 000 muertes son atribuibles a bacterias resistentes a los antimicrobianos. Para 2050, si no se ataja el problema, la resistencia a los antimicrobianos matará a más personas que el cáncer y tendrá un coste global mayor que el actual volumen de la economía mundial.

Con una población mundial que se proyecta supere los 9 000 millones en 2050, nuestra seguridad alimentaria actual y futura dependerá de nuestra capacidad para aumentar los rendimientos y la calidad de los alimentos utilizando los suelos que tenemos disponibles en la actualidad. Su polución nos afecta negativamente a todos, y se ha identificado como una de las principales amenazas para las funciones del suelo en todo el mundo.

Debemos ser conscientes de las causas de la contaminación del suelo para poder encontrar e implementar soluciones. La protección y conservación del suelo comienza con nosotros mismos. Elegir alimentos sostenibles, reciclar adecuadamente desechos peligrosos como las baterías, hacer compostaje en casa para reducir la cantidad de desechos que se llevan a los vertederos o manejar los residuos de antibióticos de manera más responsable, son solo algunos ejemplos de cómo podemos ser parte de la solución. En una escala mayor, debemos promover prácticas agrícolas sostenibles en nuestras comunidades.

Un suelo sano es un recurso precioso, no renovable y que se ve cada vez más amenazado por comportamientos humanos destructivos. Somos responsables de los suelos que nos proporcionan alimentos, agua y aire, y tenemos que tomar medidas hoy para asegurar que haya suelos sanos para un futuro sostenible y con seguridad alimentaria. ¡Sé la solución a la contaminación del suelo! (FAO, 2015).

1.3. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES

Tabla 4. Complementos educativos del tema 1. Introducción

COMPLEMENTOS EDUCACIONALES		
Tema 1: Introducción		
1.1 Propiedades del suelo afectadas por contaminantes.	Actividad 1. Ejercicios/Caso Prácticos	
	Actividad	Identificar los suelos contaminados y las características sobresalientes a simple vista.
	Instrucciones	Recorrer áreas para identificar de manera visual los tipos de afecciones en suelos contaminados.
	Herramienta tecnológica	Power Point
1.2 Impacto de la contaminación en el suelo.	Actividad 2. Infografías	
	Actividad	Mapa Mental
	Instrucciones	Elaborar un mapa mental con los resultados obtenidos del recorrido por áreas afectadas, comparando los tipos de contaminantes.
	Herramienta tecnológica	Canvas
1.2 Impacto de la contaminación en el suelo.	Actividad 3. Estudio de casos	
	Actividad	Descripción sobre los contaminantes en el suelo
	Instrucciones	En apoyo a la plataforma digital de importancia científica que se adjunta, rescatar la información relevante y estructurar mediante Word avanzado un cuadro que incluya: Título, año y/o

		revista, autor, región, características e impacto en la región.
	Herramienta tecnológica	Word Avanzado
	Material Digital	Artículo de revista: https://n9.cl/xna8tg

TEMA 2. TIPOS DE AFECCIONES AL SUELO

2.1. POR DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES

Las descargas de aguas residuales en el suelo representan una amenaza significativa para su salud y funcionalidad. A través de contaminantes químicos, alteraciones biológicas, eutrofización, salinización y cambios en el pH, las aguas residuales afectan tanto la fertilidad del suelo como su capacidad de soporte para vegetación y fauna. Esta investigación analiza los tipos principales de afecciones al suelo por descarga de aguas residuales, enfatizando los mecanismos de contaminación y sus consecuencias ambientales.

2.1.1. CONTAMINACIÓN QUÍMICA POR METALES PESADOS Y COMPUESTOS ORGÁNICOS

La descarga de aguas residuales contiene contaminantes químicos, como metales pesados y compuestos orgánicos, que se acumulan en el suelo y pueden generar efectos tóxicos. Los metales pesados, como el plomo, mercurio y cadmio, afectan la estructura química del suelo, disminuyen su fertilidad y afectan negativamente el crecimiento de las plantas.

- Impacto en la vegetación y fauna: Estos contaminantes limitan la capacidad del suelo para sustentar vegetación y representan un riesgo de bioacumulación en la cadena alimentaria.
- Contaminantes persistentes: Los pesticidas y otros compuestos orgánicos pueden persistir en el suelo durante años, causando efectos tóxicos a largo plazo.

2.1.2. EUTROFIZACIÓN DEL SUELO

La eutrofización es el aumento descontrolado de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, debido a la infiltración de aguas residuales. Aunque estos nutrientes son esenciales, su exceso desencadena el crecimiento excesivo de

microorganismos y plantas invasoras, afectando el equilibrio del suelo y su biodiversidad.

- Efectos en la biodiversidad: La eutrofización favorece el crecimiento de ciertas plantas invasoras, desplazando a especies nativas y afectando la salud del suelo.
- Consecuencias en la retención de agua: La pérdida de biodiversidad en el suelo reduce su capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes, lo que lo vuelve más susceptible a la erosión.

2.1.3. SALINIZACIÓN DEL SUELO

La salinización ocurre cuando las aguas residuales ricas en sales se filtran en el suelo, acumulando sales que afectan la absorción de agua y nutrientes por las raíces de las plantas. Este proceso es especialmente perjudicial en suelos agrícolas, pues reduce la productividad y afecta la vegetación nativa.

- Reducción de la productividad agrícola: La alta concentración de sales limita el crecimiento de cultivos sensibles y reduce el rendimiento de los mismos.
- Deterioro de la estructura del suelo: La salinidad endurece la estructura del suelo, afectando su porosidad y capacidad de retención de agua.

2.1.4. ALTERACIÓN BIOLÓGICA DEL SUELO

Las aguas residuales modifican la comunidad microbiana del suelo, eliminando bacterias y hongos beneficiosos y favoreciendo el crecimiento de patógenos. Este cambio en la microbiota afecta los ciclos naturales de descomposición y nutrición del suelo.

- Pérdida de microorganismos beneficiosos: Las bacterias y hongos esenciales para la salud del suelo se ven reducidos, afectando su capacidad de reciclar nutrientes.
- Incremento de patógenos: Los patógenos presentes en aguas residuales representan un riesgo para la vegetación y fauna del suelo, y pueden afectar la salud humana si entran en contacto con la cadena alimentaria.

2.1.5. CAMBIOS EN EL PH DEL SUELO

Las aguas residuales pueden alterar el pH del suelo, haciéndolo más ácido o alcalino según su composición. Esto afecta la disponibilidad de nutrientes esenciales, limita la actividad microbiana y reduce la productividad agrícola.

- Disponibilidad de nutrientes: Los cambios en el pH impiden la absorción de nutrientes como fósforo, potasio y otros elementos esenciales para el crecimiento de las plantas.
- Erosión y degradación del suelo: La modificación del pH puede desestabilizar la estructura del suelo y aumentar su susceptibilidad a la erosión, lo cual acelera su deterioro.



Ilustración 13. Aguas residuales

2.2. POR METALES

La presencia en los suelos de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos (contaminantes) es un tipo especial de degradación que se denomina contaminación. El contaminante está siempre en concentraciones mayores de las habituales (anomalías) y en general tiene un efecto adverso sobre algunos organismos. Por su origen puede ser geogénico o antropogénico. Los primeros pueden proceder de la propia roca madre en la que se formó el suelo, de

la actividad volcánica o del lixiviado de mineralizaciones. Por el contrario, los antropogénicos se producen por los residuos peligrosos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras, etc. y de los residuos sólidos urbanos. Desde un punto de vista legal, los contaminantes antropogénicos son los verdaderos contaminantes.

La toxicidad de un elemento o compuesto químico es la capacidad que tiene ese material de afectar adversamente alguna función biológica. Los materiales o compuestos tóxicos no tienen origen biológico, excepto el caso particular de las toxinas que son compuestos tóxicos biogénicos.

Los contaminantes pueden abandonar un suelo por volatilización, disolución, lixiviado o erosión, y pasar a los organismos cuando pueden ser asimilables (bioasimilables), lo que normalmente ocurre cuando se encuentran en forma más o menos soluble. En concreto, la posibilidad de que un elemento (contaminante o no) quede libre y pase a disolución en un suelo se llama disponibilidad. La biodisponibilidad sería el grado de libertad en que se encuentra un elemento o compuesto de una fuente potencial para ser capturado por un organismo (ingerido o adsorbido) (Newman & Jagoe, 1994). Normalmente sólo una fracción pequeña de una sustancia potencialmente contaminante de un medio es biodisponible. Su efecto suele ser negativo, pero también puede ser indiferente para un organismo específico.

2.2.1. METALES PESADOS Y ELEMENTOS TRAZA

La tabla periódica incluye unos 70 elementos metálicos, y de ellos 59 pueden ser considerados “metales pesados”, que son aquellos con peso atómico mayor que el del hierro (55,85 g/mol). Con esta precisión se excluirían metales con pesos atómicos menores que el del Fe y que con frecuencia pueden ser metales contaminantes, como el V (50,95), Mn (54,44), Cr (52,01) y a otros que realmente no son metales como As, F y P. Por ello, resulta mejor hablar de contaminación por “elementos traza”, si bien hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados”. A veces, la contaminación del suelo se puede producir también por altas concentraciones de elementos mayoritarios (Na, Fe, Al).

Los elementos traza están presentes en relativamente bajas concentraciones (mg.kg^{-1}) en la corteza de la Tierra, suelos y plantas. Muchos de ellos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de plantas, animales y seres humanos (Tabla 1, Figura 1), aunque también pueden ser tóxicos si se superan ciertos umbrales. En general todos los elementos traza son tóxicos si se ingieren o inhalan en cantidades suficientemente altas y durante largos períodos de tiempo. Selenio, flúor y molibdeno son ejemplos de elementos que presentan un estrecho margen (del orden de unas pocas ppm) entre los niveles de deficiencia y los tóxicos (Plant et al., 2001).

2.2.2. PODER DEPURADOR DE LOS SUELOS

El suelo actúa en general como una barrera protectora de otros medios más sensibles (hidrológicos y biológicos), filtrando, descomponiendo, neutralizando o almacenando contaminantes y evitando en gran parte su biodisponibilidad. Esta capacidad depuradora de un suelo depende de los contenidos en materia orgánica, carbonatos y oxihidróxidos de hierro y manganeso, de la proporción y tipo de minerales de la arcilla, de la capacidad de cambio catiónico del suelo, del pH y Eh, textura, permeabilidad y actividad microbiana. Por tanto, para cada situación, el poder depurador de un suelo tiene un límite. Cuando se superan esos límites para una o varias sustancias, el suelo funciona como contaminado y es fuente de contaminantes.

El poder amortiguador de un suelo representa la capacidad que tiene para controlar los efectos negativos de los contaminantes y volverlos inocuos o inactivos. Para los suelos agrícolas se ha definido la denominada “Capacidad de Carga para Metales Pesados” (LCASHM: Load Capacity of Agricultural Soils for Heavy Metals) (Cheng et al. 2001), que depende de las propiedades del suelo, el tipo e historia de la contaminación, organismos indicadores de la toxicidad, y otros parámetros ambientales.

Los efectos amortiguadores de los suelos se llevan a cabo por neutralización, degradación biótica o abiótica, precipitación-disolución, oxidación-reducción, formación de complejos orgánicos o insolubilización. La cantidad máxima admisible

de un contaminante, a partir de la que el contaminante está biodisponible en cantidades que pueden ser tóxicas, se llama carga crítica y marca el umbral de toxicidad.

2.2.3. EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS TRAZA EN LOS SUELOS

Los elementos trazados en los suelos pueden ser geogénicos o antropogénicos. Los primeros dependen en gran medida de lo que se ha llamado geodisponibilidad. La geodisponibilidad de un elemento o compuesto químico de un material terrestre es aquella porción de su contenido total que puede liberarse a la superficie o cerca de la superficie (o biosfera) por procesos mecánicos, químicos, o biológicos (Plumlee, 1994).

Por tanto, los metales pesados geodisponibles son los que pasan de la roca madre a los suelos tras ser liberados por meteorización, y constituyen, junto a otros procedentes de emisiones volcánicas y lixiviados de mineralizaciones, los denominados como geogénicos. La liberación de los elementos depende de la estructura y estabilidad termodinámica de los minerales de la roca. Las estructuras altamente polimerizadas son más estables y resistentes a la destrucción.

La liberación de cationes de una roca por meteorización depende de muchos parámetros, como antes se indicó, clima, topografía, capacidad de drenaje de la roca (permeabilidad), tiempo, y particularmente la actividad biológica.



Ilustración 14. Movilidad de elementos traza y su incorporación a los suelos

El papel de los microorganismos en la degradación de los minerales es muy importante. De hecho, participan en los ciclos geoquímicos de los principales nutrientes y de muchos elementos traza en la mayor parte.

La geodisponibilidad de los elementos de las rocas y su aportación al suelo es insignificante en relación con las derivadas de las acciones antropogénicas. Los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de la edafización de una roca se concentran, pero en general sin rebasar los umbrales de toxicidad, y aunque así fuera, estos metales se encuentran en formas estables y por tanto poco disponibles.

Los minerales petrogenéticos son las primeras fuentes de nutrientes (K, Ca, Mg, Fe, P, Cu, Zn) desde hace más de 3.000 m.a. (bacterias)

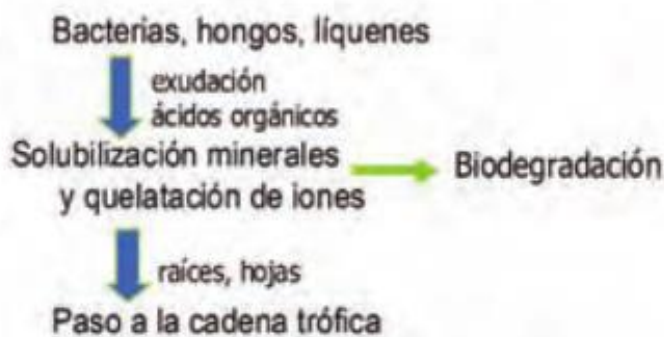


Ilustración 15. El papel fundamental de los microorganismos en la transformación y degradación de los minerales

La movilidad de un metal depende no sólo de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo tales como pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de la arcilla, etc. Así, no todos los cationes de cambio están igualmente disponibles, sino que depende del mineral o minerales de los que están formando parte como complejo de cambio. No será igual si se encuentran en una esmectita en una illita. Cuando el metal está precipitado, no se comportará igual si lo hace como carbonato, sulfato o fosfato. Tampoco será lo mismo que el metal se encuentre formando parte de un sulfuro (relativamente oxidable y solubilizable) que de un silicato (prácticamente resistente en todos los medios).

En general, la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Por eso la presencia de altas concentraciones en el horizonte superior decrece drásticamente en profundidad cuando la contaminación es antrópica. Esto sucede precisamente porque la disponibilidad de un elemento depende también de las características del suelo en donde se encuentra. Los parámetros geoedáficos llegan a ser esenciales para valorar la sensibilidad de los suelos a la agresión de los contaminantes; en concreto:

- a) pH: La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, excepto As, Mo, Se y Cr, que son más móviles a pH alcalino.
- b) Textura: Los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales de la arcilla. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminarse el nivel freático.
- c) Mineralogía de arcillas: Cada mineral de la arcilla tiene unos determinados valores de superficie específica y de descompensación eléctrica. Cuanto mayor es la superficie activa de un filosilicato, mayores son sus posibilidades de adsorber metales.

Este poder de adsorción será máximo en el punto de carga cero superficial, cuando su competencia con los H es mínima, lo que se consigue a

diferentes pH según el mineral (Sposito, 1989) (Tabla 6). Sin embargo, la importancia de los minerales de la arcilla como adsorbentes es secundaria cuando en un suelo existe abundante materia orgánica y/o oxihidróxidos de hierro, componentes + más competitivos (Galán, 2000).

- d) **Materia orgánica:** Reacciona con los metales formando complejos de cambio o quelatos. La adsorción puede ser tan fuerte que queden estabilizados, como el caso del Cu, o formen quelatos también muy estables, como puede pasar con el Pb y Zn. En muchos casos se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad del metal, la disponibilidad y dispersión porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto conduce a una persistencia de la toxicidad.
- e) **Capacidad de cambio:** El poder de intercambio catiónico depende del tipo de minerales de la arcilla, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menos frecuentemente quedan retenidos. Respecto a los minerales de la arcilla, la retención es mínima para los minerales del grupo del caolín, baja para las illitas, alta para las esmectitas y máxima para las vermiculitas.
- f) **Condiciones redox:** El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido. Los diagramas Eh-pH se utilizan para mostrar la estabilidad de los compuestos metálicos y proporcionan un método fácil para predecir el comportamiento de los metales pesados frente a un cambio de las condiciones ambientales.

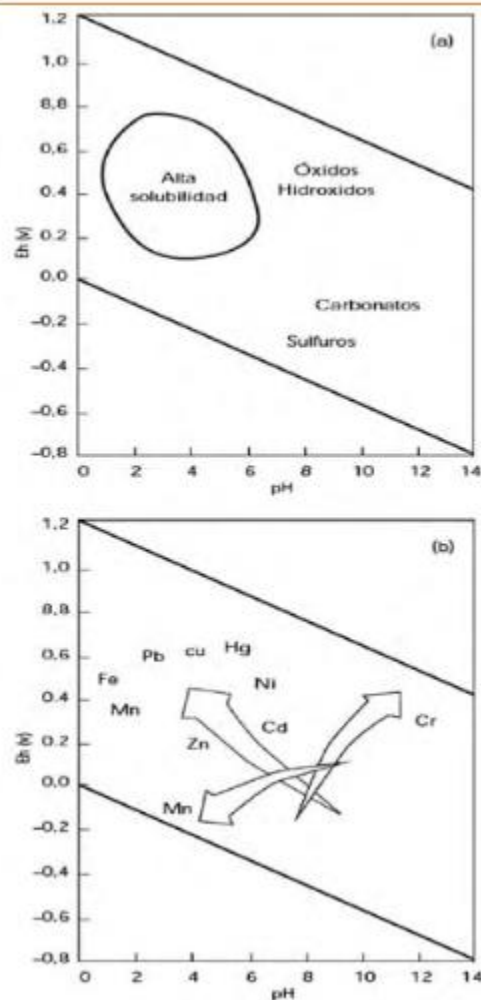


Ilustración 16. Solubilidad de metales pesados en función del pH y Eh (a) los principales minerales que controlan la solubilidad de los metales pesados; (b) tendencia de incremento de la solubilidad

- g) Carbonatos: La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de los altos pH, y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados. El Cd y otros metales tienden a quedar adsorbidos por los carbonatos.
- h) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn: Juegan un importante papel en la retención de metales pesados y en su inmovilización. Se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y pequeño tamaño de partícula, tienen una alta capacidad

sorcitiva para metales divalentes, especialmente Cu y Pb, y en menor extensión Zn, Co, Cr, Mo, Ni y también As.

- i) Salinidad: El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos. Primeramente, los cationes Na y K pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico. En una segunda fase, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg. Por otra parte, las sales normalmente dan pH alcalino

2.3. POR EL USO DE FERTILIZANTES

Si bien los fertilizantes químicos brindan nutrientes a las plantaciones agrícolas, si se abusa de ellos, pueden suponer un peligro para el medio ambiente. Y es que el excedente de nutrientes contamina suelos y aguas.

Esto se debe a las pautas de producción y utilización actuales, además de a una falta de gestión eficiente. Ello no es sostenible y, además, conlleva efectos negativos para la salud.

A continuación, listamos los mayores inconvenientes de utilizar estas sustancias en demasía:

- Problemas de salud

Se estima que se producen 385 millones de envenenamientos involuntarios anuales y 11 mil muertes por plaguicidas. Asimismo, un mal uso de los fertilizantes químicos puede incurrir en cánceres y otras consecuencias neurológicas, inmunológicas y reproductivas.

- Infertilidad de los suelos

Si bien los fertilizantes químicos contribuyen al desarrollo de las plantas, éstos no ayudan al suelo donde crecen. Es más, pueden causarle un importante daño. Los excesivos niveles de nutrientes de algunos fertilizantes químicos saturan la tierra, anulando la efectividad de otros nutrientes fundamentales. Todo ello lleva a la infertilidad de los suelos.

- Suelos ácidos

Los suelos también pueden resultar estériles por el aumento de acidez que los fertilizantes químicos provocan. Y es que muchos de ellos incorporan ácido sulfúrico y clorhídrico. Si se utilizan en exceso, pueden afectar negativamente a los microorganismos y al pH del suelo (y, por ende, al desarrollo de las plantas).

- Incremento peligroso de los microorganismos

En cambio, los fertilizantes químicos ricos en nitrógeno pueden tener el efecto contrario a los fertilizantes más ácidos. Y esto tampoco es positivo para los suelos. Demasiado nitrógeno incrementa el número de microorganismos. En caso de que su población sea excesiva, estos seres dañarán a las plantas en lugar de ayudarlas. Esto se debe a que consumen toda la materia orgánica y nutrientes del lugar.

- Contaminación de las aguas subterráneas

Como adelantábamos, las plantas únicamente pueden absorber una cantidad limitada de nutrientes. Por lo que, si aplicamos demasiados nutrientes sintéticos, el fertilizante se filtrará por el suelo, llegando a arroyos, ríos, mares y lagos. Por supuesto, la consecuencia es que estos fertilizantes químicos, mal empleados, pueden contaminar los suministros de agua potable.

- Exceso de crecimiento de las plantas

Dada la alta intensidad de los fertilizantes químicos, en ocasiones, éstos pueden provocar que las plantas adquieran demasiado tamaño para su salud. Las extremidades más largas y gruesas pueden dañar el follaje. Asimismo, un notable incremento de peso ejercería una presión indeseada sobre las raíces de los cultivos.

Si bien los fertilizantes pueden ser de gran ayuda para la agricultura, el uso excesivo de sustancias químicas está lejos de resultar sostenible. Por ello, cada vez más empresas apuestan por la producción de abonos ecológicos y biofertilizantes que contribuyan a las cosechas sin poner en riesgo al medio ambiente.

2.4. POR RESIDUOS SÓLIDOS

Los residuos sólidos ordinarios y los residuos sólidos peligrosos son causa de problemas ambientales en las áreas urbanas, rurales y especialmente en las zonas industrializadas de los municipios, ya que generan impacto ambiental negativo por el inadecuado manejo de los mismos y amenazan la sostenibilidad y la sustentabilidad ambiental. Es por esto que se debe tener especial cuidado en el manejo que se da a los residuos sólidos que generamos en nuestro hogar o en nuestro lugar de trabajo y estudio.

Sin embargo, para entender mejor esta problemática, definamos qué son los residuos sólidos: los residuos sólidos son sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido de los que su generador dispone o está obligado a disponer, es decir, se hace responsable de definir un destino para ellos.

Desde el momento en que disponemos nuestros residuos, estos empiezan un proceso de descomposición en subproductos que se presentan de manera líquida y gaseosa, recibiendo el nombre de lixiviados los que se descomponen en líquidos y de gases de descomposición los que se descomponen en gases.

Tipos de residuos sólidos según su origen:

Tabla 5. Tipos de Residuos Solidos

Tipos de residuos solidos	Origen de generación	Descripción	Ejemplo
Agropecuarios	En el desarrollo de las actividades agrícolas y pecuarias.	Envases de fertilizantes, plaguicidas, agroquímicos los cuales son residuos peligrosos.	

De las actividades de construcción	De las actividades de construcción y demolición de obras tales como: edificios, puentes, carreteras, represas, canales y otros afines.	Piedras, bloque, cemento, maderas, entre otros, mayormente desconocidos como desmonte.	
De los establecimientos de salud	En los hospitales, clínicas, centros de salud, laboratorios clínicos, consultorios, entre otros afines.	Agujas, gasas, algodones, órganos patológicos, restos de comida, papeles, embalajes, entre otros.	
De instalaciones de actividades especiales	En infraestructuras de gran dimensión, complejidad y riesgo en su operación.	Residuos de plantas de tratamientos de aguas residuales, puertos, aeropuertos, entre otros.	

El suelo es el recurso que más directamente se ve afectado por el inadecuado manejo de los residuos sólidos, ya que el ser humano a través de los años ha dispuesto en el suelo los residuos sólidos que ha generado. La contaminación de los suelos ocurre a través de diferentes elementos, como los lixiviados que se filtran a través del suelo afectando su productividad y acabando con la microfauna que habita en ellos (lombrices, bacterias, hongos y musgos, entre otros). Esto cual lleva a la pérdida de productividad del suelo, incrementando así el proceso de desertificación del suelo. La presencia constante de basura en el suelo evita la recuperación de la flora de la zona afectada e incrementa la presencia de plagas y animales que causan enfermedades, como ratas, palomas, cucarachas, moscas y zancudos.

2.5. POR HIDROCARBUROS

Los hidrocarburos tienen el poder de causar daños sumamente graves en humanos, como puede ser algún tipo de cáncer, por ejemplo. De ahí la necesidad de emitir información para influir en la minimización de los derrames de hidrocarburos. Una variedad de sustancias peligrosas contaminantes puede eliminarse mediante distintas tecnologías; una de ellas es la biorremediación, como una opción sumamente innovadora para reducir los efectos de pesticidas, herbicidas, petróleo y sus derivados y metales pesados, entre otros.

Las etapas que componen el procesamiento del petróleo son: explotación, transporte, refinamiento, almacenamiento y uso. Las alteraciones ambientales que cada una provoca varían, y son responsabilidad de diferentes sectores de la población y zonas donde se producen.

El transporte terrestre de hidrocarburos y demás sustancias químicas trae consigo accidentes, provocando con ellos el derrame de las sustancias transportadas.

El transporte más representativo es el carretero, lo cual implica un mayor riesgo, aunque los volúmenes transportados sean menores.

Las sustancias involucradas con mayor frecuencia son los hidrocarburos.

Las diferentes técnicas de remediación permiten elegir cuál es la más apropiada de acuerdo con las características y necesidades del sitio contaminado para así lograr el saneamiento adecuado conforme a las necesidades del ambiente y las posibilidades principalmente económicas de la empresa responsable del accidente.

Existe un gran número de sitios contaminados que requieren ser saneados, lo cual implica un gran costo para llevarse a cabo; esto obliga a buscar técnicas menos costosas por lo que creemos que la técnica más acorde con este tipo de necesidades es la biorremediación, que posee características que benefician tanto a la economía como al ambiente (Flores Puente, Torras Ortiz, & Téllez Gutiérrez, 2004).

2.6. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES

Tabla 6. Complementos educativos del Tema 2. Tipos de afecciones al suelo

COMPLEMENTOS EDUCACIONALES		
Tema 2: Tipos de afecciones al suelo		
2 tipos de afecciones en el suelo	Aprendizaje basado en proyectos	
	Actividad	Proyecto de campo para plantear estrategias de remediación de suelos contaminados.
	Instrucciones	El estudiante investiga el tipo de afectación del suelo con ello propone y aplicar propuesta de solución.
	Herramienta tecnológica	Power Point
2.1 Por descarga de aguas residuales 2.1 Por metales 2.3 Por el uso de fertilizantes 2.4 Por residuos sólidos 2.5 Por hidrocarburos	Ejercicios / Casos Prácticos	
	Actividad	Identificación de suelos contaminados
	Instrucciones	El estudiante Identifica los tipos de suelos contaminados: por descargas residuales, metales, fertilizantes, residuos sólidos e hidrocarburos
	Herramienta tecnológica	Word
2.1 Por descarga de aguas residuales 2.1 Por metales 2.3 Por el uso de fertilizantes 2.4 Por residuos sólidos 2.5 Por hidrocarburos	Presentaciones	
	Actividad	Exposición
	Instrucciones	Realizar búsqueda de información en diversas fuentes sobre la forma de afectación de los contaminantes al suelo.
	Herramienta tecnológica	Piktochart

TEMA 3. CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE SUELOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE UN SUELO

Se llama suelo al sistema estructurado, biológicamente activo y compuesto por tres fases (sólida, líquida y gaseosa), que tiende a desarrollarse en la superficie de las tierras emergidas por la influencia de los factores formadores.

Debido a que el suelo se involucra en muchas de las actividades de la sociedad es lógico que se confunda en su definición, por lo que para el curso debe aclararse sin dejar de considerar esas otras visiones.

El término “tierra” o suelo tiene muchas acepciones y son en algunos casos sinónimos; sin embargo, geográficamente “la tierra” es el planeta; para fines agropecuarios, es común también decir tierra o suelo en general, “tierras forestales”; un uso cotidiano, ¿dónde es tu tierra?, o sea, donde nace uno. El uso comercial como objeto de compra-venta, ¿cuánto vale el m² de tierra o la hectárea?; el ingeniero civil o arquitecto los aborda desde una perspectiva de diseño y construcción. En nuestro caso siempre estaremos hablando del suelo según su definición antes dicha.

La ciencia que estudia el suelo es la edafología, también conocida como pedología; aunque hay muchas ciencias afines y de las cuales varias sirven a la edafología, es importante en el contexto del curso el enfoque de la génesis, donde destacan los procesos edafogenéticos.

Las instituciones avocadas a su estudio son las universidades y algunas del gobierno federal como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y muchas de sus oficinas subalternas; la Secretaría de Educación Pública (SEP) y algunas de sus oficinas subalternas y universidades; el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), principalmente, aunque cada una de ellas no están coordinadas cotidianamente.

La morfología del suelo se refiere a los horizontes y las otras partes que componen al suelo, como las partes físicas, principalmente –como piedras, raíces, partículas

del suelo, materia orgánica, etc.– clases de horizontes y los perfiles como unidades de funcionamiento edafológico.

Son atributos observables ordinariamente descriptos a campo e incluyen: composición, forma, estructura de suelo, organización del suelo, color base del suelo y asuntos como moteados, distribución radicular, poros, evidencia de materiales traslocados como carbonatos, hierro, manganeso, carbono, arcilla, consistencia del suelo.

Clases de horizontes y los perfiles como unidades de funcionamiento edafológico

Esencialmente existen dos tipos de horizontes: los principales (H, O, A, B, C, etc.) y los de diagnóstico, que caracterizan los tipos de suelos como úmbrico, mólico, ándico, etcétera.

Existe una nomenclatura ejemplo A p que indica cultivo, pero hay otras que también indica alteración B w (w es intemperismo) y para los de diagnóstico según se ubiquen en la parte superior o medio del perfil al que hacen referencia, como epipedon úmbrico, horizonte argílico, etcétera, respectivamente.

Los suelos se diferencian de las rocas a nivel microscópico por la heterogeneidad que presentan. Esta heterogeneidad se pone de manifiesto en:

- Tamaño de las partículas
- Naturaleza de las partículas (minerales y orgánicas)
- Poros muy diversos
- Agrupamiento de las partículas
- Orientaciones de las partículas arcillosas, formando recubiertas o integradas en la matriz
- Nódulos y recubrimientos de compuestos de hierro y de manganeso

La heterogeneidad del suelo se manifiesta claramente al comparar los horizontes de un suelo evolucionado.

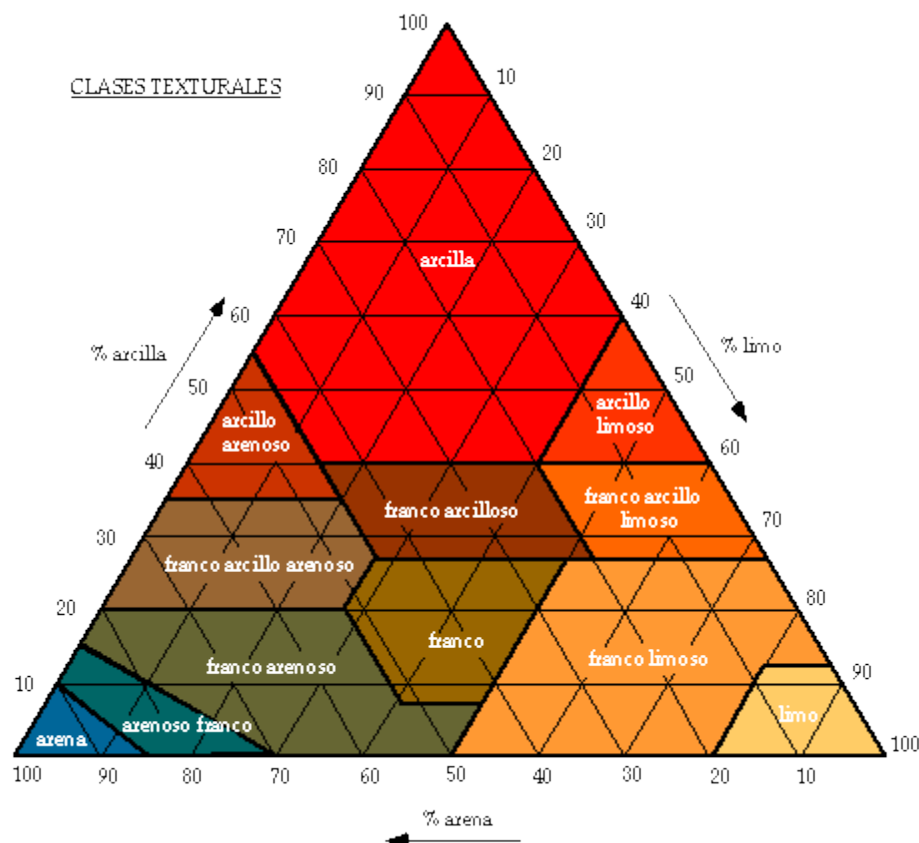


Ilustración 18. Triángulo de texturas

La estructura del suelo es la composición de las partículas minerales asociadas a la materia orgánica, las cuales se asocian de diferente manera dejando espacios entre ellos, o sea la porosidad, y se estudian desde una perspectiva de campo y del laboratorio con el microscopio de luz polarizada, de tal manera que podemos observar la fábrica del suelo.

La estructura se define en campo por la forma, el tamaño y el grado de desarrollo de los agregados del suelo, y para cada una de esas determinaciones existen nomenclaturas y también hay tres tamaños de agregados desde el microscopio, que son los microagregados, los mesoagregados y los macroagregados, y de igual manera se componen los poros como microporosidad, mesoporosidad y macroporosidad, cuyos tamaños van desde micrometros hasta milímetros.



Ilustración 19. Estructura del suelo

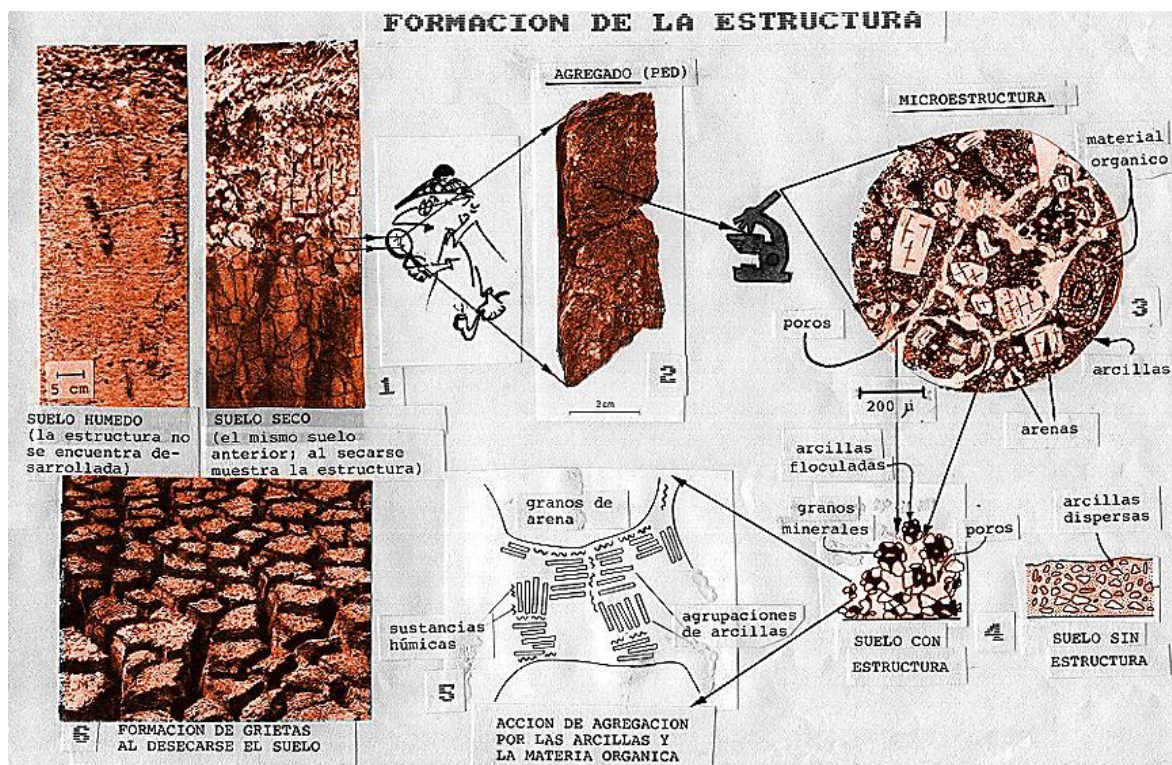


Ilustración 20. Formación de la estructura

El pH del suelo es una propiedad que nos indica el grado de saturación de bases del suelo; según el tipo de suelos, ellos tienden a ser más ácidos en la superficie y aumenta con la profundidad, pero eso no sucede para los alcalinos. El rango generalmente va de 3 a 9; los valores bajos corresponden a suelos de pantanos drenados y los valores elevados corresponden a los que contienen carbonato de sodio. La acidez del suelo se debe esencialmente a los iones de hidrógeno y aluminio; además, se relaciona fuertemente con los organismos que viven en suelo.

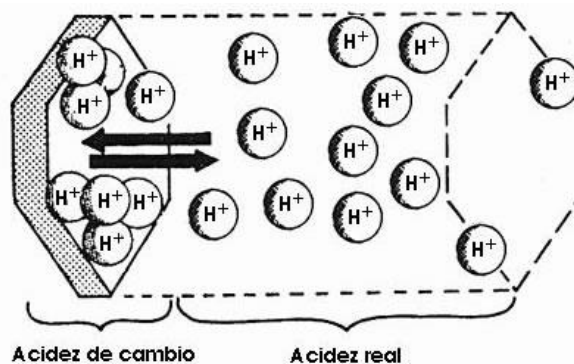


Ilustración 21. Acides del suelo

La materia orgánica son las sustancias compuestas de iones de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, fósforo y oxígeno, esencialmente, que se encuentran en los organismos vivos por ser parte de su cuerpo y en los desechos de ellos como son su excretas, todos ellas conforman un mundo complejo de sustancias como proteínas, lípidos, carbohidratos, con diferentes grados de descomposición y mineralización que van a contribuir a los ciclos de los elementos como el nitrógeno, el carbono y otros que aportan al suelo características distintas, según el tipo de suelo y de uso se podrá valorar su presencia.

Los cationes intercambiables para el suelo son esencialmente cuatro: sodio, potasio, calcio y magnesio, los cuales son muy solubles en agua y cuando llueve se “lavan” o lixivian, o sea migran hacia debajo de la superficie y depende del suelo si se pierden en el drenaje o se mantienen en la profundidad, pero al mismo tiempo son los nutrientes de las plantas o de los organismos del suelo que lo intercambian por otro ion de la misma magnitud y entonces si es alto ese intercambio se dice que esos suelos son fértiles, aunque la fertilidad no sólo va a depender de ese intercambio, ni de ese fenómeno, pues también interviene el pH y la materia orgánica.

3.2. MUESTREO DE SUELO PARA SU ANÁLISIS

El suelo es un medio donde las plantas crecen al obtener nutrientes esenciales y anclaje a través de las raíces. Para establecer cultivos incluyendo pasturas se deben diagnosticar las propiedades físicas, químicas y/o biológicas del suelo, para detectar limitaciones y poder determinar el uso más adecuado del recurso; este diagnóstico se realiza a partir de una muestra del suelo. La muestra constituye una mezcla de porciones de suelo (submuestras) tomadas con base en un patrón en un terreno homogéneo. Es importante que la muestra de suelos sea representativa del terreno que se desea evaluar y que refleje la tendencia composicional más que el promedio.

Los análisis de las muestras de suelos en los laboratorios cada vez mejoran los procesos de extracción y las técnicas analíticas de determinación, por lo que la fuente mayor de error recae en el muestreo. El análisis de suelos es una herramienta muy importante y permite el uso correcto de fertilizantes químicos, materia orgánica y enmiendas. El costo actual de los fertilizantes y su tendencia de incremento obliga a usarlos de forma eficiente, en dosis adecuadas y balanceadas. El análisis de suelos será tan bueno como la calidad de las muestras tomadas, pues una muestra enviada al laboratorio de 500 a 1000 gramos representa millones de gramos de suelo.

3.2.1. IMPLEMENTOS REQUERIDOS

- Barreno, pala o palín
- Balde limpio
- Bolsas plásticas
- Hoja de información
- Mapa de la finca
- Machete o cuchillo
- Marcadores
- Hojas para identificar la(s) muestra(s)



Ilustración 22. Implementos requeridos

3.2.2. PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MUESTRAS

Realice una inspección visual del terreno, determinando o demarcando áreas de terreno similares u homogéneas por condiciones de topografía, color, drenaje, clase de vegetación, manejo de cultivos, etc. En cada unidad o área de terreno demarcada haga un recorrido en zig-zag, tomando cada 250 a 500 m² una muestra de suelos dentro de los primeros 20 cm de profundidad, si se trata de cultivos transitorios y de 15 cm para pastos. Para cultivos anuales y perennes de raíz profunda, es conveniente hacer dos muestreos en el mismo sitio: uno de 0 a 20 cm y otro de 20 a 40 cm. Cuanto mayor sea el número de muestras simples o submuestras colectadas para formar una muestra compuesta, más confiable será el muestreo.

Las muestras tomadas a la misma profundidad y en la misma unidad de suelos se mezclan dentro del balde y de allí se extrae una cantidad equivalente 1000 gramos, que se colocan en una bolsa plástica adecuadamente identificada, para luego enviarse lo más pronto posible al laboratorio. Antes de tomar cada submuestra de suelo se debe eliminar previamente la vegetación que cubre el sitio, así como cualquier basura presente; luego con la pala se hace un corte en forma de “V”, descartando el suelo extraído de esta forma. Luego se toma de una de las paredes del hoyo un tajo de suelo de un espesor aproximado de 3 cm eliminado con un cuchillo el tercio de cada lado, el resto se coloca en el balde. De cada una de las submuestras a colar en el balde, se debe eliminar piedras, raíces y basura.

Después de obtener las 20 a 40 submuestras por hectárea, se debe mezclar bien el suelo colectado hasta homogenizarlo y de esta mezcla se obtendrá la muestra compuesta que es representativa, con un peso de 1000 gramos, la cual deberá ser embolsada e identificada adecuadamente para enviarla al laboratorio. Si el terreno muestreado es muy uniforme el número de submuestras a tomar podrá ser ostensiblemente menor.



Ilustración 23. Procedimiento de muestreo

3.2.3.DELIMITACIÓN DEL SUELO

En el proceso de muestreo a nivel de finca es fundamental una buena identificación de los diferentes tipos de suelos y los límites de estos dentro del paisaje; esto define las unidades de muestreo. Los límites del suelo dependen de varios factores como: Un cambio de pendiente del terreno, material parental, uso, manejo (fertilizado vs. no fertilizado) entre otros. Cada tipo de suelo se considerará como un terreno homogéneo e independiente (unidad de muestreo), que debe ser identificado con base en las características mencionadas.



Ilustración 24. Diferentes formas del terreno para delimitar

3.2.4.CUIDADOS AL TOMAR LA MUESTRA

Siempre se debe tener precaución de remover piedras, raíces gruesas, lombrices e insectos de las submuestras tomadas. Las porciones del suelo se desmenuzan con la mano y se van mezclando en el balde hasta completar el número total de

submuestras tomadas. Finalmente se transfieren 1000 gramos de suelo a una bolsa plástica limpia la cual debe cerrarse y marcarse con el nombre o número del terreno muestreado o con un código que escoja el muestreador. Recuerde que cada muestra representa un terreno homogéneo y no se deben mezclar muestras de terrenos diferentes. La muestra compuesta debe enviarse a un laboratorio de suelos lo más pronto posible. En términos prácticos significa uno o dos días como máximo. En este último punto se presentan con mucha frecuencia algunas fallas como por ejemplo dejar la muestra guardada en el carro por mucho tiempo. La muestra puede ser mantenida a temperatura ambiente y no expuesta al sol.

Sí ésta se encuentra muy húmeda séquela a la sombra. Recuerde que la pretensión es obtener una muestra lo más representativa posible del suelo en cuestión. Durante el muestreo evite fumar, comer, o manipular otros productos (cal, fertilizantes, cemento, etc.) para evitar la contaminación de la muestra y obtener resultados falsos. No tome muestras cerca de los caminos, canales, viviendas, linderos, establos, saladeros, estiércol, estanques o lugares donde se almacenen productos químicos, materiales orgánicos, o en lugares donde hubo quemaduras recientes. Lávese bien las manos antes de hacer el muestreo. No utilice bolsas o costales donde se hayan empacado productos químicos, fertilizantes, cal o plaguicidas.

3.2.5. ÉPOCA DE MUESTREO

En general se recomienda muestrear dos o tres meses antes de la siembra o trasplante, lo cual da tiempo para obtener los resultados, interpretarlos, establecer las recomendaciones y adquirir los fertilizantes, cal o materia orgánica. En cultivos perennes esto puede hacerse cada dos años, alrededor de uno o dos meses antes de la cosecha, en la época de floración. En pastos establecidos se puede muestrear cada dos años, luego de hacer un pastoreo. En pasturas se puede establecer un cronograma de muestreo de suelos para los diferentes lotes y así diferir el costo del muestreo y los análisis. La frecuencia de muestreo puede ser más intensa para cultivos altamente tecnificados (flores, hortalizas, etc.).

3.2.6. RECOMENDACIONES GENERALES

- Haga un croquis o mapa de la finca o del terreno que se cultivará y asegúrese de tener su propio archivo del área representada en cada muestra.
- Programe la toma de las muestras ocho a diez semanas antes de la siembra. Tome en cuenta que los resultados de los análisis normalmente se entregan dos semanas después de recibir las muestras en el laboratorio.
- La profundidad del suelo a la cual se toma la submuestra es variable. En general se recomienda una profundidad de 20 cm para la mayoría de los cultivos, en pasturas puede ser entre 10-15 cm. Esto coincide con la mayor concentración de raíces en el suelo.
- No tome muestras en áreas recién fertilizadas, sitios próximos a viviendas, galpones, corrales, cercas, caminos, lugares pantanosos o erosionados, áreas quemadas, lugares donde se amontonan estiércol, fertilizantes, cal u otras sustancias que pueden contaminar la muestra.
- Si el campo ha sido fertilizado recientemente (menos de tres meses), no muestre directamente en la banda fertilizada.
- Evite muestrear suelos muy mojados.
- No fume durante la recolección de muestras, para evitar contaminarlas con las cenizas del cigarro, ricas en potasio.
- Use materiales plásticos limpios para guardar las muestras. Nunca use latas o recipientes de metal.
- Use bolsas plásticas nuevas y limpias, no de papel.
- Proporcione en la etiqueta de cada muestra toda la información.
- Envíe las muestras al laboratorio lo más pronto posible. No aplique calor a las muestras para secarlas.
- Lo más importante no tome muestras de un solo sitio del terreno.

El análisis de suelo le permite conocer el diagnóstico químico de la fertilidad del suelo e identificar la clase y cantidad de fertilizante o enmienda necesaria para desarrollar con éxito un cultivo. La etiqueta con información no se debe introducir

dentro de la bolsa conteniendo el suelo, porque la humedad de este la puede dañar. La muestra compuesta debe ser enviada lo más pronto posible al laboratorio.

3.3. EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

3.3.1. DISPERSIÓN DE LOS PLAGUICIDAS EN EL MEDIO AMBIENTE

La contaminación se produce por la fuga de plaguicidas del almacén al medio ambiente. Esto puede ocurrir de varias maneras:

- los plaguicidas pueden infiltrarse en el suelo;
- pueden ser transportados por el viento;
- puede propagarse por escorrentía;
- pueden llegar por lixiviación a las aguas subterráneas y a continuación propagarse por el subsuelo, acabando por penetrar en ríos o lagos.

Las formas más importantes de propagación son la infiltración (en el suelo o en las aguas subterráneas) y la dispersión por la acción del viento. La dispersión de plaguicidas por la escorrentía debe considerarse como una forma de infiltración. (La escorrentía puede tenerse en cuenta determinando los sitios donde ha concentrado y depositado los plaguicidas, y considerar subsiguientemente estos sitios como lugares donde ha tenido lugar la infiltración.)

La dispersión por la acción del viento contamina la superficie de la zona circundante. La dispersión por infiltración contamina el suelo debajo del lugar de almacenamiento y puede conllevar la contaminación de las aguas subterráneas y finalmente, después de ulteriores dispersiones, la contaminación de las aguas superficiales (por ejemplo, en lagos y ríos).

En la figura siguiente se resumen estas posibilidades de dispersión. En el Trámite 2 se describen las dos vías de dispersión más importantes y se explica cómo calcular el tamaño de la zona afectada. También se presenta un método para calcular las concentraciones que se prevén en la zona contaminada.

Deben seguirse cuatro trámites para determinar la zona que se ha contaminado:

- El Trámite 1 determina cuáles de los plaguicidas que se han derramado son pertinentes, es decir, pueden haber producido contaminación.
- El Trámite 2 determina si estos plaguicidas pertinentes se han infiltrado en el suelo, y si lo han hecho, hasta qué profundidad.
- El Trámite 3 determina si los plaguicidas pertinentes han llegado por lixiviación a las aguas subterráneas, y si lo han hecho, en qué zona en torno al almacén se habrán contaminado las aguas subterráneas.
- El Trámite 4 determina si el viento ha dispersado o no los plaguicidas pertinentes, y, en caso afirmativo, qué zona en torno al almacén está contaminada.

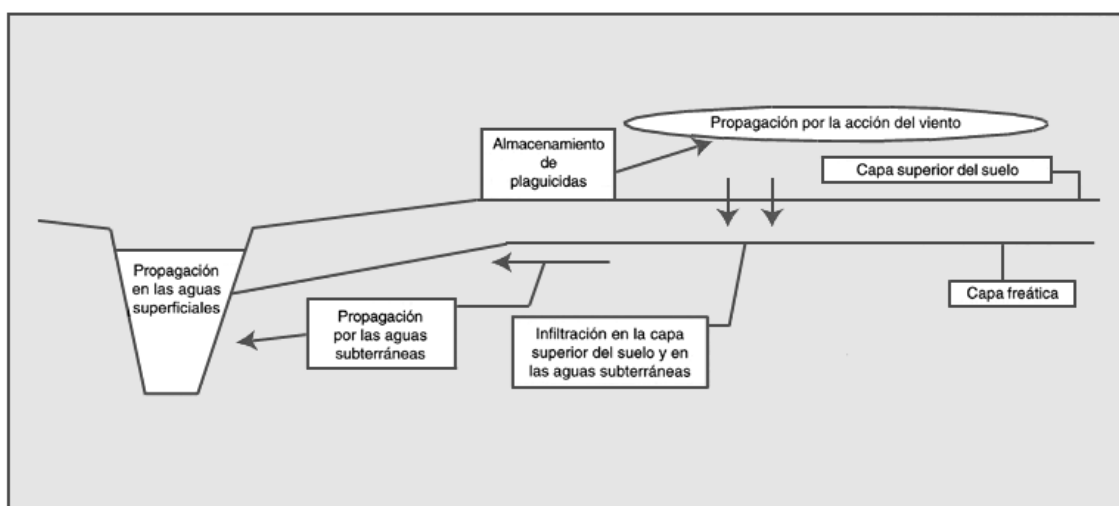


Ilustración 25. Dispersión de los contaminantes de un almacén al medio ambiente

Trámite 1: Determinación de los plaguicidas pertinentes

En primer lugar, utilice el Cuadro 1.1 para enumerar los plaguicidas que se han derramado.

Tabla 7. Formato Cuadro 1.1. Determinación de los plaguicidas pertinentes

Plaguicidas (véase la Nota) (nombre químico)	Cantidad derramada (estimación)

Nota: Una vez que se conozca qué plaguicidas se han derramado, consulte el Apéndice 3, que describe unos cuarenta plaguicidas comunes (en desuso) y suministra información de interés para secciones posteriores de este manual. Los plaguicidas que no se incluyen en dicho apéndice pueden encontrarse en la bibliografía del Apéndice 9. Si no se pueden identificar los plaguicidas, tome una muestra cómo se describe en la Parte C: Trámite 9 - Comprobación, y envíela a un laboratorio químico para ser analizada.

En segundo lugar, con ayuda del Cuadro 1.2, determine cuáles de los plaguicidas derramados son «pertinentes». No todos los plaguicidas que se han introducido en el medio ambiente de forma inadvertida son tan nocivos como para contaminar y repercutir en la salud humana. Por consiguiente, debe establecerse una distinción entre los plaguicidas que probablemente contaminarán (los plaguicidas pertinentes) y los que no lo harán (plaguicidas no pertinentes).

Los plaguicidas pertinentes son plaguicidas que se han derramado en cantidades considerables y que no se degradan fácilmente. La tasa de degradación se expresa como semidesintegración o como DT50 en el suelo. (Véase el Apéndice 5 para la descripción.) Cuando la semidesintegración de un plaguicida (su valor DT50) es inferior a seis meses, puede considerarse fácilmente degradable y en consecuencia no pertinente. La probabilidad de que la fuga de tal plaguicida produzca riesgos para la salud es insignificante. Además de la tasa de degradación, también es importante la cantidad de plaguicida derramado. Los derrames de menos de 100 litros o 100 kilos se consideran demasiado pequeños para entrañar riesgos para la salud por contaminación.

Tabla 8. Formato Cuadro 1.2. Distinción entre plaguicidas

A	B	C	D	E
Plaguicidas derramados (nombre)	¿Es la cantidad > 100 kg o 0,1 m ³ ? (sí/no)	DT ₅₀ suelo (véase el Apéndice 3)	¿DT ₅₀ > ½ año? (sí/no)	¿Es pertinente el plaguicida? (sí, en caso de que las respuestas de las columnas B y D sean ambas afirmativas; de lo contrario, no)

¿Deben considerarse pertinentes algunos de los plaguicidas derramados? Sí/No

En caso negativo, no es necesario seguir. En caso afirmativo, enumere los plaguicidas pertinentes en el Cuadro 1.3 y prosiga con los Trámites 2–6 para cada uno de los plaguicidas que se haya considerado pertinente.

Tabla 9. Formato cuadro 1.3. Enumeración de plaguicidas

Plaguicida pertinente	Cantidad derramada

Trámite 2: Evaluación de la contaminación causada por la infiltración

Establezca una distinción entre los plaguicidas almacenados al aire libre y bajo cubierto.

Cuando se almacenan al aire libre:

- En el caso de plaguicidas sumamente móviles, el subsuelo se contamina al nivel de las aguas subterráneas o de una capa de porosidad baja.
- En el caso de plaguicidas moderadamente móviles, el subsuelo se contamina al nivel de las aguas subterráneas o de una capa de porosidad baja o moderada.
- En el caso de plaguicidas ligeramente móviles, sólo se contaminará la capa superior del suelo (los 0,5 metros superiores).

Cuando se almacenan bajo cubierto:

- Si se han derramado cantidades considerables de plaguicidas líquidos ($> 0,1 \text{ m}^3$), la movilidad de los plaguicidas es muy alta y la porosidad del suelo es elevada, la contaminación puede extenderse en profundidad bajo la superficie del suelo.
- Si se han derramado cantidades considerables de plaguicidas líquidos ($> 0,1 \text{ m}^3$), la movilidad de los plaguicidas es alta y la porosidad del suelo es moderada o alta, la contaminación puede extenderse a una profundidad de varios metros por debajo de la superficie del suelo.
- En cualquier otro caso, sólo se contaminará la capa superior del suelo (0–0,5 metros).

3.3.2. EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PLAGUICIDAS EN EL SUELO

La infiltración de plaguicidas en el suelo es aplicable a líquidos y sólidos. (Téngase presente que la infiltración también puede producirse en lugares en que los plaguicidas se han ido acumulando, por ejemplo, debido a la escorrentía o a la carga y descarga.) Los plaguicidas líquidos se filtrarán en el suelo y se disolverán en la

humedad del suelo. Los plaguicidas sólidos normalmente se propagarán en primer lugar por la superficie del suelo desde el lugar de almacenamiento (por ejemplo, por la acción del viento o de la escorrentía) y, subsiguientemente, también pueden infiltrarse en el suelo después de haber sido disueltos por la lluvia. En cualquier caso, los plaguicidas se diluirán siempre en la humedad del suelo. Por lo tanto, la concentración de plaguicida en el suelo equivale a la concentración de plaguicida en la humedad del suelo. La concentración máxima de plaguicida en el suelo depende de la solubilidad del plaguicida en el agua.

Tabla 10. Formato cuadro 2.1. Concentración de plaguicidas en el suelo

Plaguicida pertinente	Indique M = cantidad derramada (kg o litros)	Indique o estime T = período del derrame (años)	Calcule L = carga anual de plaguicidas infiltrados (L = M/T) (kg/año)

Utilice los Cuadros 2.1 y 2.2 para calcular la concentración de plaguicidas en el suelo. La concentración se expresa abreviadamente como C_0 .

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{si } \frac{L}{R \times A} \leq S & \text{entonces } C_0 = \frac{L}{R \times A} \\ \text{si } \frac{L}{R \times A} > S & \text{entonces } C_0 = S \end{array} \right.$$

Tabla 11. Formato cuadro 2.2. Concentración de plaguicidas en el suelo

Plaguicida pertinente	Utilice L = carga anual (kg/año)	Indique R = precipitaciones anuales (m/año)	Estime A=superficie del derrame (m ²)	Indique S = solubilidad en agua (kg/m ³) (véase el Apéndice 3)	Calcule L/(R×A) (kg/m ³)	Plaguicida pertinente

Trámite 3: Evaluación de la contaminación en aguas subterráneas

3.3.3. EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE QUE LOS DERRAMES LLEGUEN A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En términos generales, se puede suponer que los derrames de plaguicidas que se han infiltrado en el suelo acabarán por llegar a las aguas subterráneas, a no ser que las características de los plaguicidas o del lugar lo hagan improbable. Las características que podrían influir en la lixiviación de los plaguicidas en las aguas subterráneas son, entre otras, el volumen de las precipitaciones, el drenaje del suelo, la profundidad de las aguas subterráneas, el tipo de almacenamiento, la movilidad del plaguicida en cuestión y su degradación.

Utilice el Cuadro 3.1 para prever el transporte de plaguicidas hacia las aguas subterráneas.

El uso del Cuadro 3.1 llevará a una de estas dos conclusiones: los plaguicidas vertidos llegarán a las aguas subterráneas o no llegarán. Si no llegan, significa que

las fugas no provocarán la contaminación de las aguas subterráneas. A pesar de esto, lo prudente es tomar una o varias muestras de las aguas subterráneas para comprobar la exactitud de la previsión. (Véase Parte C: Trámite 9 - Comprobación.) Si se concluye que los plaguicidas llegarán a las aguas subterráneas, el trámite siguiente es determinar hasta dónde se ha extendido la contaminación. De esto trata la sección siguiente.

3.3.4. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PLAGUICIDAS EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La dispersión de los plaguicidas aguas abajo en el acuífero crea una zona en la que las aguas subterráneas quedan contaminadas. Si esas aguas se utilizan para beber o regar, o si se vierten en un río o lago cuyas aguas se utilizan para beber o regar, es importante conocer la concentración de los contaminantes en ellas. Esto puede hacerse calculando la concentración en las aguas subterráneas (C1) en el punto en que el plaguicida entra en el acuífero. Para efectuar este cálculo, son necesarios datos sobre la hidrogeología del lugar de almacenamiento. Estos datos pueden obtenerse normalmente de los hidrogeólogos del Ministerio de Agricultura o del Departamento de Recursos Hídricos del país en cuestión.

Tabla 12. Formato cuadro 3.1. Determinación de concentración de plaguicidas en las aguas subterráneas

Número	Datos de entrada	Valor	Conclusión
1	Profundidad de las aguas subterráneas	< 2 m	Llega siempre a las aguas subterráneas
		< 5 m	Prosiga con 2
		> 5 m	Prosiga con 2
2	Cantidad de plaguicidas derramada	> 100 litros ó 100 kg	Prosiga con 3
		< 100 litros ó 100 kg	Nunca llega a las aguas subterráneas, excepto

			cuando están cercanas a la superficie (< 2 m)
3	¿Están almacenados los plaguicidas en un almacén cubierto o semiabierto? (véase el Cuadro I del Apéndice 1)	Sí	Nunca llega a las aguas subterráneas, excepto cuando están a < 5 m
		No	Prosiga con 4
4	Tiempo transcurrido desde el comienzo del derrame	< 1 año	Nunca llega a las aguas subterráneas, excepto cuando la movilidad de los plaguicidas es alta
		> 1 año	Prosiga con 5
5	Precipitaciones anuales	> 2 000 mm	Llega siempre a las aguas subterráneas
		=< 2 000 mm	Prosiga con 6
6	Movilidad de los plaguicidas (véase el Apéndice 3)	Alta	Llega siempre a las aguas subterráneas
		Baja	Prosiga con 7
7	Degradación (véase el Apéndice 3)	Alta (DT ₅₀ suelo < 10 días)	Nunca llega a las aguas subterráneas
		Baja (DT ₅₀ suelo > 10 días)	Llega siempre a las aguas subterráneas

A continuación, calcule la concentración en las aguas subterráneas debajo del lugar en que se ha producido el derrame.

$$\begin{cases} \text{si } \frac{R \times \sqrt{A}}{q \times b} \leq 1 \text{ entonces } C_1 = C_0 \times \frac{R \times \sqrt{A}}{q \times b} \\ \text{si } \frac{R \times \sqrt{A}}{q \times b} > 1 \text{ entonces } C_1 = C_0 \end{cases}$$

Tabla 13. Formato cuadro 3.2. Cálculo de concentración de plaguicidas en las aguas subterráneas

Datos de entrada	Dimensión	Valor
Determine el gradiente hidráulico (i) - utilice mediciones del nivel de las aguas subterráneas o mapas con las curvas de nivel de éstas	Sin dimensión	
Determine la conductividad hidráulica (K) - utilice el Cuadro 3.3	m/día	
Calcule Q (caudal específico de las aguas subterráneas) $Q = K \times i \times 365$	m/año	
Estime A (superficie del lugar en que se ha producido el derrame) $A = \text{longitud} \times \text{anchura}$	m ²	
Determine R (precipitaciones anuales)	m/año	
Calcule $R \times \sqrt{A} / Q \times b$ (suponiendo $b = 1 \text{ m}$)	Sin dimensión	
C_0 (calculado en el Trámite 2 del Apéndice 2)	kg/m ³	

Tabla 14. Formato cuadro 3.3. Valores típicos para la conductividad hidráulica de varios sedimentos no consolidados y rocas

Tipo de material	K(m/día)
Sedimentos no consolidados	
Grava	1 000
Arena limpia	100
Arena cenagosa	10
Limo, loess	1
Morrena glacial	0,1
Arcilla marina inalterada	0,001
Esquisto	0,0001
Rocas	
Caliza cárstica	1 000
Basalto permeable	100
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	100
Caliza y dolomita no cársticas	10
Arenisca sin fracturas	10
Rocas ígneas y metamórficas no fracturadas	0,00001

Nota: Una vez que el plaguicida ha alcanzado la capa freática, se supone que se mezclará instantáneamente con la parte superior de la zona saturada. Se desconoce el grosor (b) de esta zona de mezcla cercana a la zona del nivel freático. A efectos prácticos, se supone que $b = 1,0$ m. Además, se supone que el acuífero está contaminado por encima de la anchura total de las instalaciones de almacenamiento. Se supone que esta última es $\sqrt{A}$.

Trámite 4: Determinación de la dispersión por el viento

3.3.5. EVALUACIÓN DE LA TASA DE EMISIÓN DE PLAGUICIDAS FUERA DEL ALMACÉN

La dispersión por el viento tiene lugar normalmente sólo en distancias relativamente cortas, del orden de decenas de metros. El polvo puede propagarse por una superficie mayor con vientos fuertes, pero la cantidad de material arrastrado lejos será entonces pequeña.

Para determinar la propagación de los plaguicidas por el viento es necesario determinar primero si el viento puede o no dispersar los plaguicidas pertinentes.

Sólo si los plaguicidas están presentes en forma de polvo pueden ser dispersados por el viento.

En segundo término, hay que determinar las características del almacén. Para hacerlo, es necesario conocer los siguientes parámetros:

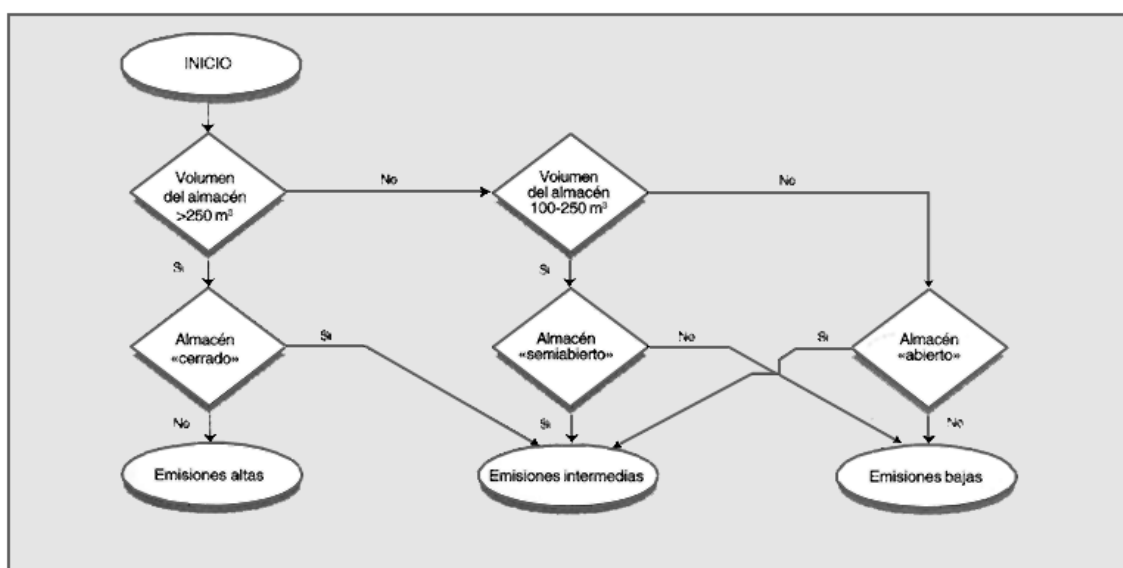
- el volumen del lugar de almacenamiento (longitud $\times$ anchura $\times$ altura);
- la «apertura» del almacén (si las paredes llegan hasta el tejado, el almacén se considera «cerrado»; si no hay ninguna clase de paredes, el almacén se considera «abierto»; y un almacén con grandes aberturas de ventilación o con ventanas rotas se considera «semiabierto»).

Tabla 15. Formato cuadro 4.1. Evaluación de la tasa de emisión de plaguicidas fuera del almacén

Plaguicidas pertinentes	¿Se presenta en forma de polvo? (sí/no)

A continuación, es necesario determinar si es probable que las emisiones que se producen desde el almacén sean altas.

Utilice el resultado de este árbol de decisiones en el Trámite 6, que ayuda a los usuarios a determinar las concentraciones en la zona contaminada por la deposición de plaguicidas por acción del viento.



3.4. REMEDIACIÓN

La remediación de suelos es una acción necesaria en lugares donde ha habido contaminación industrial o urbana, ya que puede tener consecuencias adversas para la salud humana y el entorno. Su objetivo es reducir las sustancias contaminantes y prevenir futuras concentraciones nocivas. Sin embargo, esta tarea tiene sus desafíos, ya que además de eliminar las sustancias dañinas, implica recuperar el equilibrio natural de los ecosistemas afectados.

Con técnicas adecuadas se puede reducir el daño, prevenir consecuencias mayores y de ser necesario, sustentar acciones regenerativas ante las autoridades correspondientes.

Las empresas mineras e industriales están bajo una creciente presión regulatoria y social para implementar prácticas de remediación en sus sitios, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental de su actividad y cumplir con las regulaciones gubernamentales.

En todos los casos, se requiere un estudio ambiental exhaustivo y el desarrollo de planes de remediación efectivos para cumplir con las regulaciones y normativas aplicables.

3.4.1. REMEDIAR NO ES SÓLO EXCAVAR

Aunque la extracción y transporte del suelo contaminado es una técnica común, no siempre es la mejor opción debido a los costos y a la posibilidad de desplazar el problema. La remediación de terrenos contaminados es un proceso complejo que implica el conocimiento técnico avanzado en química, hidrología, biología e ingeniería. Es importante evaluar cada contexto para identificar el tipo de sustancia presente, la concentración y las condiciones ambientales del lugar. A partir de esta información, se elige la técnica de remediación más adecuada:

La biorremediación implica la introducción de microorganismos que descomponen los contaminantes en sustancias no tóxicas. Este proceso es efectivo para rehabilitar terrenos afectados por hidrocarburos y metales pesados. La inyección de nutrientes en el suelo, como nitrógeno y fósforo, puede aumentar la capacidad de la tierra para absorber sustancias peligrosas y promover la actividad microbiana.

La fitorremediación utiliza plantas para absorber los contaminantes a través de sus raíces y acumularlos en sus hojas y tallos. Después de la cosecha, los contaminantes acumulados en el tejido de la planta se eliminan.

Los procesos químicos inmovilizan o transforman los contaminantes en sustancias no tóxicas, mediante la incorporación de aditivos químicos que reducen la movilidad de los contaminantes.

La atenuación natural es una técnica en la cual las concentraciones de las sustancias de interés disminuyen con el tiempo debido a procesos físicos, químicos y biológicos naturales.

3.4.2. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

A través de los años, se han desarrollado distintos métodos para el tratamiento del suelo contaminado. Estos son algunos de los principales:

- Extracción e inyección. Consiste en extraer o inyectar aire en la zona para estimular la biodegradación. Otro método es la inyección de aire comprimido para que los contaminantes se separen y poder deshacerse de ellos en forma líquida o por evaporación.
- Biorremediación. Consiste en el uso de microbios que se alimentan de contaminantes como el petróleo y los plaguicidas. Estas poblaciones de microorganismos se ocupan de limpiar el suelo.
- Fitoestabilización. Involucra el uso de plantas y bacterias para inmovilizar y acumular contaminantes, como metales pesados. De esta forma se evita que sigan dispersándose.
- Estabilización fisicoquímica. Aquí, los contaminantes se concentran en una sustancia solidificante a través de una inyección.
- Lavado de suelos. Funciona infiltrando agua con ciertos aditivos en la zona para disolver los contaminantes. Después, el agua se retira con bombeo y se somete a un tratamiento.
- Biolabranza. Se trata de disponer el suelo en varias capas o pilas, airearlo y voltearlo cada cierto tiempo para promover la acción de los microbios.
- Por dar un ejemplo de caso de éxito es el de Puerto Montt, donde se ocupó la biorremediación para tratar un terreno contaminado por los residuos de

una planta de combustibles, la cual estuvo operativa entre 1960 y 2005. El proyecto logró disminuir las concentraciones de contaminantes reportadas inicialmente, eliminando así el riesgo para la salud pública.

Los suelos contaminados son un problema que afecta el abastecimiento de agua, alimentos y la salud general. Es por esto que las actividades de remediación son esenciales para el bienestar de las comunidades, así como el rol de los especialistas en prevención de riesgos ambientales (WSP, 2023).

Las técnicas de remediación pueden aplicarse a una amplia gama de situaciones en las que se ha producido contaminación como la actividad industrial, minera o los accidentes ambientales.

La actividad industrial puede ser una fuente común de polución del sitio debido a la liberación de productos químicos de diversa índole. En la minería, la alteración del suelo se puede originar por los residuos mineros y su inadecuado depósito, lo que causa una filtración de metales que se traslada a la tierra y eleva la presencia de sustancias tóxicas por encima de los estándares ambientales. Además, la dispersión aérea por el polvo generado por los desechos y la corrupción por productos químicos y combustibles empleados en la producción minera son también fuentes de contaminación.

Los accidentes ambientales por derrame de petróleo, u otros agentes tóxicos para la salud humana, provocan diversos impactos negativos, como la modificación del paisaje, la erosión del terreno, la alteración de las aguas subterráneas y superficiales, la liberación de metales pesados, u otros materiales nocivos.

Una vez que se conocen las características del sitio y se definen objetivos, se realiza un análisis de alternativas de remediación y se selecciona la técnica más adecuada según el tipo y el grado de concentración de sustancias tóxicas.

En la toma de esta decisión también se tienen en cuenta factores como la efectividad de la técnica, el costo, el tiempo de implementación y los impactos socio ambientales asociados.

Por último, se diseña el sistema de remediación y se implementa un plan que incluye los detalles sobre las actividades en terreno, cronograma, costos y objetivos específicos para la restauración del sitio. Los ingenieros pueden supervisar la instalación de los sistemas y realizar pruebas para asegurarse de que estén funcionando correctamente.



Ilustración 26. Sistema de remediación

El comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la efectividad de una tecnología de remediación, están determinados por una variedad de factores que interactúan de manera compleja y que dependen de las características propias del contaminante, así como de las del suelo (figura 1). Por consiguiente, para la selección adecuada de una tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito, es indispensable considerar tanto las propiedades del contaminante como las del sitio contaminado. En general, dentro de los factores a considerar se encuentran

los siguientes: (i) procesos químicos (reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, fotólisis); (ii) procesos físicos o de transporte (sorción, advección, dispersión, difusión, volatilización y solubilización); y (iii) procesos biológicos (biodegradación, biotransformación y toxicidad) (Riser-Roberts, 1998).

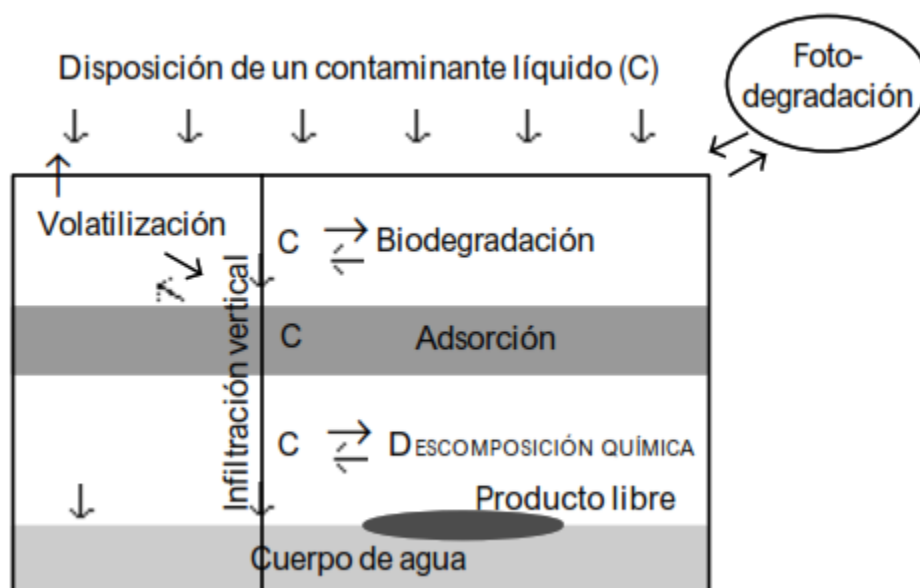


Ilustración 27. Disposición de un contaminante líquido (C)

Además de considerar las propiedades del suelo y las de los contaminantes, y para facilitar la selección preliminar de las tecnologías que podrían emplearse para tratar un sitio en particular, es indispensable obtener una descripción detallada de los siguientes aspectos:

- Ubicación geográfica y uso del suelo afectado.
- Tipo de instalación que dio origen a la contaminación.
- Magnitud y distribución de la mancha.
- Formas de acceso al sitio, ubicación de poblaciones y cuerpos de agua.
- Tipo de vegetación, clima y topografía del sitio.
- Características ecológicas.
- Características hidrogeológicas (formaciones geológicas, ciclo hidrológico y flujo de cuerpos de agua).

El suelo constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un soporte mecánico, así como nutrientes para el crecimiento de plantas y micro-organismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos.

Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/ agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1%.

3.4.6. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes, pero muy difíciles de cuantificar de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT 2002). El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados por el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km².

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias

ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros (figura 2).

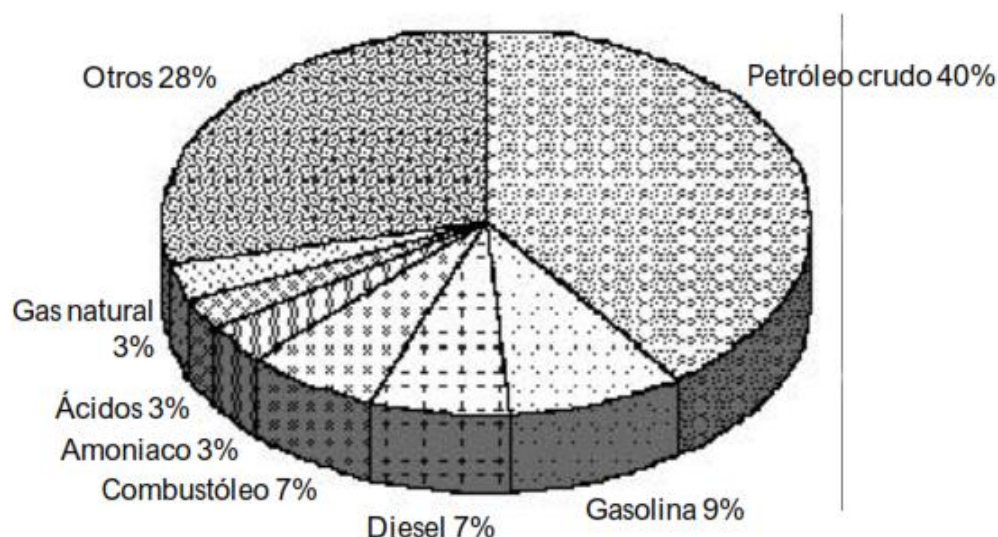


Ilustración 28. Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA 1997 y 1999

Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAP). De éstos, compuestos como los BPC se han almacenado en tambores que, en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente. Por su parte, los HAP se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP).

3.5. TRATAMIENTOS FÍSICOS

La disyuntiva que se presenta frente a un suelo contaminado es recuperarlo o destruirlo. En un principio ha prevalecido la última opción, mientras que en los últimos años se ha prestado una especial atención a las técnicas de recuperación que posibilitan su reutilización.

La problemática de la descontaminación de los suelos podemos tratarla bajo dos perspectivas: técnicas de aislamiento de la contaminación y técnicas de descontaminación.

Para evitar que la contaminación se propague desde los suelos contaminados estos pueden ser almacenados en vertederos apropiados o sellados in situ o destruidos totalmente.

La técnica del sellado trata al suelo con un agente que lo encapsula y lo aísla. El suelo es excavado, la zona se sella con un impermeabilizante y se deposita el suelo. Para desarrollar las barreras de aislamiento se ha utilizado diversas sustancias, como el cemento, cal, plásticos, arcilla, etc. El procedimiento tiene el inconveniente que se pueden producir grietas por las que los contaminantes pueden fugarse.

Sometiendo al suelo a altas temperaturas (1600-2300°C) se consigue su vitrificación con lo que se llegan a fundir los materiales del suelo, produciéndose una masa vítrea similar a la obsidiana. Durante el proceso hay que controlar la volatilización de numerosos compuestos.

La propia filosofía de estas técnicas (persigue la eliminación del suelo) las hace sólo recomendable en situaciones extremas.

En otras ocasiones se realiza el aislamiento directamente sobre los niveles de aguas freáticas. Mediante bombeos exhaustivos se consigue deprimir los niveles freáticos para alejarlos del suelo y subsuelo contaminados. El agua bombeada es tratada para eliminar su contaminación.

3.5.1. LAVADO DE SUELOS

Consiste en inyectar agua en el suelo. El agua moviliza a los contaminantes y luego se extrae y se depura.

El método sólo es válido para contaminantes solubles en agua (en la práctica la solubilidad ha de ser mayor de 1000 mg/l).

El agua se introduce mediante zanjas y pozos y se recoge en unos drenes (tuberías horizontales) y se extrae de los pozos mediante unas bombas de succión.

En ocasiones se utiliza agua con disolventes para facilitar la extracción. También se emplean detergentes para extraer contaminantes con comportamientos hidrofóbicos. Otra variante consiste en utilizar soluciones acidificantes. La extracción ácida ofrece buenos resultados para el caso de los metales pesados.

Normalmente se trata de una técnica *in situ*.

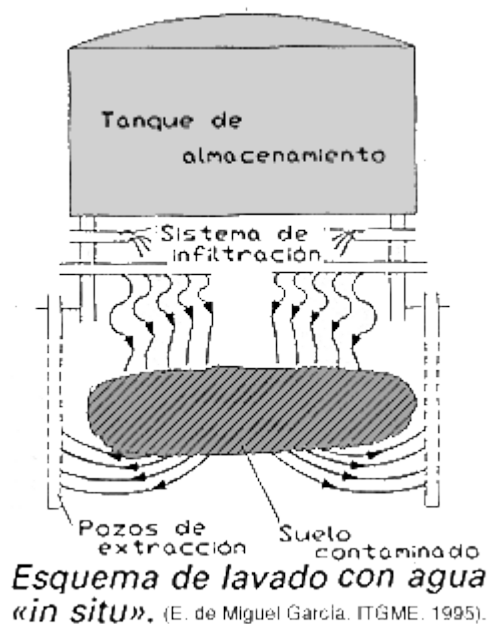


Ilustración 29. Esquema de lavado con agua (*in situ*)

Este tratamiento también puede llevarse a cabo como técnica *ex situ*. El suelo excavado es tratado con una solución acuosa en un tanque. Se tamiza para separar las fracciones más gruesas (generalmente, superiores a los 20 mm de diámetro). Los materiales finos se mezclan con un fluido lavador y posteriormente son aclarados. Después se separan las arenas, que tienen una capacidad muy baja para retener contaminantes. Las arcillas y los limos continúan en el proceso de depuración y finalmente los materiales que conserven todavía un alto porcentaje de contaminantes son separados para su aislamiento en vertederos controlados (figura). Esta técnica es útil para una amplia gama de compuestos contaminantes como los metales pesados, cianuros metálicos, disolventes nitrogenados, hidrocarburos aromáticos, gasolinas, aceites minerales, PBC (productos organoclorados, como los policlorobifenilos), etc. Los fluidos utilizados son muy

diversos dependiendo del tipo de contaminante: agua, disoluciones acuosas, disolventes orgánicos, compuestos quelantes, productos tensoactivos, ácidos y bases (E. de Miguel García. 1995).

3.6. TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Se trata de depurar el suelo mediante la degradación de los contaminantes por reacciones químicas. Frecuentemente se trata de reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos.

Como agente oxidante se emplea el oxígeno y el agua oxigenada, es un método útil para: aldehidos, ácidos orgánicos, fenoles, cianuros y plaguicidas organoclorados.

Este tratamiento se utiliza preferentemente in situ, inyectando el agente depurador a zonas profundas mediante barrenas huecas, o a veces, simplemente mediante un laboreo apropiado del terreno.

Otro procedimiento químico es la descloración. Esta técnica se utilizó, en un principio, para la estabilización de productos del petróleo. En suelos se ha empleado para la descloración de PBC. Consiste en la inyección de CaO , Ca(OH)_2 o NaOH . El suelo al reaccionar se calienta y al aumentar el pH hasta valores de 9 a 11 se produce la descloración de los PBC (E. de Miguel García. 1995).

3.7. ESTABILIZACIÓN

La estabilización del suelo es un proceso crítico en los campos de la construcción y la ingeniería. Implica diversas técnicas para modificar y mejorar las propiedades naturales del suelo con el fin de satisfacer requisitos específicos de ingeniería. Este proceso mejora la capacidad de carga del suelo, su resistencia a la tracción y su rendimiento general, haciéndolo adecuado para proyectos de construcción. La estabilización del suelo es particularmente necesaria cuando el suelo nativo bajo los cimientos de una construcción no es adecuado para soportar la carga estructural.

Existen dos grandes categorías de técnicas: la estabilización mecánica y la estabilización química.

- **Estabilización mecánica:** Los métodos mecánicos consisten en alterar la gradación del suelo mezclándolo con otros suelos de grados diferentes. Este proceso da lugar a una masa de suelo más compacta y estable, que es crucial para soportar el peso y la estructura de edificios y carreteras.
- **Estabilización química:** Los métodos químicos modifican las propiedades del suelo añadiendo materiales químicamente activos. Este método requiere un profundo conocimiento de los materiales implicados, su interacción y los posibles resultados tras la mezcla. La eficacia de la estabilización química del suelo depende de varios factores, como el tipo y la dosificación de los productos químicos, las técnicas de mezcla y las condiciones ambientales.

3.8. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Consiste en potenciar el desarrollo de microorganismos con capacidad de degradación de contaminantes (biorremediación). Se puede o favorecer la actividad de los microorganismos presentes o introducir nuevas especies. Para favorecer las acciones bióticas se pueden mejorar determinadas condiciones edáficas, añadiendo nutrientes, agua, oxígeno y modificando el pH.

En líneas generales la mayoría de los contaminantes orgánicos se degradan bajo condiciones aerobias. Sin embargo, hay determinados compuestos, como los alifáticos clorados que resisten bien en condiciones aerobias, pero son fácilmente degradados en las anaerobias. Otros incluso, como es el caso de los PBC, se degradan primero en condiciones anaerobias, produciéndose la descloración de manera rápida, y luego la degradación prosigue bajo condiciones aerobias.

La velocidad de descomposición por los organismos va a depender de su concentración, de determinadas características del suelo (disponibilidades de oxígeno y de nutrientes, pH, humedad y temperatura) y de la estabilidad del contaminante.

Este tratamiento se puede desarrollar in situ, on site o ex situ.

El tratamiento in situ se usa en suelos permeables cuando la contaminación afecta a los horizontes subsuperficiales. Se perforan unos pozos por los que se inyectan

agua con microorganismos (a la que se le han añadido nutrientes). Se bombea el agua contaminada hacia la superficie, se depura y se vuelve a inicial el ciclo.

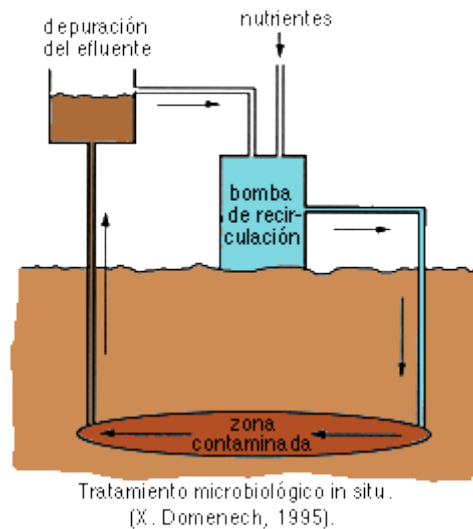


Ilustración 30. Tratamiento microbiológico (in situ)

Para el tratamiento on site el suelo es excavado y depositado sobre unas piscinas con fondo arenoso y revestidas de un material impermeable, como, por ejemplo, una capa plástica, y con un sistema de drenaje del agua. La superficie se riega con una solución enriquecida en nutrientes, a las que se le habrán añadido los microorganismos.

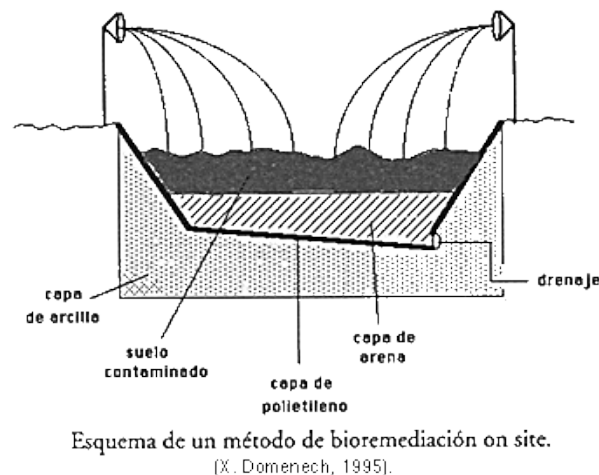


Ilustración 31. Esquema de un método de biorremediación (on site)

Los mejores resultados se obtienen en los tratamientos ex situ. Según esta técnica el suelo contaminado es llevado a unos fermentadores, grandes cilindros que giran sobre su eje para agitar el suelo. Durante el tratamiento se añade oxígeno y nutrientes, en condiciones de temperatura controlada.

3.9. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES

Tabla 16. Complementos educativos del Tema 3. Control de la contaminación de suelos

COMPLEMENTOS EDUCACIONALES		
Tema 3: Control de la contaminación de suelos		
3.2 Muestreo de suelo para su análisis 3.3 Evaluación de la contaminación del suelo	Aprendizaje Basado en proyectos	
	Actividad	Muestreo de Suelos
	Instrucciones	El estudiante realizara muestreo de suelos para su análisis, realizara la interpretación de resultados identificando el tratamiento factible de remediación. El estudiante aplicara diferentes métodos de muestreo e identificara el método de mayor confianza en los resultados obtenidos.
	Herramienta tecnológica	Power Point
3.2 Muestreo de suelo para su análisis 3.3 Evaluación de la contaminación del suelo	Infografía	
	Actividad	Búsqueda de Información
	Instrucciones	El estudiante realizara una búsqueda de la información en diversas fuentes sobre la forma de afectación de los contaminantes del suelo.
	Herramienta tecnológica	Canvas
3.4 Remediación	Ejercicios	

3.5 Tratamientos físicos 3.6 Tratamientos químicos 3.8 Tratamientos biológicos	Actividad	Casos prácticos
	Instrucciones	El estudiante explicara los casos de la aplicación de los diferentes métodos de remediación, considerando el más importante desde el punto de vista.
	Herramienta tecnológica	Word Avanzado

TEMA 4. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS

4.1. INTRODUCCIÓN

El término «tecnología de tratamiento» implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado.

Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente. Como ya se mencionó, el uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo

4.2. CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios:

- Estrategia de remediación
- Lugar en que se realiza el proceso de remediación,
- Tipo de tratamiento.

Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación.

Estrategia de remediación. Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

- Destrucción o modificación de los contaminantes. Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.

- Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).
- Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.
- Lugar de realización del proceso de remediación. En general, se distinguen dos tipos de tecnología:
- In situ. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.
- Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site).

Tipo de tratamiento. Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento:

- Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Tecnologías tradicionales. Son tecnologías utilizadas comúnmente a gran escala, cuya efectividad ha sido probada. La información disponible acerca de costos y eficiencia es de fácil acceso. Entre las tres tecnologías tradicionales usadas con mayor frecuencia, se encuentran: la incineración in

situ y ex situ, la solidificación/estabilización, la extracción de vapores y la desorción térmica.

- Tecnologías innovadoras. Son tecnologías propuestas más recientemente, que pueden encontrarse en diferentes etapas de desarrollo (investigación, escala piloto o gran escala). Su limitado número de aplicaciones genera la falta de datos acerca de sus costos y eficiencias. En general, una tecnología de tratamiento se considera novedosa si su aplicación a gran escala ha sido limitada (Volke Sepúlveda & Vellasco, 2002).

4.3. ELEMENTOS QUE DEFINEN EL ÉXITO DE LA REMEDIACIÓN

Los principales factores que inciden en la eficiencia de un proceso de remediación de contaminantes son: el tipo de contaminante, las características del medio (condiciones geológicas y químicas) y tipo de interacciones existentes en el medio

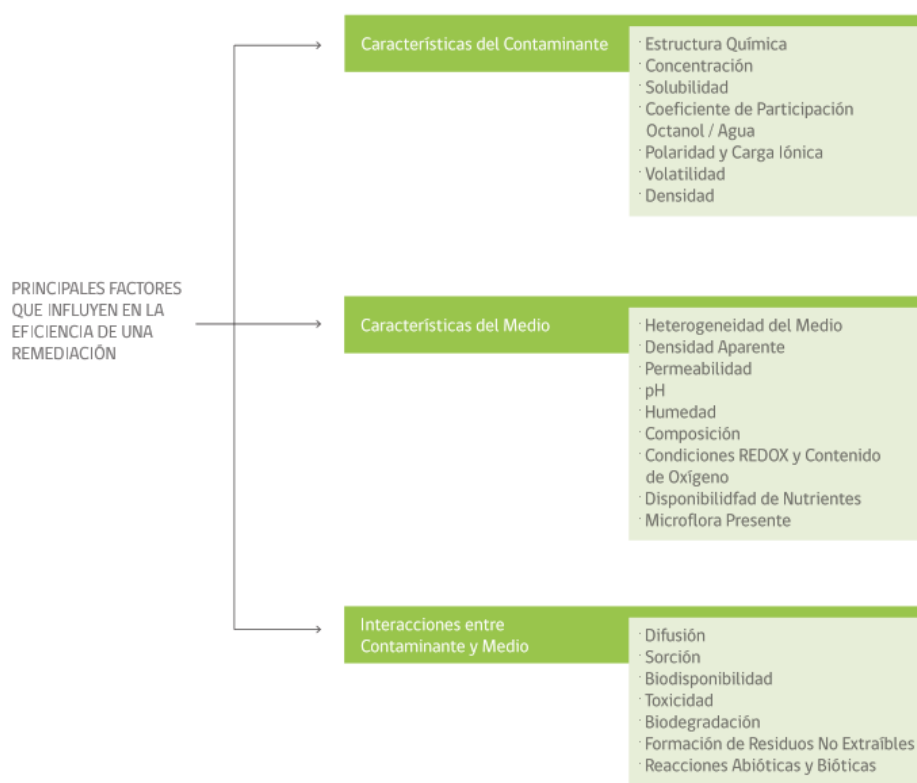


Ilustración 32. Principales factores que influyen en la eficiencia de una remediación

4.4. PRUEBAS DE TRATABILIDAD

Las pruebas de tratabilidad son esenciales en la remediación de suelos contaminados, ya que permiten evaluar y seleccionar tecnologías que sean efectivas, económicas y sostenibles para reducir o eliminar contaminantes del suelo. Estas pruebas se llevan a cabo en fases preliminares para determinar la viabilidad técnica de diferentes métodos de remediación y suelen involucrar ensayos de laboratorio o en campo. A continuación, te describo algunos de los principales enfoques de tecnologías de remediación y sus pruebas de tratabilidad:

4.4.1. BIOREMEDIACIÓN

Pruebas: Consisten en identificar microorganismos autóctonos o exógenos capaces de degradar contaminantes específicos. En laboratorio, se evalúa la actividad biológica mediante parámetros como consumo de oxígeno y producción de CO_2 . Las pruebas de tratabilidad determinan la capacidad del suelo para soportar el crecimiento microbiano y la tasa de biodegradación.

Técnicas: Bioestimulación (adición de nutrientes) y bioaumentación (introducción de microorganismos específicos).

4.4.2. FITORREMEDIACIÓN

Pruebas: Estas pruebas miden la capacidad de diferentes especies vegetales para absorber y acumular contaminantes. En invernaderos o parcelas de prueba, se analiza la bioacumulación en raíces y tallos para determinar su efectividad en la absorción de contaminantes.

Técnicas: Fitoextracción, fitodegradación y fitovolatilización.

4.4.3. TRATAMIENTO TÉRMICO

Pruebas: Se realizan ensayos de calor en muestras de suelo para verificar la volatilización o descomposición de contaminantes orgánicos. Estos ensayos identifican la temperatura óptima necesaria y la eficiencia de extracción de contaminantes en condiciones de laboratorio.

Técnicas: Incineración, desorción térmica y vitrificación.

4.4.4. ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

Pruebas: Evaluaciones de solubilidad y lixiviación en muestras de suelo tratado para verificar la eficacia de agentes estabilizantes (cemento, cal, etc.). Estas pruebas simulan condiciones de exposición ambiental para verificar la durabilidad y la capacidad de contención de los contaminantes.

Técnicas: Se emplean principalmente en suelos contaminados con metales pesados y compuestos inorgánicos.

4.4.5. EXTRACCIÓN DE VAPOR DEL SUELO (SVE, SOIL VAPOR EXTRACTION)

Pruebas: Mediante la aplicación de vacío en el laboratorio, se evalúa la volatilización de contaminantes en muestras de suelo seco y húmedo. Se mide la eficiencia de extracción en función del tiempo y las condiciones del suelo.

Técnicas: Aplicación de succión en zonas no saturadas para remover compuestos volátiles e hidrocarburos ligeros.

Estas pruebas de tratabilidad permiten no solo elegir la tecnología más apropiada sino también adaptar las condiciones de operación para maximizar la eficiencia de remoción y minimizar los costos ambientales y económicos.

4.5. COMPLEMENTOS EDUCACIONALES

Tabla 17. Complementos educativos Tema 4. Tecnología de remediación de suelos

COMPLEMENTOS EDUCACIONALES		
Tema 4: Tecnología de remediación de suelos		
1.2 Propiedades del suelo afectadas por contaminantes.	Ejercicios/Caso Prácticos	
	Actividad	Investigación de tecnologías para la remediación de suelos
	Instrucciones	El estudiante investigara, seleccionara y evaluara las aplicaciones de las diferentes tecnologías utilizadas en la remediación de suelos contaminados. Ventajas y desventajas.
	Herramienta tecnológica	Word y Excel Avanzados
1.2 Impacto de la contaminación en el suelo.	Cuestionario de evaluación	
	Actividad	Encuesta
	Instrucciones	El estudiante realizará una encuesta donde identifique elementos de éxito en la remediación, graficando los indicadores evaluados en la encuesta.
	Herramienta tecnológica	Quizizz
1.2 Impacto de la contaminación en el suelo.	Secuencia didáctica	
	Actividad	Casos de pruebas de trazabilidad
	Instrucciones	El estudiante realizara búsquedas de la trazabilidad a seguir desde la afectación hasta la remediación de suelos.
	Herramienta tecnológica	Padlet y app en la red

BIBLIOGRAFIA

- Agricultura, O. d. (02 de 05 de 2018). *FAO*. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/newsroom/story/Polluting-our-soils-is-polluting-our-future/es>
- Alimentación, O. d. (s.f.). *Permeabilidad del Suelo*.
- Bienes, R., & Marqués, M. (2015). *PROCESOS DEGRADATIVOS DEL SUELO*.
- Campuzano, E. F. (2022). *Procedimiento para evaluar la degradación biológica del suelo en zonas áridas del noreste de México*.
- FAO. (2015). *La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro*.
- Flores Puente, M. A., Torras Ortiz, S., & Téllez Gutiérrez, R. (2004). *MEDIDAS DE MITIGACIÓN PARA USO DE SUELOS CONTAMINADOS POR DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE TERRESTRE*. Sanfandila, Qro.
- Granada, U. d. (2008). *Caracterización del suelo*. Granada España: Unidad Docente e Investigadora de la facultad de ciencias.
- Pisticelli, M. (2015). *Degradación de suelos*. Profesora Asociada de Conservación y Manejo de Suelos, Facultad de Agronomía, UNICEN.
- Riser-Roberts, E. (1998). *Remediation of Petroleum Contaminated Soils: Biological, Physical, and Chemical Processes*. CRC Press, Boca Raton.
- Volke Sepúlveda, T., & Vellasco, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. CDMX: México: INE-SEMARNAT.
- WSP. (2023). *Técnicas de remediación de suelos*. Chile.

SITIOS WEB

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura:

<https://www.fao.org/>

Instituto Nacional de Estadística y Censo: <https://www.inec.gob.pa/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): <https://www.inegi.org.mx/>

Sistema Meteorológico Nacional: <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

Carlos F. Dorronsoro Fernández, Catedrático de Edafología y Química Agrícola (jubilado) por las Universidades de Salamanca y Granada (España):

<http://www.edafologia.net/>

Organización Meteorológica Mundial:

<https://cloudatlas.wmo.int/es/meteorologicaldefinition-of-a-meteor.html>

INSTRUMENTACIÓN DIDÁCTICA PARA LA FORMACIÓN Y DESARROLLO DE COMPETENCIAS PROFESIONALES

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 1 de 16

Instituto Tecnológico de Sinaloa de Leyva

Subdirección Académica

Instrumentación Didáctica para la Formación y Desarrollo de Competencias Profesionales

Periodo: Enero – junio 2025

Nombre de la asignatura: **Remediación de suelos**

Plan de estudios: **IHID-2010-236**

Clave de asignatura: **IHF-1024**

Horas Teórico- Horas Practicas- Créditos: **3-2-5**

1. Caracterización de la asignatura:

Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Hidrólogo las competencias para la prevención y control de la contaminación del suelo, el manejo para la remediación debido al deterioro del mismo, mediante los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en él, y su relación con el hombre y su medio ambiente.

Así mismo proporciona al estudiante la competencia de realizar un uso eficiente del recurso agua suelo-atmósfera con criterio de sustentabilidad e inocuidad en los sistemas de producción.

El estudiante al término de la asignatura podrá identificar, generar y transferir la tecnología acorde a las condiciones específicas, con una actitud propositiva hacia el uso óptimo de sus recursos. En este sentido podrá manejar mediante un enfoque holístico los recursos naturales y económicos disponibles que inciden en el desarrollo.

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 2 de 16

2. Intención Didáctica

La remediación de suelos es una asignatura que le brinda al estudiante herramientas útiles para la toma de decisiones ante la problemática de la contaminación del suelo.

3. Competencia de la asignatura

Analiza la problemática de contaminación en el suelo para determinar su tratamiento con la tecnología más adecuada para su remediación.

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 3 de 16

4. Análisis por competencias específicas

Competencia No. 1 Descripción: Introducción

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
1.1 Contaminación del suelo 1.1.1 Propiedades del suelo afectadas por contaminantes. 1.1.2 Degradación física del suelo. 1.1.3 Degradación química del suelo. 1.1.4 Degradación biológica del suelo. 1.2 Impacto de la contaminación en el suelo.	Realizar trabajo de campo para conocer e identificar diferentes tipos de suelos contaminados. Realizar búsqueda de información en diversas fuentes sobre los contaminantes del suelo y su afectación a las características. Revisar artículos técnico-científicos sobre los contaminantes en el suelo.	Búsqueda de información para identificar las diferentes variables por las que el suelo se contamina. Recorrido por diferentes sitios de la localidad, para identificar los contaminantes Realizar una práctica de colecta de diferentes tipos de suelo	Organiza y planifica información. Busca y analiza información proveniente de fuentes diversas. Se compromete éticamente. Genera nuevas ideas	7-7- hrs

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 4 de 16

Indicadores de alcance (4.8)	Valor del indicador (4.9)
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	20
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	10
C. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias a su aprendizaje	20
D. Realiza su trabajo de manera autónoma y auto regulada.	20
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	10
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregula.	20

Niveles de desempeño (4.10):

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	A, B, C, D, E, F.	95-100
	Notable	A, B, C, D, E	85-94
	Bueno	A, B, C	75-84
	Suficiente	A, B	70-85
Competencia no alcanzada	Insuficiente	MENOS DE 2 INDICADORES	NA

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 5 de 16

Matriz de evaluación:

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Investigación contaminación del suelo	20	20						Rubrica
Exposición	30		10				20	Rubrica
Examen	40			20	20			Evaluación
Lista de asistencia	10					10		Lista de Cotejo
	Total	20	10	20	20	10	20	

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 6 de 16

Competencia No. 2 Descripción: Tipos de afectaciones al suelo

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
2.1 Por descarga de aguas residuales 2.1 Por metales 2.3 Por el uso de fertilizantes 2.4 Por residuos sólidos 2.5 Por hidrocarburos	-Hacer búsqueda de información en diversas fuentes sobre las formas de afectación de los contaminantes al suelo. - Realizar proyecto de campo para plantear estrategias de remediación a suelos contaminados	Búsqueda de información para identificar las diferentes variables por las que el suelo se contamina. Recorrido por diferentes sitios de la localidad, para identificar los contaminantes más comunes en los suelos Realizar una práctica de colecta de diferentes tipos de suelo e identificar las afecciones presentes	Organiza y planifica información. Busca y analiza información proveniente de fuentes diversas. Se compromete éticamente. Genera nuevas ideas	7-7- hrs

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 7 de 16

Indicadores de alcance (4.8)	Valor del indicador (4.9)
G. Se adapta a situaciones y contextos complejos	20
H. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	10
I. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias a su aprendizaje	20
J. Realiza su trabajo de manera autónoma y auto regulada.	20
K. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	10
L. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregula.	20

Niveles de desempeño (4.10):

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	A, B, C, D, E, F	95-100
	Notable	A, B, C, D, E	85-94
	Bueno	A, B, C, D	75-85
	Suficiente	A, B, C	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	MENOS DE 2 INDICADORES	NA

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 8 de 16

Matriz de evaluación (4.11):

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Revisar artículos técnico- científicos sobre los contaminantes en el suelo.	20	20						Rubrica
Exposición fotográfica afectación al suelo	10				10			Rubrica
Investigación afectación al suelo por hidrocarburos.	20			20				Evaluación
Examen	40		10			10	20	Examen
Lista de asistencia	10				10			Lista de Cotejo
	Total	20	10	20	10	10	20	

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 9 de 16

Competencia No. 3 Descripción: Control de la contaminación del suelo

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
3.1 Caracterización de un suelo 3.2 Muestreo de suelo para su análisis 3.3 Evaluación de la contaminación del suelo 3.4 Remediación 3.5 Tratamientos físicos 3.5.1 Lavado de suelos 3.6 Tratamientos químicos 3.7 Estabilización 3.8 Tratamientos biológicos	Llevar a cabo métodos de muestreo en suelos contaminados. Determinar mediante análisis de laboratorio la condición de contaminación de un suelo Realizar una búsqueda de la información en diversas fuentes sobre las formas de afectación de los contaminantes del suelo. Exponer casos de la aplicación de diferentes métodos para la remediación de suelos.	Búsqueda de información para identificar las diferentes variables por las que el suelo se contamina. Recorrido por diferentes sitios de la localidad, para evaluar los contaminantes en suelo por diferentes muestreos Realizar una práctica de remediación de en diferentes tipos de suelo	Organiza y planifica información. Busca y analiza información proveniente de fuentes diversas. Se compromete éticamente. Genera nuevas ideas Propicia el uso de nuevas tecnologías	13-13- hrs

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 10 de 16

Indicadores de alcance (4.8)	Valor del indicador (4.9)
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	20
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	10
C. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias a su aprendizaje	20
D. Realiza su trabajo de manera autónoma y auto regulada.	20
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	10
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregula.	20

Niveles de desempeño (4.10):

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	A, B, C, D, E, F	95-100
	Notable	A, B, C, D, E	85-94
	Bueno	A, B, C, D	74-85
	Suficiente	A, B, C	70-84
Competencia no alcanzada	Insuficiente	MENOS DE 2 INDICADORES	NA

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 11 de 16

Matriz de evaluación (4.11):

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Resumen caracterización del suelo y tipos de muestreo	20	20						Rubrica
Investigación tipos de tratamientos	20		20					Rubrica
Cuadro comparativo ventajas y desventajas tipos de tratamiento	10			10				Evaluación
Examen	40				20		20	Examen
Lista asistencia	10					10		Lista de Cotejo
	Total	20	10	20	10	10	20	

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 12 de 16

Competencia No. 4 Descripción: Tecnología de remediación de suelos

Temas y subtemas para desarrollar la competencia específica	Actividades de aprendizaje	Actividades de enseñanza	Desarrollo de competencias genéricas	Horas teórico-práctica
4.1 Introducción 4.2 Clasificación de las tecnologías de remediación 4.3 Elementos que definen el éxito de la remediación 4.4 Pruebas de tratabilidad	-Investigación de campo sobre medidas de mitigación aplicadas en situaciones de contaminación de suelos. -Realizar visitas de campo a sitios donde se apliquen tecnologías de remediación de suelos. -Implementar y evaluar tecnologías de remediación de suelos mediante modelos físicos	Búsqueda de información para identificar las diferentes medidas de mitigación Recorrido por diferentes sitios de la localidad, para identificar las tecnologías de remediación Realizar una práctica de colecta de diferentes tipos de suelo para implementar al menos una medida de remediación de suelos/SIMULACION	Organiza y planifica información. Busca y analiza información proveniente de fuentes diversas. Se compromete éticamente. Genera nuevas ideas Propicia el uso de nuevas tecnologías en el desarrollo de los temas de la Asignatura.	13-13- hrs

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 13 de 16

Indicadores de alcance (4.8)	Valor del indicador (4.9)
A. Se adapta a situaciones y contextos complejos	20
B. Hace aportaciones a las actividades académicas desarrolladas	10
C. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias a su aprendizaje	20
D. Realiza su trabajo de manera autónoma y auto regulada.	20
E. Incorpora conocimientos y actividades interdisciplinarias en su aprendizaje.	10
F. Realiza su trabajo de manera autónoma y autorregula.	20

Niveles de desempeño (4.10):

Desempeño	Nivel de desempeño	Indicadores de alcance	Valoración numérica
Competencia alcanzada	Excelente	A, B, C, D, E, F	95-100
	Notable	A, B, C, D, E	85-94
	Bueno	A, B,,C	75-84
	Suficiente	A, B	70-74
Competencia no alcanzada	Insuficiente	MENOS DE 2 INDICADORES	NA

Matriz de evaluación (4.11):

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: O
		Página 14 de 16

EVIDENCIA DE APRENDIZAJE	%	INDICADOR DE ALCANCE						EVALUACIÓN FORMATIVA DE LA COMPETENCIA
		A	B	C	D	E	F	
Investigación de tecnología de remediación	20	20						Rubrica
Mapa conceptual de la clasificación de tratamientos de remediación	10		10					Rubrica
Anteproyecto de una propuesta sobre medidas de mitigación de suelos contaminados	20			20				Evaluación
Examen	40				20		20	Examen
Lista de asistencia	10					10		Lista de Cotejo
	Total	20	10	20	10	10	20	

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 15 de 16

5. Fuentes de información y apoyos didácticos:

Fuentes de información: (5.1)

Apoyos Didácticos: (5.2)

Adams, S. R. (2002) Memorias de Curso: *Remediación de suelos*. Instituto Tecnológico de Minatitlán. Minatitlán, Ver.

Volke, S. T., Velasco, T. J. (2002) *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México D.F: INE-SEMARNAT.

Bautista Z, F. (Ed). (2004). *Técnicas de muestreo para mejoradores de recursos naturales*. UNAM, INE, CONACYT, UAY. México D.F.

Alexander, M. (1981). *Introducción a la microbiología del suelo*. México. D.F. AGT Editor, S. A.

Diario Oficial de la Federación. 2004. PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003.

Ewels, B. J., Ergas J., S. (2002). *Principios de biorrecuperación*. Mc Graw Hill. España:

Atlas, M. R., Bartha R. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Madrid, España: Addison Wesley..

Laptop
Cañon
Manual de técnicas de muestreo
Manual de verificación microbiana

	Instrumentación Didáctica para la formación y desarrollo de competencias profesionales	Código: TecNM-AC-PO-003-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015: 8.1, 8.2.2, 8.5.1	Revisión: 0
		Página 16 de 16

6. Calendarización de evaluación en semanas:

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...	N
TP	ED/U1	U1	U1	XU1-U2	U2	U2	U2	U2	XU2-U3	U3	U3	XU3-U4	U4	U4	U4	XU4		
TR																		
SD				25-27 02/25					25- 27/03/20 25				06- 08/05/ 2025			05-09 Junio/ 25		

TP=tiempo planeado

TR=tiempo real

SD=seguimiento departamental

ED=evaluación diagnóstica

EFn=evaluación formativa (competencia específica n)

ES=evaluación sumativa

Fecha de elaboración: 20 enero 2025

MC. Jorge Luis López Vargas

Nombre y firma del (de la) profesor(a)

Dra. Norma Alicia Macías Rodríguez

Nombre y firma del (de la) Jefe(a) de Departamento Académico