



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Cálculo de bonos de carbono en suelos
contaminados por hidrocarburos y
remediados.**

Casos de estudio: Mérida y Veracruz

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Jonathan Licona Rodriguez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. María del Rosario Iturbe Argüelles



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A la Dra. Ma. Del Rosario Iturbe Argüelles por su interés en expandir mi conocimiento, por su paciencia, así como su asesoramiento y apoyo tanto en lo académico, profesional, así como en lo personal.

A mis sinodales, M.I. Ana Alejandrina Castro Rodriguez, Quim. Adriana Ramírez González, Ing. Thalía Alfonsina Reyes Pimentel y M.C. David Escobedo Zenil, por su tiempo, asesoramiento y disposición durante la revisión de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, por albergarme como su alumno, por las oportunidades y experiencias que me brindaron, así como las increíbles personas que conocí.

Dedicatoria

A mis abuelos, Concha y Ricardo, que, a pesar de no conocerlos por mucho tiempo, nos brindaron un techo a mi familia y a mí, mamá siempre me habla de ustedes como un ejemplo de tenacidad y trabajo duro.

A mis abuelos, Vicky y Baldomero, por enseñarle a mi papá a ser un hombre de bien desde pequeño, no fue fácil para mi papá, pero es un gran hombre.

Para mis padres, Irene y José, por darme su amor desde pequeño, por enseñarme e inculcarme buenos valores, por hacerme feliz desde niño, a ser una persona más humana, por esos sacrificios que hicieron para que mis hermanos y yo tengamos lo mejor, por sus regaños que me enseñaron a no perder el rumbo y por cada momento compartido con ustedes, siempre les estaré en deuda, así como siempre agradeceré la esta fortuna que ustedes sean mis papás, los amo mi Arenita y mi José.

Para mis hermanos, Oswaldo y Omar, gracias por su compañía, risas, juegos, chistes y consejos que me siguen brindando día con día, por compartir tantas experiencias y ser un pilar para mí, sé que siempre puedo confiar en los dos, así como ustedes lo pueden hacer conmigo, no pude tener mejores hermanos que ustedes, gracias por tanto canijos, los amo y vamos por mucho más.

A mis amigos Josué, Karina, Alejandra, Jennifer, Frida, Giovani, Brandon, Kevin, Víctor, Nahui, Saúl, Ricardo y Eduardo, de todo corazón... muchas gracias por su amistad, por su apoyo en todo momento, por esas risas, las noches de juegos y las vivencias inolvidables, son las personas más maravillosas que conocí en la universidad.

A todos ustedes muchas gracias por tanto.

99 de esfuerzo, lo demás es tu don.

Resumen

Esta Tesis tiene como objetivo proponer una estrategia integral para la restauración de suelos afectados por derrames de hidrocarburos, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. La ejecución de esta solución se basa en la implementación de técnicas de saneamiento específicas, adaptadas a las características particulares de la zona afectada y al tipo de contaminante presente.

Para lograr una restauración efectiva, se propone llevar a cabo un proceso de reforestación en el área de estudio, utilizando especies vegetales endémicas o similares. Este enfoque busca no solo restablecer la biodiversidad local, sino también aprovechar la capacidad de las plantas para absorber carbono. La captura de CO₂ se convierte así en un componente crucial de la propuesta, generando beneficios tanto ambientales como económicos.

La emisión de bonos de carbono surge como una consecuencia directa de la captura de dióxido de carbono durante el proceso de reforestación. Este mecanismo no solo cumple con las directrices del Protocolo de Kioto establecido por la ONU, sino que también proporciona una fuente adicional de ingresos, contribuyendo así a la sostenibilidad financiera de la iniciativa.

En resumen, esta tesis se centra en la abordar la problemática de la contaminación del suelo de manera integral, con un enfoque en la restauración de la biodiversidad y la generación de beneficios económicos a través de la captura de carbono. El cumplimiento de los estándares del Protocolo de Kioto demuestra el compromiso de este proyecto con las metas internacionales de mitigación del cambio climático.

Abstract

This thesis aims to propose a comprehensive strategy for the restoration of soils affected by hydrocarbon spills, thereby contributing to climate change mitigation. The execution of this solution is based on the implementation of specific remediation techniques, adapted to the particular characteristics of the affected area and the type of contaminant present.

To achieve effective restoration, it is proposed to carry out a reforestation process in the study area, utilizing endemic or similar plant species. This approach seeks not only to restore local biodiversity but also to harness the capacity of plants to absorb carbon. The capture of CO₂ thus becomes a crucial component of the proposal, generating both environmental and economic benefits.

The issuance of carbon credits arises as a direct consequence of the capture of carbon dioxide during the reforestation process. This mechanism not only aligns with the guidelines of the Kyoto Protocol established by the United Nations but also provides an additional source of income, contributing to the financial sustainability of the thesis.

In summary, this thesis focuses on addressing soil contamination comprehensively, with an emphasis on biodiversity restoration and the generation of economic benefits through carbon capture. Compliance with the standards of the Kyoto Protocol demonstrates the commitment of this thesis to international goals for mitigating climate change.

Glosario, siglas y abreviaturas

Las siguientes definiciones están contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, así como en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (DOF: 29/03/2005)

- **Cadena de Custodia:** Registro que acompaña a las muestras desde su obtención hasta su entrega al laboratorio de pruebas y análisis.
- **Características del sitio:** Características o propiedades físicas, químicas, mecánicas y dinámicas de un suelo y de la(s) sustancia(s) distribuidas en él, así como los procesos que controlan el comportamiento y transporte del contaminante en el medio en el que se encuentra alojado y que proporcionan la comprensión de éstos para poder predecir su comportamiento futuro en el sitio.
- **Derrame:** Cualquier descarga, liberación, rebose, achique o vaciamiento de hidrocarburos que se presente en suelo.
- **Dilución de suelo contaminado:** Acción de adicionar un material determinado a un suelo contaminado, con el propósito específico de reducir la concentración de uno o más contaminantes.
- **Hidrocarburos:** Compuestos químicos, constituidos principalmente por átomos de carbono e hidrógeno.
- **Hidrocarburos de fracción ligera:** Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre cinco y diez átomos de carbono (C_5 a C_{10}).
- **Hidrocarburos de fracción media:** Mezcla de hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre diez y veintiocho átomos de carbono (C_{10} a C_{28}).
- **Hidrocarburos de fracción pesada:** Mezcla de hidrocarburos cuyo peso molecular sea mayor a C_{18} .
- **Laboratorio de pruebas:** Laboratorio con métodos acreditados y aprobados conforme a lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.
- **Medidas de urgente aplicación:** Acciones que conducen a inactivar una fuente de contaminación y a detener la migración de los contaminantes en el medio ambiente.

- **Métodos analíticos:** Los métodos propuestos en el Anexo A de esta Norma, mediante los cuales se harán los análisis para determinar el grado de contaminación de suelos contaminados con hidrocarburos.
- **Muestra duplicada:** Una de dos o más muestras o submuestras que se obtienen separadamente en el mismo sitio, al mismo tiempo y con el mismo procedimiento de muestreo.
- **Muestreo dirigido:** Muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados, cuando se cuenta con información previa del sitio, se conoce el producto derramado y es evidente la extensión de la afectación.
- **Muestreo estadístico:** Muestreo realizado conforme los métodos matemáticos establecidos, cuya función es dar certidumbre a través de observaciones determinadas, sobre diferentes parámetros para el total del universo.
- **Nivel de fondo:** Concentración en el suelo de los hidrocarburos regulados que no son atribuibles a la fuente de contaminación que se está considerando y que se encuentran de manera natural o fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena a la considerada.
- **Pasivo Ambiental:** Sitio contaminado, que no ha sido remediado, en el que pueden, además, encontrarse depósitos o apilamientos de residuos sólidos, de manejo especial o peligrosos, los cuales deben de ser manejados conforme a la legislación vigente.
- **Punto de muestreo:** Es el lugar específico donde se toma la muestra.
- **Sitio de muestreo:** Es el área a muestrear.
- **Suelo:** Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.
- **Suelo contaminado con hidrocarburos:** Aquel en el cual se encuentran presentes hidrocarburos que por sus cantidades y características afecten la naturaleza del suelo.

ABREVIATURAS

- **BP:** Puntos Base
- **BTEX:** B, benceno; T, tolueno; E, etilbenceno; X, xilenos (suma de isómeros)
- **CIE:** Comercio Internacional de Emisiones
- **CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- **CONAGUA:** Comisión Nacional del Agua
- **CRTs:** Toneladas de Reserva Climáticas
- **EBRD:** Banco Europeo de Desarrollo
- **EMA:** Entidad Mexicana de Acreditación
- **EU ETS:** Sistema de Comercio de Emisiones de la Unión Europea
- **EUAs:** Asignaciones de la Unión Europea
- **FE:** Factor de Emisión
- **GEI:** Gases de Efecto Invernadero
- **GPW:** Potencial de Calentamiento Global
- **HAPs:** Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares
- **HFL:** Hidrocarburos Fracción Ligera
- **HFM:** Hidrocarburos Fracción Media
- **HFP:** Hidrocarburos Fracción Pesada
- **HTP:** Hidrocarburos Totales del Petróleo
- **IEPS:** Impuesto Especial sobre Producción y Servicios
- **INEGI:** Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- **IPCC:** Panel Intergubernamental del cambio climático
- **JI:** Implementación Conjunta
- **LMP:** Límites Máximos Permisibles
- **MDL:** Mecanismos de Desarrollo Limpio
- **MSR:** Reserva de Estabilidad de Mercado
- **OCDE:** Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
- **PIB:** Producto Interno Bruto
- **PK:** Protocolo de Kioto
- **PNUD:** Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
- **RCE:** Reducciones Certificadas de Emisiones
- **SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- **SHCP:** Secretaría de Hacienda y Crédito Público
- **TIIE:** Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio
- **URE:** Unidades de Reducción de Emisiones
- **US EPA:** Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
- **UTM:** Mercator Transversal Universal

Contenido

Introducción	1
Objetivos y alcances.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Alcance.....	2
Capítulo 1: Antecedentes.....	3
1.1 Introducción al Protocolo de Kioto	3
1.2 Mecanismos del Protocolo de Kioto	4
1.3 El Protocolo de Kioto y La Enmienda de Doha	5
1.4 Bonos de carbono en México	6
1.5 Sistema de comercio de emisiones	7
1.6 Impuesto al carbono en México.....	9
1.7 Reducciones certificadas de emisiones.....	12
1.8 Bonos de carbono forestales en México.....	13
1.8.1 Aspectos fundamentales de los bonos de carbono forestales	13
1.9 Diferencias entre bonos de carbono y bonos de carbono forestales.....	14
Capítulo 2: Pasivos ambientales en México.....	15
Capítulo 3: Metodología de evaluación en sitios contaminados.....	16
3.1 Identificación de fuentes contaminantes.....	16
3.2 Caracterización del sitio	16
3.3 Estrategias de muestreo	17
3.4 Parámetros por evaluar y métodos analíticos.	17
3.5 Niveles de limpieza	18
3.6 Identificación de las técnicas de limpieza optimas	18
Capítulo 4: Caso Mérida, Yucatán.....	19
4.1 Alcances.....	19
4.2 Caracterización	20
4.3 Ubicación de los puntos de muestreo.....	22

4.4	Resultados de las muestras de suelo (HFM, HAP y BTEX).....	24
4.5	Resultado de características del suelo del sitio.....	25
4.6	Áreas y volúmenes de suelo contaminados	26
4.7	Propuestas de remediación	26
Capítulo 5: Caso Veracruz, Veracruz.....		29
5.1	Alcances.....	29
5.2	Caracterización	29
5.3	Ubicación de los puntos de muestreo.....	32
5.4	Resultados de las muestras de suelo (HFM y HAP)	34
5.5	Resultados de caracterización del suelo del sitio.....	35
5.6	Propuestas de remediación	36
Capítulo 6: Cálculo de bonos de carbono forestales.....		38
6.1	Metodología para el cálculo de bonos de carbono forestales	39
6.2	Caso Mérida.....	43
6.3	Solución caso Mérida.....	45
6.4	Resultados y conclusiones caso Mérida.....	51
6.5	Caso Veracruz	53
6.6	Solución caso Veracruz	55
6.7	Resultados y conclusiones caso Veracruz	61
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....		62
Bibliografía.....		64

Índice de figuras

Figura 1.1.....	11
Figura 4.1 Ubicación de la zona de estudio en Mérida, Yucatán.....	21
Figura 4.2 Ubicación de los puntos de muestreo de la Terminal Ferroviaria en Mérida, Yuc.....	23
Figura 5.1 Ubicación de la zona de estudio en Veracruz, Veracruz.....	31
Figura 5.2 Ubicación de los puntos de muestreo de la Terminal Ferroviaria en Veracruz, Ver....	33
Figura 6.1 Gráfico de especies de árboles en Mérida, Yucatán.....	43
Figura 6.2 Árbol de Jabín (<i>Piscidia piscipula</i>).....	44
Figura 6.3 Árbol de Chacá (<i>Bursera simaruba</i>).....	44
Figura 6.4 Árbol de Waxim (<i>Leucaena leucocephala</i>).....	44
Figura 6.5 Árbol de Naranja agria (<i>Citrus aurantium</i>)	44
Figura 6.6 Distanciamiento entre árbol caso Mérida.....	46
Figura 6.7 Gráfico de especies de árboles en Veracruz - Veracruz.....	53
Figura 6.8 Árbol de Frijolillo (<i>Cojoba arborea</i>)	54
Figura 6.9 Árbol de Fresno (<i>Fraxinus uhdei</i>)	54
Figura 6.10 Árbol de Ahuehuete (<i>Taxodium mucronatum</i>)	54
Figura 6.11 Árbol de Roble (<i>Tabebuia rosea</i>)	54
Figura 6.12 Distanciamiento entre árbol, caso Veracruz.....	56

Índice de tablas

Tabla 1.1 Tasas del Impuesto a Combustibles fósiles aplicables 2021 – 2022.....	10
Tabla 1.2 Ingresos mensuales del Impuesto federal al carbono (millones de MXN).....	11
Tabla 1.3 Diferencias entre bonos de carbono y bonos verdes.....	14
Tabla 4.1 Temperatura media anual (°C) en Mérida, Yucatán.....	22
Tabla 4.2 Temperatura media mensual (°C) en Mérida, Yucatán.....	22
Tabla 4.3 Concentraciones de hidrocarburos fracción media para las muestras de suelo	24
Tabla 4.4 Resultados de parámetros Físicos, Químicos y Biológicos.....	25
Tabla 4.5 Áreas y volúmenes contaminados con HFM	26
Tabla 5.1 Temperatura media anual en las estaciones de Huatusco y Jalapa, Ver.....	32
Tabla 5.2 Temperatura media mensual en las estaciones de Huatusco y Jalapa, Ver.....	32
Tabla 5.3 Concentraciones de hidrocarburos fracción media para las muestras de suelo.....	34
Tabla 5.4 Parámetros físicos, químicos y biológicos.....	35
Tabla 6.1 Comparativa de resultados obtenidos con valores máximos	51
Tabla 6.2 Comparativa de resultados obtenidos a 10, 20 y 30 años.....	61

Introducción

Los derrames de hidrocarburos representan una seria preocupación en el país, ya que no solo amenazan la seguridad y el bienestar de la vida silvestre que habita en las zonas afectadas, sino que también plantean un desafío constante para la preservación de valiosos ecosistemas y recursos naturales. Estos incidentes, cuando no se abordan adecuadamente, pueden infligir daños progresivos y duraderos al suelo, acuíferos y a la vida, lo que aumenta la urgencia de tomar medidas efectivas de restauración.

Es fundamental explorar a fondo las implicaciones de los derrames de hidrocarburos, no solo en términos de su impacto inmediato en el entorno, sino también en lo que respecta a la necesidad de desarrollar enfoques sostenibles y soluciones prácticas para mitigar estos problemas ambientales.

Esta discusión resalta la importancia de comprender a fondo las ramificaciones de los derrames de hidrocarburos en los suelos y en el entorno circundante. Además, subraya la urgente necesidad de establecer directrices precisas y eficaces para la restauración y rehabilitación, con el propósito de cumplir con el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tal como se acordó en el Protocolo de Kioto, actualmente denominado Acuerdo de París.

La gestión de derrames de hidrocarburos y la restauración de suelos contaminados son procesos críticos para mitigar el impacto ambiental y garantizar la seguridad pública. Sin embargo, es esencial reconocer que la diversidad de condiciones geográficas, ambientales y regulatorias exige una adaptación cuidadosa de los objetivos y alcances a cada situación específica de derrame.

Objetivos y alcances

Objetivo general:

Mitigar el impacto ambiental de los derrames de hidrocarburos en sitios contaminados por estos, a través de soluciones acordes con la generación de bonos de carbono.

Objetivos específicos:

Proponer técnicas de remediación adecuadas acorde con las características de la contaminación y tipo de suelo.

Establecer sistemas de monitoreo a largo plazo para evaluar la eficacia de las medidas de restauración y garantizar que no exista recurrencia de la contaminación.

Garantizar que todas las actividades cumplan con las regulaciones ambientales y los permisos correspondientes.

Alcance:

El alcance de esta tesis consiste en formular estrategias de remediación ambiental para los lugares objeto de estudio. Además, se busca llevar a cabo la restauración de dichos sitios mediante la revegetación, con la consiguiente cuantificación de los bonos de carbono generados como resultado de este proceso de restauración.

La revegetación se plantea como una estrategia de restauración ambiental que no solo busca la recuperación de la biodiversidad y la salud del suelo, sino que también tiene un propósito adicional que es la generación de bonos de carbono.

Esta medida no solo contribuye a la mitigación del cambio climático al capturar carbono atmosférico, sino que también proporciona una oportunidad para participar en mercados de bonos de carbono, fomentando prácticas sostenibles y la inversión en proyectos medioambientales.

En resumen, esta tesis busca abordar la contaminación del suelo, restaurar la biodiversidad y generar beneficios económicos a través de la captura de carbono.

1.1 Introducción al Protocolo de Kioto

A raíz del incremento de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) ha habido cambios significativos en el medio ambiente, esto ha llamado la atención de una gran parte de la comunidad internacional.

El 11 de diciembre de 1997, en la ciudad de Kioto, Japón se propuso el denominado Protocolo de Kioto (PK), el cual es un acuerdo Internacional de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, su objetivo primordial es reducir las emisiones de los 6 principales gases de efecto invernadero, los cuales son (*UNFCCC 1998*):

- Dióxido de carbono (CO_2).
- Metano (CH_4).
- Óxido nitroso (N_2O).
- Hidrofluorocarbonos (HFC).
- Perfluorocarbonos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF_6).

Dicho protocolo entró en vigor el 16 de febrero de 2005.

El principal gas de efecto invernadero es el CO_2 ; su concentración ha aumentado en un 32% desde la revolución industrial. Los GEI han experimentado un aumento en los últimos 100 años. Debido principalmente a las altas emisiones de CO_2 que han incrementado en un 80% entre 1970 y 2004; y por el incremento en las concentraciones mundiales de CH_4 y N_2O derivadas de las actividades humanas con mayor intensidad a partir de la revolución industrial (*IPCC 2007, UNFCCC 2007, BM 2009a*).

El dióxido de carbono (CO_2) es el gas de efecto invernadero (GEI) que mayor efecto proporciona en el calentamiento global, siendo responsable del 65% de este fenómeno (*FAO,2001*).

Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) la concentración de GEI tuvo un incremento estimado entre 27% a 35% desde el periodo 1000 – 1750 hasta el año 2000, esto a causa del uso de combustibles fósiles como lo son (gas licuado, gasolina, petróleo, diésel, keroseno doméstico, carbón y gas natural) así como la fabricación cementera y la deforestación.

Los bosques y zonas verdes son sumamente importante en el proceso de disminución de CO_2 , debido a la fotosíntesis, es por ello que se han estado realizando trabajos de reforestación para la disminución de emisiones de GEI con tal de prevenir y combatir hechos desastrosos como por ejemplo el aumento del nivel del mar, inundaciones, así como sequias.

El esfuerzo de prevenir este tipo de problemáticas fue el que dio origen al protocolo de Kioto (PK) y los países que firmaron el acuerdo se comprometieron a reducir un 5% las emisiones de CO₂ y de GEI en general respecto a los niveles de 1990, entre los años 2008 y 2012, comprendiendo este como el primer periodo de dicho compromiso. (UNFCCC, 1998).

El PK dividió a los países en dos grupos (UNFCCC 1998):

- Anexo I: Países desarrollados y en transición a una economía de mercado.
- Anexo B: Países con compromiso de reducción de emisiones.

Dicho pacto establece un sistema de seguimiento, así como su revisión y verificación para poder garantizar la transparencia y responsabilizar a todas las partes.

1.2 Mecanismos del Protocolo de Kioto

El PK establece mecanismos de mercado fundamentado en el comercio de concesiones de emisión. Autoriza a los países un medio adicional para cumplir sus objetivos a través de tres mecanismos basados en el mercado.

- Comercio Internacional de Emisiones (CIE).
- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).
- Implementación Conjunta (JI).

Así mismo también divide a los países como Anexo A (o anexo 1) y Anexo B que se explica a continuación.

- Anexo A (o Anexo 1): Este anexo incluye a los países industrializados y desarrollados que tienen metas de reducción de emisiones cuantificadas. Estos países se comprometen a reducir sus emisiones de GEI en comparación con los niveles de referencia (año base). Las reducciones se expresan en términos de porcentaje de reducción en comparación con el año base (se toma como base el año 1990 debido a la disponibilidad de datos). Los países del Anexo A están obligados a informar y verificar sus emisiones y reducciones de acuerdo con las directrices del Protocolo.
- Anexo B: Dentro del Anexo A, existe una sublista de países conocida como el Anexo B, que incluye a los países industrializados más comprometidos con objetivos de reducción de emisiones más específicos. Estos países han acordado metas vinculantes individuales para limitar sus emisiones de GEI. El Anexo B es un subconjunto de países dentro del Anexo A.

Estos mecanismos fomentan la moderación de GEI de una manera más rentable para así ir mitigando la contaminación en la atmósfera sin importar en la localización, lo que da pie a la “inversión verde” la cual se refiere a la asignación de recursos financieros a proyectos, empresas o instrumentos financieros que buscan generar beneficios ambientales, sociales y económicos sostenibles.

Se estableció un Fondo de Adaptación para así poder patrocinar proyectos y programas de adaptación en países en desarrollo. En el primer periodo del PK los fondos fueron financiados principalmente por proyectos de mecanismos de desarrollo limpio (MDL) y para la segunda etapa del PK. La implementación conjunta junto con el comercio internacional de derechos de emisión suministraría al Fondo una aportación del 2% de los ingresos del fondo de adaptación.

El Comercio Internacional de Emisiones (CIE) pudo permitir a los países que tienen unidades de emisión de sobra (emisiones que están permitidas, pero no se han utilizado) vender este excedente de capacidad a naciones que están por encima de los límites permitidos (*UNFCCC 1998*).

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) permite a un país del Anexo B con el compromiso de reducción de emisiones implementar algún proyecto de reducción de emisiones a países del Anexo A, estos proyectos pueden obtener créditos de reducción de emisiones Certificadas (CER) los cuales pueden ser vendidos, con una equivalencia a una tonelada de CO₂ las cuales pueden ser contabilizadas para cumplir los objetivos del PK.

La Implementación Conjunta (JI) permite a un país del Anexo B con el compromiso de disminuir o limitar emisiones de GEI obtener unidades de reducción de emisiones (URE) de un proyecto de reducción o remoción de emisiones en otra parte del Anexo B, cada uno con equivalencia a una tonelada de CO₂ que también se puede contabilizar para alcanzar el objetivo del PK.

1.3 El Protocolo de Kioto y La Enmienda de Doha

Al tener finalizada la primera etapa del PK en diciembre del año 2012, los países pertenecientes al PK se reunieron en Doha, capital de Catar, para debatir una enmienda al PK y se lograron agregar nuevos objetivos para la segunda etapa del PK que abarco el periodo de 2012 a 2020

La segunda etapa se comprometía a reducir los GEI en un 18% por debajo de los niveles de 1990. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) firmaron otro acuerdo denominado el Acuerdo Climático de Paris que reemplazo eficazmente al Protocolo de Kioto (*UNFCCC 2014*).

1.4 Bonos de carbono en México

Los bonos de carbono son instrumentos financieros diseñados para apoyar proyectos que reducen o evitan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos bonos son una forma de financiamiento para iniciativas que contribuyen a la mitigación del cambio climático, un bono de carbono equivale a 1Tonelada de CO₂ capturada o evitada (*Climate Action Reserve, 2018*).

El PK fue admitido en México el 9 de junio de 1998, aprobado en el senado el 7 de septiembre del 2000 y entro en vigor el 16 de febrero del 2005 (*SEMARNART,2015*).

México tiene el quinto lugar a nivel mundial en desarrollo de proyectos MDL, mismos que se han desarrollado en las áreas de recuperación de metano, energías renovables, eficiencia energética, procesos industriales y manejo de desechos, entre otros (*SEMARNART,2015*).

El mercado de los bonos de carbono comenzaba a tener auge como una solución de financiamiento de proyectos de energías limpias en el país. Con la reforma energética aprobada el 23 de octubre de 2008 contemplaba dentro de las siete leyes secundarias que conformaban la Reforma Energética la ley de aprovechamiento de las energías renovables, así como su financiamiento de la transición energética, la cual planteaba la disminución de la dependencia de hidrocarburos como fuente primaria de energía y el aprovechamiento de las energías renovables como lo son:

- Geotermia
- Energía Eólica
- Energía Solar
- Energía Hidroeléctrica
- Energía Marina
- Bioenergía

Con estas alternativas de energía se busca promover la participación de generadores asimismo de suministradores particulares, también para poder financiar este tipo de proyectos se preveía la participación de recursos fiscales, donaciones públicas, privadas incluyendo financiamiento internacional, así como el concepto de venta de certificados de energía renovables.

Para el país, el mercado de bonos de carbono ha tenido buena aceptación y se ha logrado expandir, a tal grado de que a partir del año 2008 ocupa el cuarto puesto a nivel mundial, con una participación del 3%. (*López, Romero,2016*)

Un par de ejemplos de inversionistas de bonos de carbono en el país es el estado de California en Estados Unidos, donde se crearon en manera independiente al MDL, los bonos de carbono “Toneladas de Reserva Climáticas” (CRTs) y se lograron firmar acuerdos con distintos estados de la frontera mexicana para el desarrollo de metodologías, así como protocolos de certificación.

El principal objetivo es colaborar al logro de las metas a nivel nacional de reducción de GEI del 30% para 2030 y de un 50% para 2050, trazadas en la Ley General de Cambio Climático la cual fue publicada en el año de 2012.

1.5 Sistema de comercio de emisiones

Unión Europea

El sistema de comercio de emisiones de la Unión Europea (European Union Emission Trading Scheme, o EU ETS, por sus siglas en inglés) es un mecanismo originado en el año de 2005, su meta principal es ayudar a las 28 naciones miembros de la Unión Europea a dar cumplimiento con sus compromisos de reducción y mitigación de emisiones de GEI acordado en el PK.

El EU ETS encabeza a la gran mayoría de los sistemas de comercio de emisiones a nivel mundial y es el de mayor importancia por volumen (hasta la entrada en vigor del mercado nacional chino). Dichos permisos de emisión proporcionados en el marco de este esquema son denominados "EUAs" (European Union Allowances). (*Plataforma Mexicana de Carbono, 2016*).

Los sectores cubiertos son los siguientes:

Plantas de generación de energía eléctrica e instalaciones de combustión, incluyendo refinación, hornos, plantas de hierro y acero, producción de cemento, vidrio, cal, ladrillos, cerámica, papel y pulpa, aviación para los vuelos dentro del Espacio Económico Europeo (EEA), instalaciones de captura de carbono, producción de petroquímicos, amoníaco, metales ferrosos y no ferrosos, yeso, aluminio, ácido nítrico, adípico y glioxílico.

En 2015 se creó la Reserva de Estabilidad de Mercado (Market Stability Reserve) es una medida estructural contra la sobre oferta de permisos de emisión. Esta reserva comenzó a operar en 2019 para neutralizar los impactos negativos de la abundancia de permisos y así aumentar la confiabilidad del sistema a futuro.

En 2016, la Comisión Europea planteó una revisión del sistema para la cuarta fase (2021-2030). El objetivo es alinear el sistema con metas de reducción de emisiones de la UE del 40% para el 2030, así como proveer mejores reglas para la distribución gratuita de permisos de emisión al igual que promover y apoyar la modernización de la generación de energía e innovación de tecnologías bajas de carbono (Comisión Europa, 2016).

California

En 2006, el estado de California consolidó su liderazgo en lo que se refiere a materia de cambio climático con la Ley de Soluciones para el Calentamiento Global (Global Warming Solutions Act), también conocida como AB32. Este sistema de comercio de emisiones de California cubre un 85% de emisiones del estado (*Plataforma Mexicana de Carbono,2016*).

Los sectores cubiertos son los siguientes:

Producción de cemento, generación, producción de vidrio, producción de hidrogeno, producción de hierro y acero, producción de plomo, cal, manufactura, producción de ácido nítrico, petróleo y de gas natural, refinerías, manufactura de papel y pulpa, autoabastecimiento de electricidad, proveedores de electricidad, proveedores de gas natural, plantas de gas licuado.

Desde su lanzamiento en 2013, el comportamiento del mercado de emisiones ha sido muy positivo, esto debido a que las reducciones de emisiones han superado las cifras esperadas y no ha habido inconvenientes a la economía del estado (El PIB de California aumento 4.1% en 2015, por encima del promedio del país). (*Plataforma Mexicana de Carbono,2016*).

1.6 Impuesto al carbono en México

Durante estos últimos años, estos impuestos al carbono han tomado gran popularidad por su intento de mitigar y reducir el uso de combustibles fósiles con iniciativas que tienen presencia en 35 diferentes jurisdicciones a partir de abril de 2021.

Estos impuestos tienen como principal objetivo (*Plataforma Mexicana de Carbono,2022*):

- Incentivar mayor eficiencia en el control de emisiones de GEI
- Incentivar a la innovación tecnológica
- Otorgar flexibilidad para reducir emisiones promoviendo la diversificación en insumos
- Disminuir la contaminación y apoyar otros planes ambientales y políticas publicas
- Aumentar la recaudación tributaria

El impuesto federal al carbono en México fue aprobado en la Reforma Fiscal presentada en 2013 y aplicado desde enero 2014, esto debido a que el territorio nacional carecía de impuestos verdes como instrumentos de gestión ambiental.

Cada combustible fósil cuenta con una tasa impuesta distinta de acuerdo con la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que presentan. Este valor está determinado por el potencial de emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles que se gravan al momento de su combustión. (*Plataforma Mexicana de Carbono,2022*).

De acuerdo con la Secretaria de Hacienda y Crédito Público (SHCP, 2019) el impuesto cumple dos objetivos principales:

- Reducir las emisiones de GEI
- Aumentar la recaudación del Gobierno Federal

No obstante, el gas natural y la turbosina, que originalmente estaban contemplados en la ley, fueron excluidas de la aplicación del impuesto por pedido del sector privado, tampoco se aplica el impuesto cuando se utiliza petróleo para manufactura y no para su combustión.

De acuerdo con el IEPS (impuesto especial sobre producción y servicios) el impuesto al carbono es aplicado al productor o importador del combustible fósil. Esta herramienta se ha estado introduciendo de manera rápida a nivel internacional, en gobiernos nacionales, así como subnacionales, se han tenido beneficios fiscales sumamente importantes.

Durante el año fiscal (2020-2021) estas iniciativas tuvieron un valor de recaudación global de USD 29,536 millones (*IACE, 2021*).

México es miembro de la OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico), y nuestra nación es la que menos impuestos ambientales tiene, y a nivel Latinoamérica y Caribe es el segundo país que más emisiones de GEI genera, solo por debajo de Brasil, esto según los datos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD,2016).

Para el 2021, el IEPS para combustibles fósiles presenta los siguientes valores mostrados en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Tasas del Impuesto a Combustibles fósiles aplicables 2021 – 2022 (DOF,2021)

Combustible	Impuesto 2021 (MXN)	Impuesto 2022 (MXN)	Variación	Impuesto 2022 (USD)	Unidad
Propano	¢7.7291	¢8.2987	7.37%	¢0.40	Litro
Butano	¢10.0023	¢10.7394	7.37%	¢0.52	Litro
Gasolina	¢13.5579	¢14.5560	7.36%	¢0.71	Litro
Turbosina y otros kerosenos	¢16.1918	¢17.3851	5.68%	¢0.84	Litro
Diesel	¢16.4501	¢17.6624	7.37%	¢0.86	Litro
Combustóleo	¢17.5558	¢18.8496	7.37%	¢0.91	Litro
Coque y petróleo	¢20.3767	¢21.8784	7.37%	\$1.06	Tonelada
Coque de carbón	\$47.7695	\$51.2901	7.37%	\$2.49	Tonelada
Carbón mineral	\$35.9692	\$36.6201	1.81%	\$1.78	Tonelada
Otros combustibles fósiles	\$51.9957	\$55.8277	7.37%	\$2.71	Tonelada de carbono contenida en el combustible

¢: centavo

\$: peso o dólar (depende de la columna en la que se encuentre)

Entre los años 2021 y 2022 los combustibles fósiles tuvieron una variación en los impuestos de 7.37% (exceptuando el carbón mineral, la turbosina y kerosenos) lo que corresponde a un ajuste inflacionario del 7.36% expuesto por INEGI. Como se muestra en la figura siguiente (SHCP,2021).

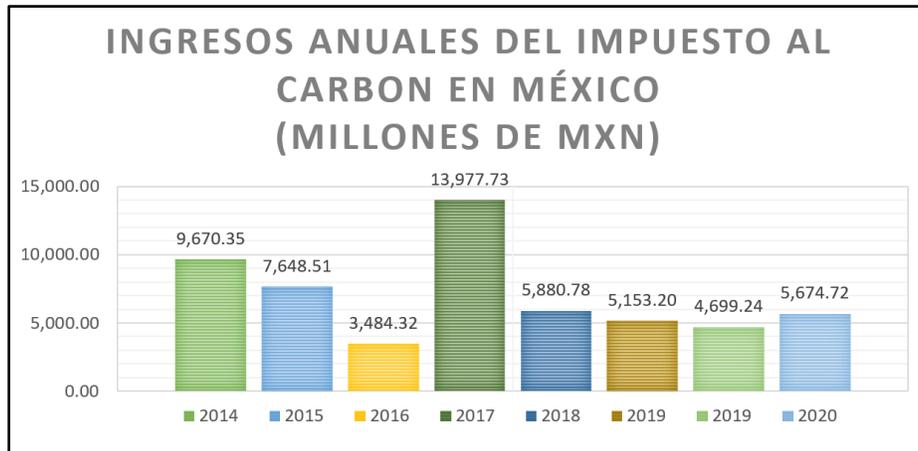


Figura 1.1 Ingresos anuales de los impuestos al carbono en México

Estos ingresos derivados de la recaudación del impuesto federal del carbono en México son destinados al presupuesto general del país y no para usos específicos.

A finales del 2021, los ingresos acumulados en México por este impuesto fueron de MXN 56,188 millones (USD 2,700 millones) como se muestra en la tabla 1.2 (SHCP,2022).

Tabla 1.2 Ingresos mensuales del Impuesto federal al carbono (millones de MXN)

Mes	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Enero	1,040.09	539.99	-1,249.88	450.69	437.37	684.03	490.06
Febrero	119.16	675.69	181.75	561.51	335.15	313.38	504.78
Marzo	495.64	588.62	2000.40	347.54	392.90	375.79	512.71
Abril	738.27	674.77	8,491.30	641.27	412.51	375.30	781.52
Mayo	616.20	525.06	925.20	774.26	520.22	361.89	287.28
Junio	728.08	347.77	557.47	477.82	447.64	444.70	385.97
Julio	628.65	132.42	-1,190.69	500.87	411.14	439.29	397.73
Agosto	675.77	-220.62	548.77	490.35	522.11	198.72	431.43
Septiembre	452.46	-342.59	373.82	376.79	435.36	350.26	658.13
Octubre	632.49	-637.21	419.56	437.72	578.74	336.61	640.51
Noviembre	700.98	-612.71	523.25	333.19	326.17	447.91	584.61
Diciembre	820.73	-1,225.29	1,756.20	488.67	336.91	371.37	-
Total	7,648.51	3,484.32*	13,997.73*	5,880.78	5,153.20	4,699.24	5,674.72

*Para la contabilidad los ingresos se tomaron en cuenta con los valores positivos.

Fuente: Plataforma Mexicana de Carbono con datos de la SHCP, 2022

1.7 Reducciones certificadas de emisiones

En diciembre de 2017 fueron publicadas las “Reglas de carácter general para el pago opcional del impuesto especial sobre producción y servicios a los combustibles fósiles mediante la entrega de los bonos de carbono” (DOF,2017)

Este documento dice, que, para poder cubrir el impuesto del carbono, deben ser válidas solo las Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que cumplan las siguientes condiciones.

- Provenir de proyectos desarrollados en México.
- Haber sido emitidos después del 1 de enero de 2014.
- Corresponder al segundo periodo del PK.

Es importante recalcar que aun cuando una RCE equivalente a una tonelada de CO₂e reducida, evitada o removida, el pago del impuesto no considera esta reducción como tal. En su lugar, toma en cuenta el valor monetario de la RCE, esto teniendo en cuenta como referencia el precio al cual es comercializada en el mercado europeo de emisiones con el nombre de Reducciones Certificadas de Emisiones Verdes (Green Certified Emission Reductions).

A partir de enero de 2018 fue estipulado un límite del 20% para las compensaciones que podrían implementarse para poder pagar el impuesto, al carbono en México, sin embargo, esta limitación fue anulada en 2019, eso podría significar que en teoría es posible utilizar las RCE para poder cumplir con la totalidad de la obligación.

1.8 Bonos de carbono forestales en México

Los bonos de carbono forestales son una categoría específica de créditos de carbono que se generan a partir de proyectos de conservación, restauración y gestión sostenible de bosques. Su objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al preservar y aumentar la cantidad de carbono almacenado en los bosques y la vegetación.

1.8.1 Aspectos fundamentales de los bonos de carbono forestales

Los bonos de carbono forestales buscan abordar el cambio climático mediante la conservación, restauración y gestión sostenible de áreas verdes. En esencia, estos proyectos se centran en aprovechar la capacidad de los bosques y áreas verdes para absorber dióxido de carbono de la atmósfera durante el proceso de fotosíntesis, almacenándolo en la biomasa.

Para lograr esto, se evita la deforestación y la degradación de los bosques, lo que a su vez previene la liberación de carbono almacenado en la vegetación y el suelo. Además, muchos proyectos de bonos de carbono forestales tienen como objetivo la conservación de la biodiversidad al proteger hábitats naturales y especies amenazadas. La conservación forestal no solo contribuye a la preservación de los ecosistemas y su diversidad biológica, sino que también promueve la restauración de áreas degradadas y la reforestación de tierras previamente desprovistas de cobertura forestal. Esto, a su vez, ayuda a restaurar la función ecológica de los bosques.

En algunos casos, estos proyectos involucran a las comunidades locales en la gestión sostenible de los recursos forestales, brindándoles incentivos económicos y otorgándoles un mayor poder de decisión. Los proyectos de bonos de carbono forestales suelen adherirse a estándares y certificaciones reconocidos para garantizar la integridad y la transparencia de los créditos de carbono generados.

Estos bonos de carbono generados por proyectos forestales se pueden vender en mercados de carbono voluntarios o regulados, lo que genera ingresos para la continuidad del proyecto y proporciona incentivos adicionales para la conservación forestal.

Un componente crucial en estos proyectos es un sistema de monitoreo y verificación sólido que demuestre las reducciones de emisiones y la captura de carbono. Esto implica la medición de la biomasa, la evaluación de los cambios en la cobertura forestal y la verificación independiente de los resultados.

1.9 Diferencias entre bonos de carbono y bonos de carbono forestales

A continuación, en la Tabla 1.3 las diferencias entre los bonos de carbono y los bonos de carbono forestales.

Tabla 1.3 Diferencias entre bonos de carbono y bonos verdes

Bonos de Carbono	Bonos de Carbono Forestales
<p>Son métodos de compensación de emisiones de GEI. Cada certificado o bono tiene equivalencia a la reducción y/o captura de 1Ton de CO₂ de la atmosfera.</p>	<p>Los bonos de carbono forestales son un subconjunto de los bonos de carbono que se centran específicamente en la conservación y gestión sostenible de los bosques y áreas verdes como una forma de reducir las emisiones de GEI y conservar la biodiversidad.</p>
<p>Sirven para que tanto personas, así como organizaciones puedan mitigar su huella de carbono, ya que, al adquirirlo se estará compensando sus emisiones de carbono a la atmosfera.</p>	<p>Los bonos de carbono forestales pueden ser una fuente de financiamiento para proyectos que ayudan a combatir la deforestación, promueven la restauración de paisajes forestales y contribuyen a la protección de ecosistemas.</p>
<p>Funciona a través de los proyectos de eficiencia energética, forestales, etc. Pueden certificar con un agente verificador para cerciorarse que se está capturando carbono de la atmosfera o disminuyendo las emisiones de carbono.</p> <p>La agencia encargada de verificar lo anterior procede a contabilizar el impacto e indica la equivalencia en bonos de carbono.</p> <p>Dichos bonos se comercializan en el mercado voluntario, donde empresas o individuos pueden adquirirlos.</p>	<p>Estos bonos se emiten cuando un proyecto forestal demuestra que ha conservado o aumentado la cantidad de carbono almacenado en los bosques en comparación con una línea de base definida. Esto se logra a través de actividades como la reforestación, la conservación de bosques existentes o la gestión forestal sostenible.</p>
<p>Son una fuente económica para proyectos que podrían no generar ingresos.</p> <p>Son una forma sencilla para las organizaciones e individuos de compensar su impacto ambiental sin tener que modificar sus actividades.</p> <p>Facilitan las actividades de conservación de ecosistemas y transición hacia fuentes de energía más sustentables.</p>	<p>Muchos proyectos de bonos de carbono forestales buscan involucrar a comunidades locales en la gestión de los recursos forestales. Proporcionan incentivos económicos para que las comunidades contribuyan a la conservación y restauración de los bosques y zonas afectadas.</p>
<p>Ambos bonos están en función de la oferta y la demanda del mercado.</p>	

Capítulo 2: Pasivos ambientales en México

Se considera pasivo ambiental a aquellos sitios contaminados por la liberación de materiales o residuos peligrosos, que no fueron remediados oportunamente para impedir la dispersión de contaminantes, pero que implican una obligación de remediación. En esta definición se incluye la contaminación generada por una emergencia que tenga efectos sobre el medio ambiente. (Art. 132. 3er párrafo Reglamento LGPGIR,2014).

Acorde con la definición previa, el pasivo ambiental es aquel que ocurrió accidentalmente o dicho derrame no fue tratado en el tiempo oportuno sin ninguna medida para contener los contaminantes y evitar su propagación.

En México las principales actividades que son fuente de contaminación en suelos, son la industria minera, forestal, petrolera, así como desechos de residuos tóxicos.

Al existir un derrame, el o los responsables deberán comunicarlo a las autoridades pertinentes (SEMARNART / COFEPRIS) al igual que tener una propuesta de remediación adecuada al sitio contaminado y al tipo de contaminante de acuerdo al trámite SEMARNART-07-035-B. (SEMARNART,2014)

Los programas de remediación para pasivos ambientales se desarrollan a partir del estudio de caracterización y en su caso, de la evaluación de riesgo ambiental. Estos programas incorporan también la información derivada de investigaciones históricas.

La elaboración de estos programas se fundamenta en un análisis detallado de la naturaleza y extensión de la contaminación, identificando los contaminantes presentes, su distribución en el medio ambiente y el riesgo al ecosistema. Además, se considera la revisión de datos y antecedentes históricos que puedan aportar información relevante sobre la cronología, fuentes de contaminación y eventos que dieron lugar al pasivo ambiental.

Capítulo 3: Metodología de evaluación en sitios contaminados

En presencia de un área afectada por contaminación, ya sea como resultado de una reciente incidencia contaminante o como parte de un pasivo ambiental, es necesario llevar a cabo la caracterización de dicho lugar.

Se requiere conocimiento de la zona, identificar los contaminantes presentes en el suelo. Esto implica delimitar con precisión las áreas y volúmenes impactados a través de una metodología específica. Dicha metodología se puede establecer en el siguiente orden (Iturbe et al. 2013).

3.1 Identificación de fuentes contaminantes

Es importante tener el mayor conocimiento de la zona afectada y de los contaminantes distribuidos en el sitio, con la finalidad de facilitar el trabajo de identificación.

En la mayoría de los casos de pasivos ambientales se carece de información del sitio contaminado, esto dificulta el tiempo y la investigación de las fuentes contaminantes.

3.2 Caracterización del sitio

La caracterización del sitio consiste en tener la información necesaria para conocer las características del área de estudio:

- **Ubicación geográfica:** La ubicación debe estar en un mapa con coordenadas o UTM referenciado con GPS.
- **Historia del sitio:** Establece un marco de referencia comprendiendo los antecedentes del lugar y su relación con la contaminación en cuestión.
- **Uso actual y futuro de suelo:** Es necesario conocer el uso potencial de suelo para determinar los estándares de limpieza en función de los trabajadores de la zona, así como zonas colindantes al sitio de estudio.
- **Geología:** Las características del suelo afectado, la presencia de acuíferos, la permeabilidad del suelo, la profundidad del nivel freático son aspectos clave a considerar en el estudio de un sitio contaminado
- **Climatología:** Establece las pautas de los intervalos de temperatura para elegir la técnica de remediación óptima al sitio.

3.3 Estrategias de muestreo

Para llevar a cabo el plan de muestreo y poder delimitar la distribución del área contaminada se emplean métodos estadísticos o dirigidos.

- **Métodos estadísticos:** En esta estrategia existen diversos métodos que pueden emplearse como lo son el muestreo aleatorio simple, muestreo al azar estratificado, muestreo de áreas de referencia y el muestreo sistemático por cuadrículas.
- **Métodos dirigidos:** Este tipo de muestreo es el más utilizado en México, tiene en consideración la selección de puntos de muestreo basándose en el conocimiento previo de la zona contaminada, así como por referencias organolépticas y visuales. Por otra parte, la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, establece el número de puntos de muestreo de acuerdo con el área de estudio.

Dentro del plan de muestreo, es esencial definir las responsabilidades del personal involucrado, justificar la ubicación y cantidad de puntos de muestreo, determinar la profundidad y el volumen de las muestras a recolectar.

Este plan debe detallar la metodología de muestreo, especificar el equipo a utilizar, establecer las medidas de seguridad y contemplar las garantías de calidad del muestreo.

3.4 Parámetros por evaluar y métodos analíticos.

Al tener conocimiento de los tipos de contaminantes, así como sus fuentes de origen se puede analizar los parámetros específicos. En ausencia de antecedentes del sitio o información sobre los contaminantes, se deben considerar parámetros generales en el análisis.

Basándose en los resultados del muestreo y los análisis, y en concordancia con los límites permitidos establecidos en la normatividad, se determinarán los niveles de limpieza necesarios para la remediación. Si los valores obtenidos en los análisis se sitúan por debajo de estos límites, no será necesaria ninguna acción de remediación.

3.5 Niveles de limpieza

La decisión de llevar a cabo la limpieza de un sitio se fundamenta en la existencia de concentraciones de contaminantes que no cumplan con los límites permisibles de las normas establecidas para suelos, ya sea la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 si se trata de contaminación por hidrocarburos, o la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 si se trata de contaminación por metales o bien, las recomendaciones de normas internacionales si se trata de otro tipo de contaminantes.

3.6 Identificación de las técnicas de limpieza optimas

Tomando en cuenta los puntos mencionados anteriormente es factible establecer la técnica de saneamiento óptima para el sitio contaminado en caso de ser requerido.

El uso de una técnica de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de la disponibilidad de la técnica, de la confiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (*Sellers, 1999*).

Para ejemplificar la metodología mencionada en este capítulo, se presentará a continuación dos casos de estudio, los cuales son pertenecientes a Ferrocarriles Nacionales de México en Liquidación.

El par de sitios que se abordaran en los siguientes capítulos son sitios contaminados por hidrocarburos, la contaminación es el resultado del manejo inadecuado de las operaciones que se realizaron en diversas actividades en las zonas de tanques de almacenamiento, talleres de mantenimiento y reparación, etc. Dichos sitios se encuentran en Mérida Yuc. Y Veracruz, Ver.

Antecedentes

El Grupo de Saneamiento y Acuíferos del Instituto de Ingeniería de la UNAM llevó a cabo un estudio de caracterización del suelo y subsuelo en la Terminal Ferroviaria de Mérida, Yucatán. Específicamente, este estudio abarcó las áreas de abastos, el área de carga y la región al oeste de la bodega.

Los resultados de este estudio presentaron la situación de contaminación por hidrocarburos en el suelo y subsuelo de las áreas mencionadas, cumpliendo así con las regulaciones establecidas en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y el Reglamento de la Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos.

Objetivos

Después de obtener los resultados de los análisis, calcular los niveles de CO₂ y/o CO₂ equivalente presentes en la zona de estudio. Luego, realizar la conversión de estos valores en bonos de carbono o bonos de carbono forestales, según el tipo de contaminante que esté presente en el área afectada. Esta conversión se basa en los estándares y regulaciones aplicables y permite gestionar los impactos ambientales, contribuyendo potencialmente a los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

4.1 Alcances

Los alcances de este estudio fueron los siguientes:

- En los sitios donde exista un manto freático somero serán incluidas muestras de agua subterránea para análisis de hidrocarburos con la finalidad de evaluar el impacto de la contaminación.
- En caso de existir contaminación serán definidas las metodologías de remediación de suelo y subsuelo aplicables a cada sitio, que permitan alcanzar los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Se tomará como base sus características particulares.

4.2 Caracterización

Se consideraron los siguientes aspectos fundamentales para la caracterización de la zona de estudio:

- **Ubicación geográfica:** La Terminal Ferroviaria de Mérida, Yuc. (Figura 4.1), se ubica en la calle Sur 43 s/n Col. Sta Cecilia, Mérida, Yuc. está actualmente concesionada a Ferrocarril Chiapas-Mayab.
Está ubicada entre los paralelos 20°45' y 21°15' de latitud Norte y los meridianos 89°30' y 89°45' de longitud Oeste. Su altura promedio, sobre el nivel del mar, es de nueve metros.
- **Historia del sitio:** Previo a estar concesionada por Ferrocarril Chiapas-Mayab, pertenecía a Ferrocarriles Nacionales, sin embargo se dio una privatización de ferrocarriles en México en la última década del siglo XX.
- **Uso actual y futuro de suelo:** El uso del suelo actual es industrial ya que está dedicado a dar servicio en el taller de locomotoras, carga y descarga, así como al despacho de lubricantes.
- **Geología:** La península de esta constituida por una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario Reciente (*Butterlin y Bonet, 1960; Bonet y Butterlin, 1962*).

El municipio de Mérida se encuentra sobre rocas sedimentarias del Neógeno, en llanuras; sobre áreas donde originalmente había suelos denominados Leptosol y Phaeozem; tienen clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad y semiseco muy cálido y cálido, y están creciendo sobre terreno previamente ocupado por agricultura y selva. (*INEGI 2010*).

- **Climatología:** La temperatura media anual es de 26°C, la temperatura máxima promedio es alrededor de 36°C y se presenta en el mes de mayo, la temperatura mínima promedio es de 16°C y se presenta en el mes de enero. (*INEGI*).

El clima de la capital de Yucatán se clasifica como cálido subhúmedo, con lluvias en verano. La temperatura media anual y media mensual que se han registrado en la estación meteorológica de Mérida son las que se presentan a continuación en las tablas (Tabla 4.1 y 4.2).



Figura 4.1 Ubicación de la zona de estudio en Mérida, Yucatán

Tabla 4.1 Temperatura media anual (°C) en Mérida, Yucatán

ESTACIÓN	PERIODO	TEMPERATURA PROMEDIO	TEMPERATURA DEL AÑO MAS FRIO		TEMPERATURA DEL AÑO MAS CALUROSO	
			AÑO	TEMPERATURA	AÑO	TEMPERATURA
Mérida	1950 - 1999	26	1997	25.3	1995	26.5

INEGI, 2009

Tabla 4.2 Temperatura media mensual (°C) en Mérida, Yucatán

Estación	AÑO	MESES											
		Ene	Feb	Mzo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Mérida													
Promedio	1999												
Año más frío	1976	21.6	22.6	27.1	26.8	27.9	26.1	26.7	27.0	26.5	25.1	23.7	22.6
Año más caluroso	1995	23.8	24.5	25.9	28.6	31.0	29.6	28.2	28.0	27.5	25.9	25.4	23.9

INEGI, 2009

Los valores de temperaturas máximas, media y mínima obtenidos en Mérida son 40.2°C, 26.2°C y 14°C respectivamente; la humedad relativa máxima es de 83%, la media de 72% y la mínima de 61%.

4.3 Ubicación de los puntos de muestreo

En la Figura 4.2 se presenta la ubicación y distribución de las muestras, así como las profundidades a las que se obtuvieron.

La ubicación de los puntos de muestreo de suelo se seleccionó después de un recorrido que se realizó por el área de estudio.



Figura 4.2 Ubicación de los puntos de muestreo de la Terminal Ferroviaria en Mérida, Yuc.

4.4 Resultados de las muestras de suelo (HFM, HAP y BTEX)

Hidrocarburos de fracción media (HFM)

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados para los hidrocarburos fracción media de las muestras de suelo en el sitio de estudio.

Tabla 4.3 Concentraciones de hidrocarburos fracción media para las muestras de suelo

NÚM.	IDENTIF.	PROF (m)	HFM (mg/kg)	Observaciones.
1	MER1	1.00	178	Sin olor
2	MER2A	1.00	141	Sin olor
3	MER2B	1.20	120	
4	MER3**	1.00	21 689	Fuerte olor a hidrocarburo
5	MER4A*	0.70	11 977	Fuerte olor a hidrocarburo
6	MER4B	1.10	464	
7	MER5	1.20	205	Sin olor
8	MER6	1.40	217	Sin olor
9	MER7	1.30	335	Sin olor
10	MER8A	1.00	745	Sin olor
11	MER8B	1.20	ND	
12	MER9A	1.00	220	Sin olor
13	MER10	1.20	233	Sin olor
14	MER11	1.00	ND	
15	MER12	1.00	ND	Sin olor
16	MER13	1.00	ND	Sin olor

Fuente: Grupo de Saneamiento y Acuíferos; Instituto de Ingeniería. UNAM.

NOTAS Y SIMBOLOGIA:

(*) Mayor al LMP de 5,000.00 mg/kg

(**) Máxima concentración detectada

(ND), Inferior al límite de detección

Se aprecia que para el análisis de HFM de los 16 puntos muestreados solo 2 excedieron los límites permisibles, con base en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP)

Para Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares la presencia de contaminantes no rebasó los límites máximos permisibles de acuerdo con NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

BTEX

De acuerdo con el análisis BTEX, al igual que el análisis de HAP, no se excedió el límite máximo permisible estipulado en la normativa.

4.5 Resultado de características del suelo del sitio

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados correspondientes a los análisis de los parámetros físicos, químicos y biológicos.

Tabla 4.4 Resultados de parámetros Físicos, Químicos y Biológicos

PARÁMETRO	INTERVALO
pH	7.8
Contenido de agua, w (%)	22
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	194.2
Densidad aparente, ρ_b (g/cm^3)	1.21
Densidad real, ρ_r (g/cm^3)	2.1
Porosidad, n	42.4
Materia orgánica (%)	2.5
Fracción de carbono orgánico	0.0167
Análisis granulométrico	Calizo con Limo
Fósforo disponible (mg/kg)	4.6
Conteo de bacterias heterótrofas (UFC)	4×10^4

Fuente: Grupo de Saneamiento y Acuíferos; Instituto de Ingeniería. UNAM.

4.6 Áreas y volúmenes de suelo contaminados

Los volúmenes que requieren remediación se calcularon con las áreas obtenidas con las profundidades a las que se obtuvieron las muestras (Tabla 4.5)

Tabla 4.5 Áreas y volúmenes contaminados con HFM

Intervalo de concentraciones de HFM (mg/kg)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
>10 000	79	79
>20 000	79	158
TOTAL	158	237

Fuente: Grupo de Saneamiento y Acuíferos; Instituto de Ingeniería. UNAM.

El volumen de suelo que sobrepasa la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 para HFM entre la superficie y 2.00 m de profundidad es de 237 m³, que es el volumen total por remediar.

4.7 Propuestas de remediación

Se plantean dos opciones de remediación del volumen de suelo contaminado, biopilas y lavado de suelo.

Descripción de las técnicas a aplicar

Biopilas

La biopila se define como un proceso biológico controlado donde los contaminantes orgánicos son biodegradados y mineralizados. El proceso consiste en estimular la actividad microbiana, aireando y/o adicionando nutrientes y humedad (*Fahnestock et al, 1998*).

La biopila es una técnica de biorremediación apropiada para suelos contaminados con hidrocarburos. Son empleadas para reducir las concentraciones de hidrocarburos en suelos con permeabilidad alta a través de biodegradación.

La biodegradación de hidrocarburos, es un proceso en el cual los microorganismos reducen los compuestos químicos a compuestos más simples, por lo que se presenta como una opción viable para el tratamiento de suelos contaminados. Para que la degradación sea llevada a cabo, es necesario que las condiciones ambientales sean optimas, así como la cantidad de microorganismos degradadores de hidrocarburos sean los suficientes, generalmente estos son autóctonos del sitio de estudio.

La principal problemática que presenta la biodegradación es que en presencia de altas concentraciones del contaminante en suelo pueden presentar efectos de toxicidad sobre la población microbiana. Una complicación más es la insuficiencia de nutrientes en suelo; no obstante, la presencia de cantidades mínimas de nitrógeno y fosforo optimizan la posibilidad de biodegradación en suelo.

Ventajas

- Los contaminantes son mineralizados en vez de pasar a otra condición.
- La aplicación del tratamiento es de fácil aplicación.
- El periodo del saneamiento de suelo en general es de entre 3 u 6 meses, dependiendo de las condiciones climáticas, concentración de hidrocarburos, así como el tipo de suelo.
- El suelo saneado es colocado nuevamente en su sitio de extracción.
- El costo de las biopilas es más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

Desventajas

- Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) de cinco y seis anillos son difícilmente degradables en las biopilas.
- Las biopilas no son efectivas para concentraciones de HTP superiores a 50 000 mg/kg,
- La presencia de metales pesados puede inhibir el crecimiento de microorganismos.

Lavado de suelo

En esta técnica se excava el suelo contaminado, se forman pilas con éste y se instalan drenes dentro de las mismas a través de las cuales se introduce el agua con surfactante (*Jafvert 1996*). Esta técnica es apropiada para disminuir la presencia de compuestos químicos solubles, compuestos derivados del petróleo, metales pesados, bifenilos policlorados y compuestos policromáticos. (*Pratt, 1993*).

Requerimientos.

Para aplicar esta técnica es necesario conocer las siguientes características del suelo:

- Tipo de suelo,
- Permeabilidad del suelo (debe ser mayor a 1×10^{-5} cm/s),
- Porosidad del suelo,
- Contenido de material orgánica,
- Diseño y construcción de estanques de lavado o de celdas para las pilas, y
- Características de la solución de lavado.

Ventajas

- Alta eficiencia de remoción de hidrocarburos,
- El tiempo de tratamiento es menor con respecto a los métodos de biorremediación

Desventajas

- El costo del tratamiento es mayor a las técnicas de biorremediación,
- Se requiere el tratamiento del agua residual

Se considera una remediación mediante extracción del suelo desde la superficie hasta 2 m de profundidad y el lavado de este en el exterior.

El área de suelo afectado es de 158 m^2 , considerando una profundidad hasta de 2 m; entonces se tiene un volumen aproximado de 237 m^3 .

Antecedentes

El Grupo de Saneamiento y Acuíferos del Instituto de Ingeniería de la UNAM llevó a cabo un estudio de caracterización del suelo y subsuelo en el área de talleres de la terminal ferroviaria de Veracruz, Ver (Estudio de Caracterización de Suelo del Instituto de Ingeniería, UNAM. Veracruz, Ver. 2010).

Objetivos

Después de obtener los resultados de los análisis, pretender calcular los niveles de CO₂ y/o CO₂ equivalente presentes en la zona de estudio. Posteriormente, realizar la conversión de estos valores en bonos de carbono o bonos de carbono forestales, dependiendo del tipo de contaminante que esté presente en el área afectada. Esta conversión se basará en los estándares y regulaciones aplicables, y permitirá gestionar los impactos ambientales, contribuyendo potencialmente a los esfuerzos de mitigación del cambio climático.

5.1 Alcances

Los alcances del estudio realizado fueron los siguientes:

- En los sitios donde exista un manto freático somero serán incluidas muestras de agua subterránea para análisis de hidrocarburos con la finalidad de evaluar el impacto de la contaminación.

5.2 Caracterización

Se consideraron los siguientes aspectos fundamentales para la caracterización de la zona de estudio:

- **Ubicación geográfica:** La Terminal Ferroviaria de Veracruz, Ver. (Figura 5.1), se encuentra localizada en la calle de Montesinos no. 1, Col. Centro, CP 91700, Veracruz, Ver. Actualmente esta concesionada a la empresa FERROSUR, S.A. de C.V.
- **Historia del sitio:** Previo a estar concesionada por la empresa FERROSUR, S.A. de C.V. pertenecía a Ferrocarriles Nacionales, sin embargo se dio una privatización de ferrocarriles en México en la última década del siglo XX.
- **Uso actual y futuro de suelo:** El uso del suelo actual es de uso industrial y está dedicado a la inspección de locomotoras, taller de carros y zona de abastos.

- **Geología:** La geología de Veracruz de Ignacio de la Llave es diversa y compleja, con una variedad de formaciones que abarcan desde zonas costeras con depósitos aluviales hasta áreas montañosas con rocas sedimentarias, metamórficas e incluso evidencia de actividad volcánica.

Los afloramientos de rocas volcánicas se distribuyen en el área de Los Tuxtlas, donde su expresión morfológica de volcanes y prominencias topográficas contrastan con la llanura costera.

Las características geológicas han sido moldeadas por procesos naturales a lo largo de millones de años, lo que contribuye a la singularidad del paisaje y la geodiversidad de la región.

- **Climatología:** El clima que se tiene presente en el municipio de Veracruz es tropical, muestra una temperatura media anual de 23.3°C y una precipitación pluvial media anual de 1,500mm (Edo. Veracruz, 2005).

Los datos de temperatura y precipitación se obtuvieron de las dos estaciones meteorológicas más cercanas a la ciudad de Veracruz, estas son las de Huatusco y Jalapa (Tablas 5.1 y 5.2).



Figura 5.1 Ubicación de la zona de estudio en Veracruz, Veracruz

Tabla 5.1 Temperatura media anual en las estaciones de Huatusco y Jalapa, Ver

Estación	Período	Temperatura Promedio (°C)	Temperatura del año más frío (°C)		Temperatura del año más caluroso (°C)	
			Año	Temperatura	Año	Temperatura
Huatusco	1961-1999	18.4	1999	17.3	1975	20.8
Jalapa	1920-1999	18.4	1931	16.9	1975	19

(INEGI, 2008)

Tabla 5.2 Temperatura media mensual en las estaciones de Huatusco y Jalapa, Ver

Estación	Periodo	MESES											
		Ene	Feb	Mzo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Huatusco													
Promedio	1961 - 1999	15	15.6	17.8	20.2	21.4	21.3	20	20	20.4	18.8	17	13
Año más frío	1999	13.8	14.4	16.9	19.7	20.8	20	18.5	20	19.2	17.2	14.3	13
Año más caluroso	1975	16.7	19.2	22.2	23.8	23.3	22.7	21.6	22	21.3	20.3	19.5	17
Jalapa													
Promedio	1920 - 1999	15.1	16.2	18	20.1	21.7	21	19.7	20	19.5	18.3	16.4	15
Año más frío	1931	12.7	14.7	15.2	16.5	18.6	19.2	19.4	18	18.3	17.9	15.9	16
Año más caluroso	1975	16.1	17.8	20.6	22.6	22.2	20.2	19.2	20	18.6	18.6	17.4	15

(INEGI, 2008)

La temperatura media anual y la temperatura media mensual del mes más frío en la ciudad de Veracruz es superior a 18°C.

5.3 Ubicación de los puntos de muestreo

Se obtuvieron 44 muestras a una profundidad de entre 2.0m a 4.0m en promedio, en 22 puntos de muestreo. Se llevo a cabo un duplicado por cada 10 muestras tomadas. Para 3 puntos de muestreo se obtuvo una sola muestra a una profundidad (3 muestras); para 16 puntos, se muestreo a dos profundidades (32 muestras); para 3 puntos a tres profundidades (9 muestras). Lo anterior fue decidido en campo, esto en función de la apreciación visual y organoléptica. La totalidad de muestras fueron 44, incluido 4 duplicados.

En la Figura 5.2 se muestran las ubicaciones, así como distribuciones de los puntos de muestreo, agregando sus profundidades a las cuales se realizaron. La ubicación de los puntos de muestreo de suelo se seleccionó después de un recorrido que se realizó por el área de estudio.

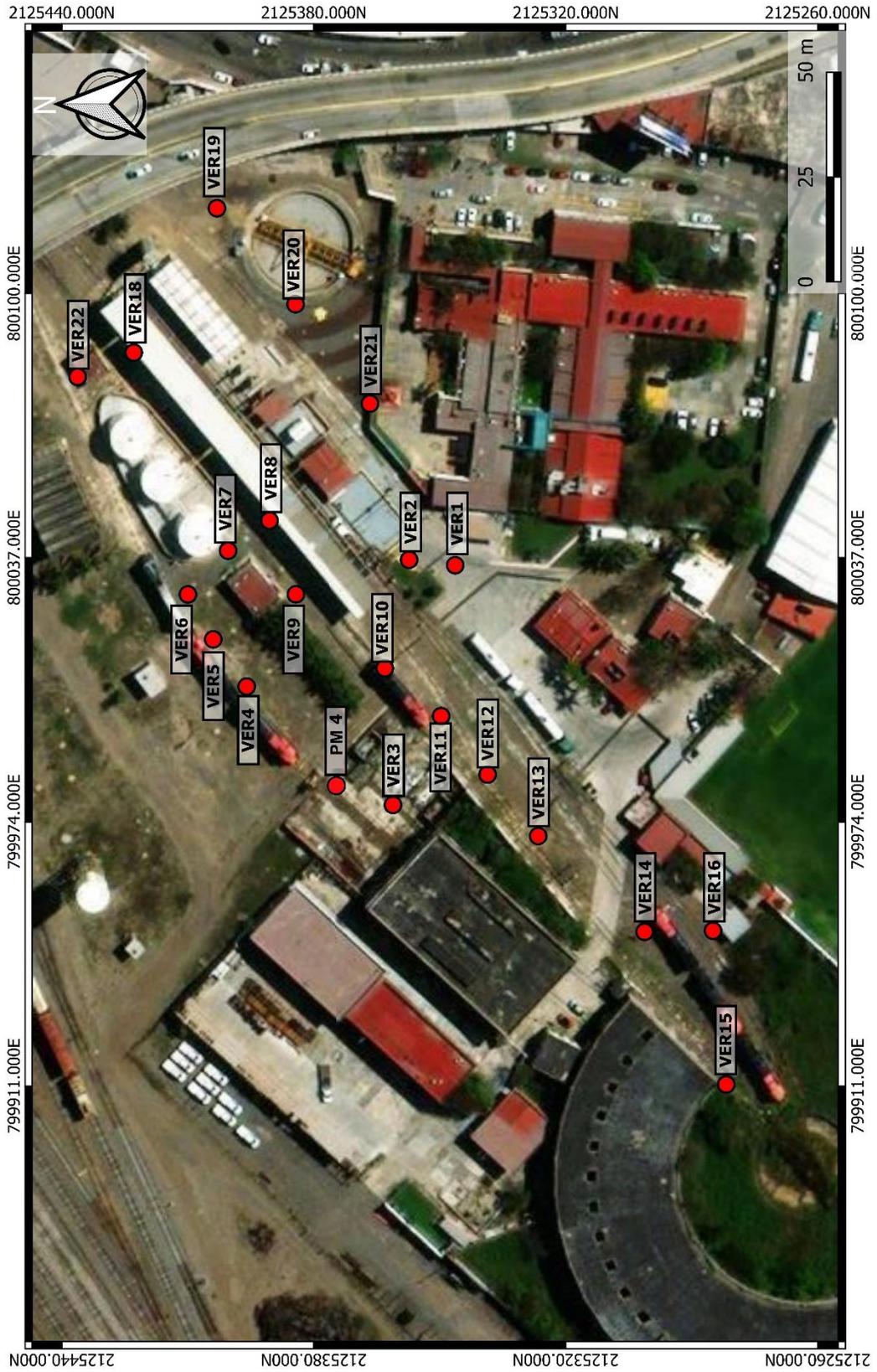


Figura 5.2 Ubicación de los puntos de muestreo de la Terminal Ferroviaria en Veracruz, Veracruz

5.4 Resultados de las muestras de suelo (HFM y HAP)

Hidrocarburos fracción media (HFM)

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados para el análisis de Hidrocarburos Fracción Media

Tabla 5.3 Concentraciones de hidrocarburos fracción media para las muestras de suelo

NUM.	IDENTIF.	PROF. (m)	HFM (mg/kg)	OBSERVACIONES
1	VER1A*	1.60	12 527	Mucho olor a hidrocarburos.
2	VER1B*	4.20	10 916	
3	VER2A*	2.00	11 026	Mucho olor a hidrocarburos.
4	VER2B	4.20	ND	
5	VER3A*	2.00	15 636	Mucho olor a hidrocarburos.
6	VER3B*	4.20	14 028	
7	VER4A	2.00	ND	Sin olor.
8	VER4B	4.10	ND	
9	VER5A*	2.00	21 430	Poco olor a hidrocarburos.
10	VER5B*	4.20	6 361	Mucho olor a hidrocarburos.
11	VER5BD	4.30	ND	
12	VER6A	2.00	ND	Poco olor a hidrocarburos.
13	VER6B	4.00	ND	
14	VER7A*	2.00	31 147	Mucho olor a hidrocarburos.
15	VER7B*	4.30	7 157	
16	VER8A*	2.00	14 638	Mucho olor a hidrocarburos.
17	VER8B*	4.20	14 128	
18	VER9A*	1.60	8 785	Poco olor a hidrocarburos.
19	VER9B	3.00	ND	
20	VER10A	2.00	1634	Mucho olor a hidrocarburos.
21	VER10B	4.00	ND	
22	VER11A	2.00	2 285	Mucho olor a hidrocarburos.
23	VER11B*	4.00	18 225	
24	VER11BD*	4.20	10 269	
25	VER12A*	2.00	14 545	Olor a hidrocarburos.
26	VER12B	4.00	4 130	
27	VER13A	2.00	ND	Olor a hidrocarburos.
28	VER13B	4.00	ND	
29	VER14A	2.00	4 513	Olor a hidrocarburos.
30	VER14B	4.00	ND	
31	VER15A	2.00	4 148	Olor a hidrocarburos.
32	VER15B	4.00	ND	
33	VER16A	2.00	ND	Poco olor a hidrocarburos.
34	VER16B	4.00	ND	
35	VER16BD	4.20	ND	
36	VER17A	2.00	ND	Sin olor.
37	VER17B	4.00	ND	
38	VER18A*	2.00	16 814	Olor a hidrocarburos
39	VER18B*	4.00	6 034	
40	VER19A*	2.40	53 779	Mucho olor a hidrocarburos.

41	VER20A*	2.20	17 878	Mucho olor a hidrocarburos.
42	VER21A*	2.30	16 992	Olor a hidrocarburos
43	VER22A**	2.30	57 787	Poco olor a hidrocarburos.
44	VER22AD*	2.40	19 843	

Fuente: Grupo de Saneamiento y Acuíferos; Instituto de Ingeniería. UNAM.

NOTAS y SIMBOLOGÍA:

* Mayor al LMP de 5,000.00 mg/kg

** Máxima concentración detectada

ND, Inferior al límite de detección

En los resultados de los análisis de HFM se puede visualizar que, de las 44 muestras recolectadas, 27 de ellas exceden los límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003,

Hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP)

Para los resultados de Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares, si bien existe presencia de contaminantes, estos no exceden los límites máximos permisibles estipulados en la normatividad.

5.5 Resultados de caracterización del suelo del sitio

En la Tabla 5.4 se aprecia los resultados correspondientes a los análisis de los parámetros físicos, químicos.

Tabla 5.4 Parámetros físicos, químicos y biológicos

PARÁMETRO	INTERVALO
Ph	7.1-7.4
Contenido de agua, w (%)	19 - 22
Conductividad eléctrica (µS/cm)	0.42 - 0.55
Densidad aparente, ρ_b (g/cm³)	1.34
Densidad real, ρ_r (g/cm³)	2.63
Porosidad, n (%)	49.0
Materia orgánica (%)	2.0
Fracción de carbono orgánico	0.019
Análisis granulométrico	Arena
Potencial redox	27.4 - 32.3
Fósforo disponible (mg/kg)	9.2
Conteo de bacterias heterótrofas (UFC)	6 x 10 ⁶

Fuente: Grupo de Saneamiento y Acuíferos; Instituto de Ingeniería. UNAM.

5.6 Propuestas de remediación

Dados los resultados obtenidos en los análisis mostrados con anterioridad, se pudo observar las características del suelo, el cual es una arena franca que presenta una alta permeabilidad.

En consecuencia, se ha determinado que la opción más adecuada para abordar la contaminación del sitio es mediante la técnica de biorremediación. Esta elección se fundamenta en las condiciones climáticas del área y en la distribución espacial del lugar.

Descripción de las técnicas posibles a aplicar

Biopilas

Esta propuesta de remediación es descrita en el capítulo cuarto de este trabajo, (pp.26)

Biolabranza

La biolabranza se refiere a la excavación de sitios contaminados con hidrocarburos y depositados en capas sobre un terreno (*Flathman P.1994*).

El suelo contaminado se somete a un proceso similar a la labranza para potenciar el crecimiento bacteriano. Estas operaciones imitan tres condiciones naturales fundamentales: la simulación de la lluvia, la fertilización y la aireación del suelo. Este enfoque tiene como objetivo principal mejorar las condiciones para el desarrollo y actividad bacteriana, acelerando así el proceso de biorremediación (Suthersan S.S. 1997).

Los parámetros fundamentales que deben controlarse son: pH, temperatura y contenido hídrico de suelo.

Ventajas:

- Los contaminantes son destruidos en vez de pasar a otra condición.
- La aplicación del tratamiento no tiene mucha dificultad.
- El periodo del saneamiento de suelo es de entre 3 y no mayor a 6 meses, esto dependiendo de las condiciones climáticas, concentración de hidrocarburos, así como el tipo de suelo.
- El suelo saneado es colocado nuevamente en su sitio de extracción.
- Su costo es más competitivo con respecto a otras técnicas de saneamiento de suelos.

Desventajas.

- Los Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares (HAP) que presentan 5 y 6 anillos difícilmente son degradables con la biolabranza.

- Su aplicación no es para concentraciones de hidrocarburos superiores a 50 000 mg/kg.
- La presencia de metales pesados puede inhibir el crecimiento microbiano.
- Requiere áreas extensas para su aplicación.

Capítulo 6: Cálculo de bonos de carbono forestales

Se propone utilizar el cálculo de bonos de carbono forestal para ambos casos como una estrategia eficaz en un escenario donde no existen emisiones de GEI que permitan la emisión de bonos de carbono convencionales. La razón de esta elección se basa en la capacidad de la herramienta de bonos de carbono forestales para abordar objetivos importantes, a pesar de la falta de emisiones directas de GEI. Esta estrategia aborda la recuperación y restauración de áreas contaminadas, con un enfoque particular en la mejora del almacenamiento de carbono en áreas verdes.

La herramienta de bonos de carbono forestales se convierte en una aliada valiosa en esta situación, ya que permite la consideración de las siguientes etapas:

- **Saneamiento del área Contaminada:** En primer lugar, se destina esfuerzo y recursos a la remediación del área contaminada. Este paso es crucial para mitigar los impactos adversos de la contaminación en la salud humana y en el entorno ecológico. La limpieza y recuperación del suelo y el agua son esenciales para establecer una base segura y saludable.
- **Reforestación con especies nativas o similares:** Una vez que el área ha sido saneada y es segura para el medio ambiente, se procede a la reforestación de la zona. Se prioriza la plantación de especies de flora nativas de la región o, en su defecto, de especies similares que no afecten negativamente la biodiversidad local. Esta decisión tiene en cuenta la importancia de preservar los ecosistemas autóctonos.
- **Captura de carbono:** La reforestación ayuda en la captura y almacenamiento de carbono. A medida que los árboles crecen, absorben CO₂ de la atmósfera y lo almacenan en su biomasa y en el suelo. Esta capacidad de secuestro de carbono se traduce en la generación de créditos de carbono forestales.
- **Contribución a la mitigación del cambio climático:** La reforestación incrementa el almacenamiento de carbono en áreas verdes y se generan beneficios adicionales como la mejora en la calidad del aire y se coadyuva a proteger la biodiversidad.

6.1 Metodología para el cálculo de bonos de carbono forestales

- **Paso 1: Estimación de carbono antes del proyecto (línea de base)**

Durante esta etapa, se lleva a cabo una evaluación minuciosa del área destinada a la reforestación. Esto se realiza con el objetivo de determinar la cantidad de carbono presente en el suelo y la vegetación antes de iniciar el proyecto de reforestación. Esta evaluación proporciona una línea base que permitirá medir y comprender los cambios en el almacenamiento de carbono tras la implementación del proyecto de reforestación.

Esto implica calcular el carbono almacenado en la vegetación que se pretende plantar previo al proyecto de reforestación y en el suelo, teniendo en cuenta factores como la densidad de la madera, el diámetro promedio de los árboles y el número de árboles por unidad de área. La estimación de la línea de base es esencial para comprender la cantidad de carbono que el proyecto tiene el potencial de capturar y, por lo tanto, para evaluar el impacto real en la mitigación del cambio climático.

Esta evaluación proporciona un punto de referencia para medir las emisiones que han sido evitadas y la generación de bonos de carbono en fases posteriores del proyecto.

Para ello se emplea la siguiente fórmula.

$$n_{\text{árboles}} = \frac{A_{\text{proyecto}}}{A_{\text{árboles}}} \quad (1)$$

En donde:

$n_{\text{árboles}}$: Numero de árboles

A_{proyecto} : Área del proyecto (m²)

$A_{\text{árboles}}$: Área requerida para cada árbol (m²)

Se procede a hacer el cálculo de volumen del tronco del árbol antes del proyecto, para ello se emplea la fórmula del volumen de un cono.

Para el volumen inicial:

$$V_{\text{tronco}(i)} = \frac{\pi * r^2_{(i)} * h_{(i)}}{3} \quad (2)$$

En donde:

$V_{\text{tronco}(i)}$: Volumen inicial del tronco por árbol (m³)

$h_{(i)}$: Altura inicial del árbol (m)

$r^2_{(i)}$: radio inicial del tronco árbol (m²)

π y 3: son constantes

Calculando el número de árboles y su volumen por unidad se procede a hacer la estimación del carbono presente por árbol previo al proyecto:

Carbono por árbol antes del proyecto: Se utiliza la densidad de la madera para calcular el carbono por árbol antes del proyecto.

$$CO_{2p/árbol(i)} = \frac{V_{tronco(i)} * \rho_{madera}}{1000} \quad (3)$$

En donde:

$CO_{2p/árbol(i)}$: Cantidad inicial de carbono por árbol (Antes del proyecto) (tCO₂)

$V_{tronco(i)}$: Volumen inicial del tronco por árbol (Antes del proyecto) (m³)

ρ_{madera} : Densidad de la madera (kg/m³)

1000: se implementa para que el resultado sea en tCO₂

Realizado el cálculo inicial del carbono por unidad de árbol se hace el cálculo del carbono previo al proyecto contemplando el total de árboles a plantar.

Carbono total antes del proyecto: Se realiza el producto del carbono por árbol previo al proyecto por el número de árboles a plantar.

$$CO_{2Total(i)} = CO_{2p/árbol(i)} * n_{árboles} \quad (4)$$

Donde:

$CO_{2Total(i)}$ Carbono total inicial (Antes del proyecto) (tCO₂)

$CO_{2p/árbol(i)}$ Carbono inicial por árbol (antes del proyecto) (tCO₂)

$n_{árboles}$: Numero de árboles

- **Paso 2: Crecimiento de biomasa (carbono después del proyecto)**

En este paso, el enfoque se centra en el crecimiento de la biomasa de los árboles plantados como resultado del proyecto de reforestación en un tiempo determinado. Se estima el incremento de la cantidad de carbono capturado en la vegetación y el suelo después de la implementación del proyecto. Se considera la tasa de crecimiento anual de las especies de árboles seleccionadas y se calcula la biomasa adicional que se acumulará con el tiempo. Este proceso refleja el impacto directo del proyecto en la absorción de carbono, lo que permite cuantificar las reducciones de emisiones y la generación de bonos de carbono. El cálculo del carbono después del proyecto establece la base para demostrar cómo la reforestación

contribuye de manera efectiva a mitigar el cambio climático al aumentar el secuestro de carbono en la atmósfera.

Para ello se procede a calcular el volumen final del tronco del árbol tomando en cuenta la tasa de crecimiento de diámetro anual y el tiempo de duración del proyecto para determinar el diámetro y altura finales:

Para el diámetro final:

$$d_f = (T_{id} * n_{años}) + d_i \quad (5)$$

En donde:

d_f : Diámetro final(m)

T_{id} : Tasa de incremento de diámetro anual.

$n_{años}$: Número de años de duración del proyecto

d_i : Diámetro inicial (m)

Para la altura final:

$$h_f = (T_{ih} * n_{años}) + h_i \quad (6)$$

En donde:

h_f : Altura final(m)

T_i : Tasa de incremento de altura anual.

$n_{años}$: Número de años de duración del proyecto

h_i : Altura inicial (m)

Se calcula el volumen del tronco con la formula del volumen de cono con los nuevos datos de altura y radio:

$$V_{tronco(f)} = \frac{\pi * r^2_{(f)} * h_{(f)}}{3} \quad (7)$$

En donde:

$V_{tronco(f)}$: Volumen final del tronco por árbol (m³)

$h_{(f)}$: Altura del árbol (m)

$r^2_{(f)}$: radio final del tronco árbol (m²)

π y 3: son constantes

Carbono por árbol después del proyecto:

$$CO_{2p/árbol(f)} = \frac{V_{tronco(f)} * \rho_{madera}}{1000} \quad (8)$$

En donde:

$CO_{2p/árbol(f)}$: Cantidad final de carbono por árbol (Después del proyecto) (tCO₂)

$V_{tronco(f)}$: Volumen final del tronco por árbol (Después del proyecto) (m³)

ρ_{madera} : Densidad de la madera (kg/m³)

Se procede a calcular el carbono total del proyecto de la siguiente manera:

$$CO_{2Total(f)} = (CO_{2p/árbol(f)})(n_{árboles}) \quad (9)$$

En donde:

$CO_{2Total(f)}$: Cantidad Final de carbono (Después del proyecto) (tCO₂)

$CO_{2p/árbol(f)}$: Cantidad final de carbono por árbol (Después del proyecto) (tCO₂)

$n_{árboles}$: Numero de árboles

- **Paso 3: Cálculo de las emisiones evitadas (bonos de carbono):**

En este paso final, se determina la cantidad de emisiones de carbono evitadas como resultado del proyecto de reforestación. Las emisiones evitadas representan la diferencia entre la cantidad de carbono almacenado en la vegetación y el suelo después del proyecto (carbono después del proyecto) y la cantidad que existía antes de la implementación del proyecto (carbono antes del proyecto).

Si la cantidad de carbono después del proyecto es mayor que la cantidad antes del proyecto, se genera un valor positivo que refleja la absorción neta de carbono.

$$Ee_{CO_2} = CO_{2Total(f)} - CO_{2Total(i)} \quad (10)$$

En donde:

Ee_{CO_2} : Emisiones evitadas de CO₂ (tCO₂)

$CO_{2Total(f)}$: Cantidad Final total de carbono (Después del proyecto) (tCO₂)

$CO_{2p/árbol(f)}$: Cantidad Inicial total de carbono (Antes del proyecto) (tCO₂)

6.2 Caso Mérida

La población de árboles en el municipio de Mérida es de 2,318,000 árboles aproximadamente, esto da una cobertura arbórea de 21.2% y un promedio de 96 árboles por hectárea, el promedio de tamaño del diámetro del tronco de los árboles ronda en los 13cm y producen un aproximado de 32,890 toneladas de oxígeno anualmente. (*Ayuntamiento de Mérida, Unidad de Desarrollo Sustentable 2017*)

El porcentaje de especies de árboles en Mérida se divide de la siguiente manera:

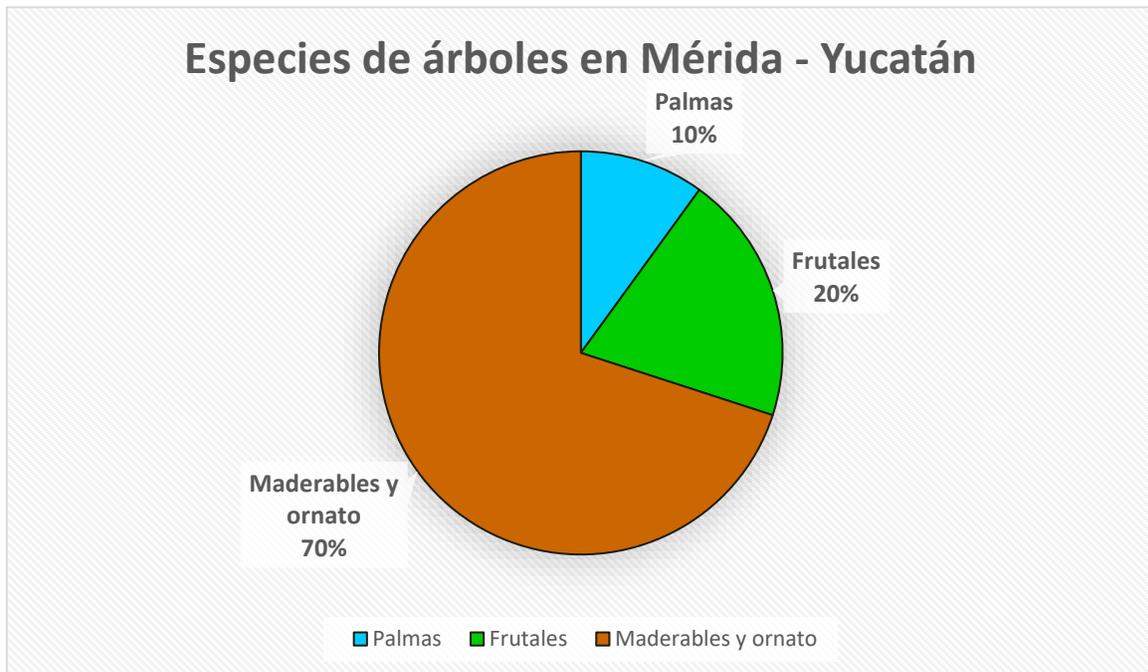


Figura 6.1 Gráfico de especies de árboles en Mérida, Yucatán
Fuente Ayuntamiento de Mérida, Unidad de Desarrollo Sustentable 2017, elaboración propia

En Mérida, los árboles remueven 175,600 toneladas de contaminantes al año (*Ayuntamiento de Mérida, Unidad de Desarrollo Sustentable 2017*).

Los árboles que más aportan a la mitigación de GEI en el municipio de Mérida son:

- Jabín (*Piscidia piscipula*)
- Chacá (*Bursera simaruba*)
- Waxim (*Leucaena leucocephala*)
- Naranja agria (*Citrus aurantium*)



Figura 6.2 Árbol de Jabín (*Piscidia piscipula*)

Fuente: Gobierno del Estado de Yucatán

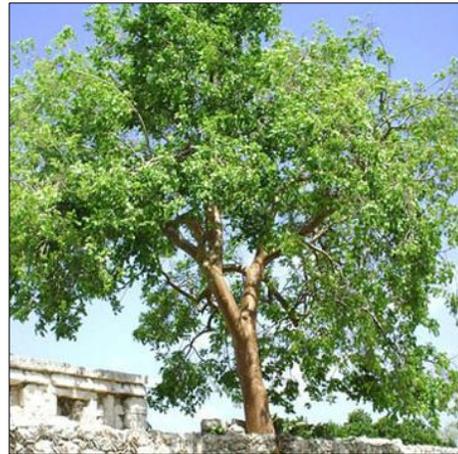


Figura 6.3 Árbol de Chacá (*Bursera simaruba*)

Fuente: Gobierno del Estado de Yucatán



Figura 6.4 Árbol de Waxim (*Leucaena leucocephala*)

Fuente: Gobierno del Estado de Yucatán



Figura 6.5 Árbol de Naranja agria (*Citrus aurantium*)

Fuente: Gobierno del Estado de Yucatán

Para este caso se propone implementar el árbol de Jabín (*Piscidia piscipula*), debido a que es de los arboles con mayor absorción de carbono en Mérida y el tiempo mínimo de proyecto de 10 años.

De acuerdo con el gobierno de Mérida, el Jabín es un árbol que en sus primeros dos años de vida ronda una altura de 1.5 a 2 m y que al alcanzar su madures alcanza hasta 20 m de altura, caducifolio, copa densa, corteza fisurada, hojas ovadas compuestas imparipinnadas, folíolos elípticos verde oscuros, la densidad de su madera ronda en los 700 a 900 kg/m³, su crecimiento de diámetro anual del árbol de Jabín (*Piscidia piscipula*) es de 0.52 cm aproximadamente y de altura entre 1m aproximadamente.

Al plantar varios árboles es importante dejar una distancia considerable entre ellos la distancia estándar es de 5m de tronco a tronco (*Departamento de Preservación y Conservación Ambiental de Mérida*)

6.3 Solución caso Mérida

Recolectando los datos relevantes para los cálculos tenemos lo siguiente:

- Área de la zona contaminada a reforestar: 158 (m²).
- Distanciamiento entre arboles: 5 (m)
- Densidad de la madera: 700 (kg/m³)
- Tasa de crecimiento de diámetro anual: 0.52 (cm/año)
- Crecimiento de altura anual: 1(m/año)
- Tiempo mínimo de proyecto: 10 años

- **Paso 1: Estimación de Carbono Antes del Proyecto (Línea de Base):**

Se parte de la ecuación 1:

$$n_{\text{árboles}} = \frac{A_{\text{proyecto}}}{A_{\text{árboles}}} \quad (1)$$

En donde:

$n_{\text{árboles}}$: Numero de árboles

A_{proyecto} : Área del proyecto (m²)

$A_{\text{árboles}}$: Área requerida para cada árbol (m²)

Para el área requerida por cada árbol se toma la superficie que ocupa un solo árbol, que sería un círculo con un radio igual a la mitad del distanciamiento entre árboles (2.5 m en este caso).

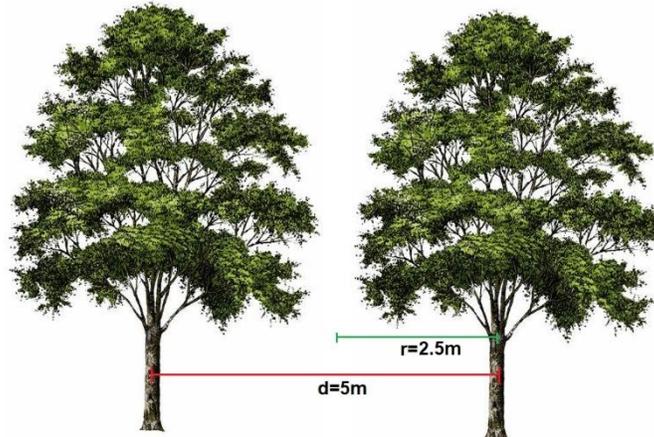


Figura 6.6 Distanciamiento entre árbol caso Mérida

Entonces:

$$A_{\text{árbol}} = \pi (2.5\text{m})^2 \approx 19.63(\text{m}^2)$$

Teniendo el ajuste del área se procede a sustituir los valores en la ecuación 1, por consiguiente:

$$n_{\text{árboles}} = \frac{158(\text{m}^2)}{19.63(\text{m}^2)} = 8.04 = 8 \text{ árboles} \quad (1)$$

La cantidad de árboles a plantar en la zona a reforestar es un total de 8 ejemplares de Jabín (*Piscidia piscipula*).

Se realiza la estimación de volumen del árbol previo al proceso de reforestación tomando en cuenta su tasa de crecimiento estipulada en la ecuación 2:

$$V_{tronco(i)} = \frac{\pi * r^2_{(i)} * h_{(i)}}{3} \quad (2)$$

En donde:

$V_{tronco(i)}$: Volumen inicial del tronco por árbol (m³)

$h_{(i)}$: Altura inicial del árbol (m)

$r^2_{(i)}$: radio inicial del tronco árbol (m²)

π y 3: son constantes

- **Volumen de árbol al inicio del proyecto:**

Se sustituyen los datos del árbol de Jabín a etapa prematura (2 años de edad) que presenta una altura de 1.5 a 2m, para fines prácticos se propone el valor de 1.5m

Debido a que no hay registro del diámetro de tronco a la edad de 2 años de vida del jabín, se propone realizar el cálculo aproximado tomando en cuenta la tasa de crecimiento de diámetro anual, así como el diámetro promedio del árbol en su etapa madura (13cm) implementando la ecuación 5 y realizar el despeje correspondiente:

$$d_f = (T_{id} * n_{años}) + d_i \quad (5)$$

En donde:

d_f : Diámetro final(m) = 13cm

T_{id} : Tasa de incremento de diámetro anual = 0.52 (cm/año)

$n_{años}$: Número de años de duración del proyecto = 10 años

d_i : Diámetro inicial (m)

Despejando la ecuación se tiene:

$$d_i = d_f - (T_{id} * n_{años})$$

Entonces:

$$d_i = 13 (cm) - \left(0.52 \left(\frac{cm}{año}\right) * 10_{años}\right) = 7.8(cm) = 0.078(m)$$

Obtenidos el diámetro y la altura se procede a calcular el volumen del tronco:

$$V_{tronco(i)} = \left(\frac{\pi * 0.039(m)^2 * 1.5(m)}{3} \right) = \left(\frac{0.0071(m)}{3} \right) = 0.0023 (m^3)$$

Se procede a calcular el carbono por árbol antes del proyecto con la ecuación 3:

$$CO_{2p/arbol(i)} = \frac{V_{tronco(i)} * \rho_{madera}}{1000} \quad (3)$$

En donde:

$CO_{2p/arbol(i)}$: Cantidad inicial de carbono por árbol (Antes del proyecto) (tCO₂)

$V_{tronco(i)}$: Volumen inicial del tronco por árbol (Antes del proyecto) (m³) = 0.0023 m³

ρ_{madera} : Densidad de la madera (kg/m³) = 700 (kg/m³)

1000: se implementa para que el resultado sea en tCO₂

Se sustituyen valores y queda:

$$CO_{2p/arbol(i)} = \frac{0.0023 m^3 * 700(kg/m^3)}{1000} = \frac{1.67(kg)}{1000} = 0.0016(tCO_2)$$

El carbono total previo al proyecto se calcula con la ecuación 4:

$$CO_{2 Total(i)} = CO_{2p/arbol(i)} * n_{árboles} \quad (4)$$

Sustituyendo:

$$CO_{2 Total(i)} = 0.0016(tCO_2) * 8_{árboles} = 0.0133 (tCO_2)$$

Se tiene que en carbono total presente previo al inicio del proyecto es de 0.0133 tCO₂.

- **Paso 2: Crecimiento de biomasa (carbono después del proyecto).**

Realizados los cálculos previos se procede a estimar el volumen final del tronco por árbol, tomando en cuenta los valores proporcionados del diámetro en etapa madura, así como la altura final y el tiempo del proyecto.

Debido a que en este caso ya se cuenta con el diámetro proporcionado, no es necesario usar la ecuación 5, pero para la altura es necesario desarrollar la ecuación 6.

Para la altura final:

$$h_f = (T_{ih} * n_{años}) + h_i \quad (6)$$

En donde:

h_f : Altura final(m)

T_i : Tasa de incremento de altura anual = (1m/año)

$n_{años}$: Número de años de duración del proyecto= 10 años

h_i : Altura inicial (m) = 1.5(m)

Sustituyendo:

$$h_f = 1\left(\frac{m}{año}\right) * 10_{años}) + (1.5m) = 15(m)$$

Teniendo la altura y diámetro final del árbol, se calcula el volumen del tronco como se muestra en la ecuación 7:

$$V_{tronco (f)} = \frac{\pi * r^2_{(f)} * h_{(f)}}{3} \quad (7)$$

En donde:

$V_{tronco (f)}$: Volumen final del tronco por árbol (m³)

$h_{(f)}$: Altura del árbol= 15(m)

$r^2_{(f)}$: radio final del tronco árbol= 0.13/2 =0.065(m²)

π y 3: son constantes

Sustituyendo:

$$V_{tronco (f)} = \frac{\pi * 0.065(m^2) * 15(m)}{3} = \frac{0.19}{3} = 0.066m^3$$

Posteriormente se calcula el carbono por árbol después del proyecto utilizando la ecuación 8:

$$CO_{2p/árbol(f)} = \frac{V_{tronco(f)} * \rho_{madera}}{1000} \quad (8)$$

En donde:

$CO_{2p/árbol(f)}$: Cantidad final de carbono por árbol (Después del proyecto) (tCO₂)

$V_{tronco(f)}$: Volumen final del tronco por árbol (Después del proyecto) (m³) = 0.066m³

ρ_{madera} : Densidad de la madera (kg/m³) = 700(kg/m³)

Sustituyendo=

$$CO_{2p/árbol(f)} = \frac{0.066(m^3) * 700(kg/m^3)}{1000} = 0.046tCO_2$$

Se procede a calcular el carbono total del proyecto con la ecuación 9:

$$CO_{2Total(f)} = (CO_{2p/árbol(f)})(n_{árboles})$$

Queda:

$$CO_{2Total(f)} = (0.046tCO_2)(8_{árboles}) = 0.37(tCO_2)$$

- **Paso 3: Cálculo de las emisiones evitadas (bonos de carbono):**

Para este paso se utiliza la ecuación 10:

$$Ee_{CO_2} = CO_{2Total(f)} - CO_{2Total(i)} \quad (10)$$

El total de emisiones evitadas son:

$$Ee_{CO_2} = 0.37 tCO_2 - 0.0133 tCO_2 = 0.357tCO_2$$

6.4 Resultados y conclusiones caso Mérida

Aunque a los 10 años del proyecto de reforestación se observan resultados mínimos, los cálculos demuestran que el proyecto está contribuyendo efectivamente a la mitigación del cambio climático al capturar más carbono del que se hubiera liberado según la línea de base.

Es importante señalar que los resultados presentados se derivan de valores mínimos proporcionados, como la densidad, altura y período de tiempo. Esta elección se basó en un escenario que considera condiciones desfavorables. Sin embargo, a continuación, se mostrarán comparativas con los resultados que se obtendrían si se emplearan valores más apropiados, como una altura, densidad y tiempo más óptimos, en el desarrollo de esta investigación.

Tabla 5.1 Comparativa de resultados obtenidos con valores máximos

	A 10 AÑOS		A 20 AÑOS		A 30 AÑOS	
	Valores mínimos	Valores máximos	Valores mínimos	Valores máximos	Valores mínimos	Valores máximos
Árboles	8		8		8	
Volumen inicial Tronco (m ³)	0.0023	0.0031	0.0046	0.0062	0.0069	0.0093
CO ₂ inicial p/árbol (tCO ₂)	0.0016	0.0028	0.0032	0.0056	0.0048	0.0084
CO ₂ Total previo (tCO ₂)	0.0133	0.022	0.0266	0.044	0.0399	0.066
Volumen final p/árbol (m ³)	0.066	0.088	0.132	0.176	0.198	0.264
CO ₂ final p/árbol (tCO ₂)	0.046	0.0796	0.092	0.1592	0.138	0.2388
CO ₂ Total después (tCO ₂)	0.37	0.63	0.74	1.26	1.11	1.89
Emisiones Evitadas (tCO ₂)	0.357	0.608	0.714	1.216	1.071	1.824

Tras analizar los resultados a intervalos de 10, 20 y 30 años, tanto con valores mínimos como máximos, se observa que en todos los casos hay una absorción mínima de tCO₂.

En el escenario más favorable, a un período mínimo de 10 años, la absorción total aproximada es de 1.01 tCO₂. Esto podría permitir la emisión de un bono de carbono forestal en este lapso, lo cual contribuye al mejoramiento del medio ambiente.

En el caso óptimo, considerando la densidad más alta de árboles, junto con su altura máxima y su capacidad de absorción, se podrían emitir hasta 3.2 bonos de carbono forestales. Sin embargo, esta cifra es limitada debido al área y cantidad de árboles que se podrían plantar.

En resumen, los bonos potenciales a emitir son mínimos. No obstante, el proyecto contribuiría a mejorar la calidad del medio ambiente en su área.

6.5 Caso Veracruz

Veracruz es uno de los estados más biodiversos de México, con una gran cantidad de especies de flora exclusivas de la región, los avances de investigaciones en el estado de Veracruz han proporcionado información valiosa. Actualmente, se han identificado alrededor de 2,500 especies arbóreas agrupadas en 781 géneros en México. De este conjunto, se estima que el estado de Veracruz alberga aproximadamente 1,300 especies silvestres (*Secretaría de Educación-Gobierno del Estado de Veracruz*).

Veracruz es posiblemente uno de los estados mexicanos más reconocidos en términos de su riqueza ecológica y biológica, esto se debe en gran medida a la labor científica llevada a cabo por numerosas instituciones de investigación y universidades, tanto a nivel nacional como local. Paralelamente, Veracruz también destaca por ser uno de los lugares donde se ha registrado una de las mayores tasas de degradación y pérdida de su vegetación natural.

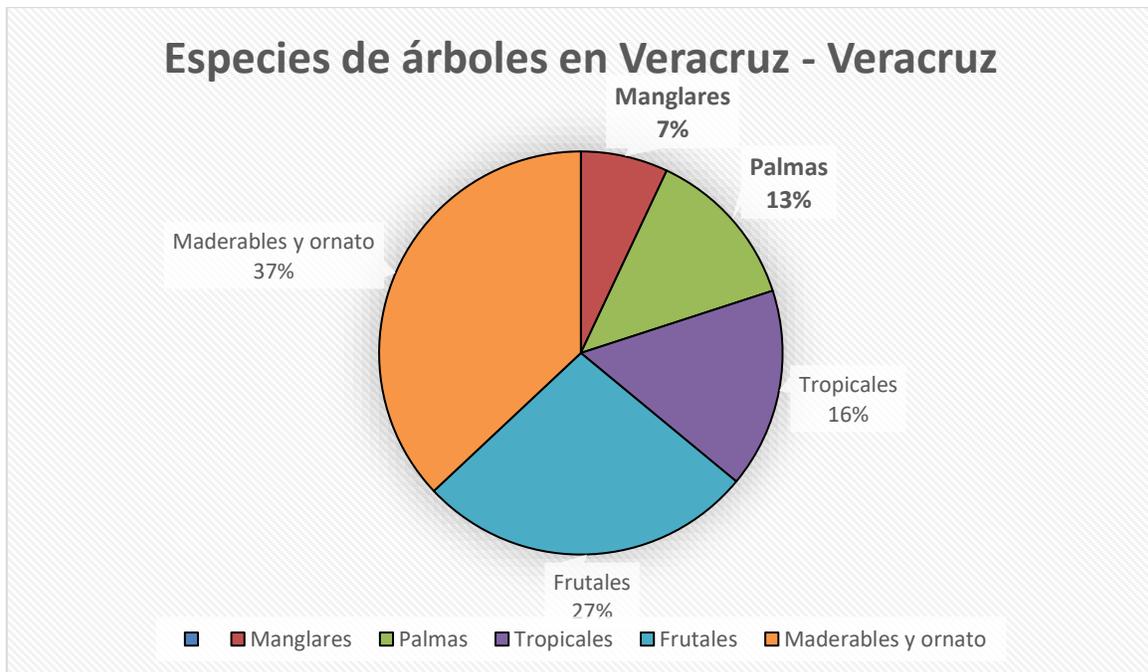


Figura 6.7 Gráfico de especies de árboles en Veracruz - Veracruz

Fuente: Gobierno del estado de Veracruz, municipio de Veracruz, elaboración propia

Entre las especies nativas que se utilizan en programas de reforestación destacan:

- Frijolillo (*Cojoba arborea*)
- Fresno (*Fraxinus uhdei*)
- Ahuehuete (*Taxodium mucronatum*)
- Roble (*Tabebuia rosea*)



Figura 6.8 Árbol de Frijolillo (*Cojoba arborea*)
Fuente: Instituto de Biología. UNAM



Figura 6.9 Árbol de Fresno (*Fraxinus uhdei*) Fuente: Ecojardin UNAM



Figura 6.10 Árbol de Ahuehuete (*Taxodium mucronatum*)
Fuente: CONAFOR



Figura 6.11 Árbol de Roble (*Tabebuia rosea*) Fuente: CONAFOR

Para el caso de Veracruz se propone hacer la reforestación con el árbol de Fresno (*Fraxinus uhdei*), esto es debido a que cumple con diversas características, como su fácil adaptación a diversos sitios como lo pueden ser laderas, barrancas y cañadas, orillas de corrientes de agua, climas de cálidos, tropicales y templados. Su efecto restaurador se emplea para suelos degradados y toleran tiempos de sequía.

El Fresno (*Fraxinus uhdei*) es un árbol perennifolio o caducifolio, alcanza alturas de 15 a 25m y un diámetro normal de 1m en su joven a madura, su diámetro de crecimiento anual de (*Fraxinus uhdei*) es en promedio de 2.7cm, presenta una densidad de madera de 670kg/m³, es una especie de crecimiento lento en sus primeros años de vida, su tasa de crecimiento anual es de 80cm, en su primer año de vida su altura promedio es de 80cm y su tiempo de vida ronda los 90 a 100 años. (CONABIO,2015).

Para este caso se tomará la edad aproximadamente de 5 años de edad de los árboles, debido a que en promedio en esa edad tienen mejores parámetros, como el diámetro promedio de su fuste que ayuda al mejoramiento de la absorción de carbono.

Se implementará la misma metodología que en el caso de Mérida.

6.6 Solución caso Veracruz

Recolectando los datos relevantes para los cálculos tenemos lo siguiente:

- Área de la zona contaminada a reforestar: 12,081 (m²).
- Distanciamiento entre arboles: 10 (m)
- Densidad de la madera: 670 (kg/m³)
- Tasa de crecimiento de diámetro anual: 2.7 (cm/año)
- Diámetro de tronco en sus 5 años de vida (7cm)
- Crecimiento de altura anual: 0.80 (m/año)
- Tiempo mínimo de proyecto: 10 años

- **Paso 1: Estimación de carbono antes del proyecto (línea de base):**

Se plantea la ecuación 1 para determinar el número de árboles a plantar en la zona afectada:

$$n_{\text{árboles}} = \frac{A_{\text{proyecto}}}{A_{\text{árboles}}} \quad (1)$$

En donde:

$n_{\text{árboles}}$: Numero de árboles

A_{proyecto} : Área del proyecto (m²)

$A_{\text{árboles}}$: Área requerida para cada árbol (m²)

La superficie requerida para el Fresno parte del distanciamiento propuesto por las autoridades (10m) entre cada tronco, para ello se procede calcular el área que ocupara un árbol de Fresno de la siguiente manera:

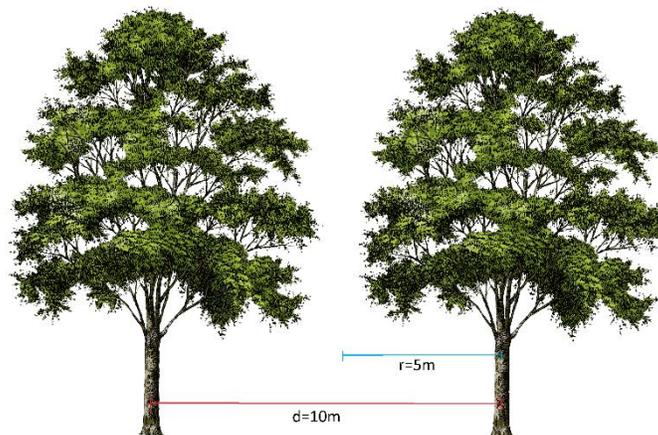


Figura 6.12 Distanciamiento entre árbol, caso Veracruz

Entonces:

$$A_{\text{árbol}} = \pi (5\text{m})^2 \approx 78.53(\text{m}^2)$$

Teniendo el ajuste del área se sustituyen los valores en la ecuación 1:

$$n_{\text{árboles}} = \frac{12,081(\text{m}^2)}{78.53(\text{m}^2)} = 153.8 = 154 \text{ árboles} \quad (1)$$

La totalidad de árboles en la zona a reforestar es un estimado de 154 ejemplares de Fresno (*Fraxinus uhdei*).

Teniendo el cálculo de la cantidad de ejemplares a plantar, se procede a realizar la estimación del volumen por unidad de tronco tomando como referencia la ecuación 2:

$$V_{tronco(i)} = \frac{\pi * r^2_{(i)} * h_{(i)}}{3} \quad (2)$$

En donde:

$V_{tronco(i)}$: Volumen inicial del tronco por árbol (m³)

$h_{(i)}$: Altura inicial del árbol (m)

$r^2_{(i)}$: radio inicial del tronco árbol (m²)

π y 3: son constantes

Se implementan los datos sobre el de Fresno (*Fraxinus uhdei*) de 5 años propuesta, presenta una altura aproximada a los 4m y un diámetro de fuste de 7cm aproximadamente.

Considerando la ecuación 2:

$$V_{tronco(i)} = \left(\frac{\pi * 0.035(m)^2 * 4(m)}{3} \right) = \left(\frac{0.436(m)}{3} \right) = 0.146 \text{ (m}^3\text{)}$$

Se hace uso de la ecuación 3 para calcular el carbono por árbol:

$$CO_{2p/arb(i)} = \frac{V_{tronco(i)} * \rho_{madera}}{1000} \quad (3)$$

En donde:

$CO_{2p/arb(i)}$: Cantidad inicial de carbono por árbol (Antes del proyecto) (tCO₂)

$V_{tronco(i)}$: Volumen inicial del tronco por árbol (Antes del proyecto) (m³) = 0.146 m³

ρ_{madera} : Densidad de la madera (kg/m³) = 670 (kg/m³)

1000: se implementa para que el resultado sea en tCO₂

Sustituyendo resulta:

$$CO_{2p/arb(i)} = \frac{0.146 \text{ m}^3 * 670(\text{kg/m}^3)}{1000} = \frac{97.82(\text{kg})}{1000} = 0.097(\text{tCO}_2)$$

El carbono total previo al proyecto se calcula con la ecuación 4:

$$CO_{2\ Total(i)} = CO_{2p/arbol\ (i)} * n_{árboles} \quad (4)$$

Sustituyendo:

$$CO_{2\ Total(i)} = 0.097(tCO_2) * 154_{árboles} = 14.93 (tCO_2)$$

El total de carbono presente antes del inicio del proyecto es de 14.93 toneladas de CO₂ (tCO₂).

- **Paso 2: Crecimiento de biomasa (carbono después del proyecto).**

Realizados los cálculos previos se procede a estimar el volumen final del tronco por árbol, tomando en cuenta los valores proporcionados del diámetro en etapa madura, así como la altura final y el tiempo del proyecto.

Calculando el diámetro a 10 años con la ecuación 5:

$$d_f = (T_{id} * n_{años}) + d_i \quad (5)$$

En donde:

d_f : Diámetro final(m)

T_{id} : Tasa de incremento de diámetro anual.

$n_{años}$: Número de años de duración del proyecto

d_i : Diámetro inicial (m)

Sustituyendo:

$$d_f = (0.027(m) * 10_{años}) + 0.07(m) = 0.34(m)$$

Y para la altura a 10 años se utiliza la ecuación 6:

$$h_f = (T_{ih} * n_{años}) + h_i \quad (6)$$

En donde:

h_f : Altura final(m)

T_i : Tasa de incremento de altura anual.

$n_{años}$: Número de años de duración del proyecto

h_i : Altura inicial (m)

Sustituyendo:

$$h_f = \left(0.8 \frac{m}{año}\right) * 10_{años} + (4m) = 12(m)$$

Teniendo la altura y diámetro final del árbol se calcula el volumen del tronco como se muestra en la ecuación 7:

$$V_{tronco(f)} = \frac{\pi * r^2_{(f)} * h_{(f)}}{3} \quad (7)$$

En donde:

$V_{tronco(f)}$: Volumen final del tronco por árbol (m³)

$h_{(f)}$: Altura del árbol= 12(m)

$r^2_{(f)}$: radio final del tronco árbol= 0.34 / 2 =0.17 (m²)

π y 3: son constantes

Sustituyendo:

$$V_{tronco(f)} = \frac{\pi * 0.17(m^2) * 12(m)}{3} = \frac{6.4}{3} = 2.13m^3$$

Se procede al cálculo de biomasa posterior a 10 años del proyecto con la ecuación 8:

$$CO_{2p/arbol(f)} = \frac{V_{tronco(f)} * \rho_{madera}}{1000} \quad (8)$$

En donde:

$CO_{2p/arbol(f)}$: Cantidad final de carbono por árbol (Después del proyecto) (tCO₂)

$V_{tronco(f)}$: Volumen final del tronco por árbol (Después del proyecto) (m³) = 2.13m³

ρ_{madera} : Densidad de la madera (kg/m³) = 670(kg/m³)

Sustituyendo

$$CO_{2p/arbol(f)} = \frac{2.13(m^3) * 670(kg/m^3)}{1000} = 1.42tCO_2$$

Para el carbono total del proyecto a 10 años se desarrolla la ecuación 9:

Queda:

$$CO_{2Total(f)} = (2.13tCO_2)(154_{\text{árboles}}) = 328.02(tCO_2)$$

- **Paso 3: Cálculo de las emisiones evitadas (bonos de carbono):**

Utilizando la ecuación 10:

$$Ee_{CO_2} = CO_{2Total(f)} - CO_{2Total(i)} \quad (10)$$

El total de emisiones evitadas son:

$$Ee_{CO_2} = 328.02tCO_2 - 14.93 tCO_2 = 313.09tCO_2$$

6.7 Resultados y conclusiones caso Veracruz

Los resultados del análisis en Veracruz revelan una absorción óptima de dióxido de carbono (CO₂), con una cantidad total de 313 toneladas de CO₂. Esta cifra representa una eficiente reducción de carbono liberado a la atmósfera. Se destaca que este resultado es un promedio para un proyecto de reforestación con una duración de 10 años, período mínimo establecido por las entidades reguladoras. A continuación, se exhibirá una tabla comparativa que detalla los resultados proyectados a lo largo de intervalos de 10, 20 y 30 años para este proyecto de reforestación en Veracruz.

Este análisis se basó en valores estándar obtenidos de fuentes bibliográficas provenientes de entidades reguladoras y expertos en el ámbito ambiental, sin considerar valores extremos de referencia.

Tabla 6.2 Comparativa de resultados obtenidos a 10, 20 y 30 años

	A 10 AÑOS	A 20 AÑOS	A 30 AÑOS
Arboles	154	154	154
Volumen inicial de Fuste(m ³)	0.146	0.292	0.438
CO ₂ inicial p/árbol (tCO ₂)	0.097	0.194	0.291
CO ₂ Total previo (tCO ₂)	14.93	29.86	44.79
Volumen final p/árbol(m ³)	2.13	4.26	6.39
CO ₂ final p/árbol (tCO ₂)	1.42	2.84	4.26
CO ₂ Total p/árbol (tCO ₂)	328.02	656.04	984.06
Emisiones Evitadas (tCO ₂)	313.09	626.18	939.27

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Los análisis de las muestras del suelo realizados en los estudios de Mérida y Veracruz revelaron la presencia predominante de diésel intemperizado, el cual se encontraba contenido en el suelo. Importante destacar que este contaminante no está contribuyendo directamente a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), lo que limita la posibilidad de generar bonos de carbono convencionales. Ante esta situación, se propone la emisión de bonos de carbono forestales como una alternativa efectiva, los cuales se originan a través de la remediación de los sitios contaminados y la subsiguiente reforestación utilizando especies nativas de las áreas de estudio.

Mérida presenta desafíos significativos en la absorción de carbono, con resultados que revelan una absorción mínima de tCO₂. A pesar de esto, la propuesta de emitir bonos de carbono forestales destaca la importancia de abordar la contaminación del suelo y contribuir a la mejora del entorno local.

Veracruz destaca por su eficiente reducción de CO₂ en un proyecto de reforestación de 10 años. Este logro resalta la eficacia del proyecto en la captura de carbono y su contribución a la mitigación de gases de efecto invernadero.

En resumen, ambos sitios de estudio, Mérida y Veracruz, presentan desafíos únicos y oportunidades distintas en la emisión de bonos de carbono. La adaptabilidad en las estrategias, como la propuesta de bonos de carbono forestales en Mérida y el enfoque eficiente en la mitigación en Veracruz, resalta la importancia de considerar las características específicas de cada región al diseñar e implementar proyectos ambientales. La diversidad en los resultados subraya la necesidad de enfoques personalizados para maximizar el impacto en la reducción de emisiones y la mejora ambiental.

Aunque los resultados en ambos casos sugieren una mejora en la reducción de carbono en el entorno, se destaca que el caso de Veracruz muestra un nivel más favorable en la eficacia de la mitigación.

Recomendaciones

Se recomienda llevar a cabo el proceso de limpieza del suelo contaminado, en consonancia con las disposiciones establecidas en la normativa NOM138-SEMARNAT/SS-2003, antes de iniciar la etapa de reforestación. Esta medida se plantea con la intención de obtener resultados óptimos en el proceso de remediación.

Asimismo, se aconseja mantener un monitoreo continuo en colaboración con las autoridades competentes (SEMARNAT, SEDEMA, PROFEPA) para supervisar todo el desarrollo del proyecto de reforestación, desde su inicio hasta su culminación, y posteriormente integrarlo al mercado de Bonos de Carbono. Esto contribuiría significativamente a reducir la contaminación y cumplir con los objetivos fijados en el Protocolo de Kioto, ahora conocido como el Acuerdo de París.

Es importante fomentar la participación activa de las comunidades locales de las áreas cercanas, brindándoles formación y capacitación. Este enfoque tiene el propósito de crear conciencia y promover su involucramiento en los proyectos de reforestación. La colaboración y participación de la comunidad son factores fundamentales para garantizar la sostenibilidad y el éxito a largo plazo de las iniciativas de mitigación ambiental.

Para Mérida se debe considerar la investigación y la implementación de especies arbóreas que demuestren una mayor eficiencia en la absorción de carbono en condiciones específicas de Mérida. Esto podría aumentar la capacidad de generación de bonos de carbono forestales.

Introducir incentivos económicos adicionales para la participación empresarial en proyectos de bonos de carbono forestales en Mérida. Estos incentivos podrían estimular la colaboración y mejorar la viabilidad económica de los proyectos.

Para Veracruz se propone explorar la posibilidad de diversificar los proyectos de reforestación en Veracruz para maximizar la generación de bonos de carbono forestales. Esto podría incluir la implementación de proyectos complementarios que aborden diferentes aspectos de la mitigación ambiental.

Implementar programas de educación ambiental específicos, dirigidos tanto a comunidades locales como a empresas. Esto puede fortalecer la conciencia ambiental y fomentar la participación activa en proyectos de bonos de carbono.

- Arriaga, V., Vargas-Mena, A., & Cervantes, V. (1994). *Manual de reforestación con especies nativas*.
- Banco Mundial. 2009b. *Desarrollo y cambio climático. Versión preliminar*. Disponible en: www.bancomundial.org
- Carbon Pricing Dashboard. (s. f.). *The World Bank*. https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data
- Carnero, R. M. G. (2013). *El desafío de la acción internacional en materia de cambio climático después de la reunión de Doha-2012*. *Pre-bie3*, (2), 30.
- Centeno, J. C. (1987). *Bonos de carbono en América Latina*. *Revista Forestal iberoamericana*. Disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp>.
- Compendio de información geográfica municipal Mérida, Yucatán. (2010). https://www.inegi.org.mx/http://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/31/31050.pdf
- Compendio de información geográfica municipal Veracruz, Veracruz de Ignacio de la Llave. (2010). https://www.inegi.org.mx/https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30193.pdf
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto. (CMNUCC). (2015). SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico-y-su-protocolo-de-kioto-cmnucc#:~:text=El%20Protocolo%20de%20Kioto%20entr%C3%B3%20en%20vigor%20el,obligaciones%20cuantitativas%20de%20reducci%C3%B3n%20de%20emisiones%20de%20GEI>.
- Cruz, M. C. D. (2016). *Bonos de carbono: un instrumento en el sistema financiero internacional*. *Libre Empresa*, 13(1), 11-33.
- Di Pietro, S. (2017). *Acuerdo de París: ¿nuevos compromisos con el medio ambiente o nuevas oportunidades de negocio?* *Cooperativismo & Desarrollo*, 25(111).
- DOF. *REGLAS de carácter general para el pago opcional del impuesto especial sobre producción y servicios a los combustibles fósiles mediante la entrega de los bonos de carbono*. 18/12/2017
- El impuesto al carbono en México. (2017). [https://www.gob.mx/semarnat.https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/recuadros/recuadro5_7.html](https://www.gob.mx/semarnat/https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/recuadros/recuadro5_7.html)
- Emissions Trading Worldwide: 2023 ICAP Status Report. (2023).

- Fahnestock von, F.M. (1998). *Biopile Design, Operation and Maintenance Handbook for Treating Hydrocarbon- Contaminates Soils*. Battelle Press.
- Fernández-Reyes, R. (2015). *El Acuerdo de París y el cambio transformacional. Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, (132), 101-114.
- Huesca Reynoso, L., & López Montes, A. (2016, junio). *Impuestos ambientales al Carbono en México y su progresividad: una revisión analítica*. <http://www.economia.unam.mx/http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/398/02huesca.pdf>
- Iturbe, R. Flores, C. Pérez, G. Corona, L. López, J. Castro, A. "Estudio de Caracterización de Suelo en las Áreas de Taller y de Abasto en la Terminal Ferroviaria de Mérida, Yuc."
- Iturbe, R. Flores, C. Pérez, G. Corona, L. López, J. Castro, A. "Estudio de Caracterización de Suelo en las Áreas de Taller y de Abasto en la Terminal Ferroviaria de Veracruz, Ver."
- LA CONTRIBUCIÓN DE LOS MERCADOS DE CARBONO A LAS METAS CLIMÁTICAS, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES DE MÉXICO, *Climate Action Reserve*, 2018
- López-Toache, V., Romero-Amado, J., Toache-Bertolini, G., & García-Sánchez, S. (2016). *Bonos de carbono: financiarización del medioambiente en México. Estudios sociales (Hermosillo, Son.)*, 25(47), 189-214.
- Lucas Garín, A. (2017). *Novedades del sistema de protección internacional de cambio climático: El Acuerdo de París. Estudios internacionales (Santiago)*, 49(186), 137-167.
- Mexicana, N. O., LAS, S., & REMEDIACIÓN, E. (2003). *NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación*.
- Mexicano, S. G. (2002). *Carta Geológico-Minera Veracruz E14-3, Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Esc. 1: 250,000*.
- Mexicano, S. G. (2006). *Carta Geológica-Minera Mérida F16-10, Yuc. Esc, 1(250,000)*.
- Molina-Pasquel M. (2003). *El impacto de las actividades humanas en la atmósfera. México: El Colegio Nacional*.
- Piquero, E., & Oronoz, B. (s. f.). *Mercados de carbono en México. Plataforma Mexicana de Carbono*. https://www.ema.org.mx/descargas_portalV2/resenas/seminarioGEI/6MEXICO2.pdf

Programa de Restauración y Compensación Ambiental. (2019). [https://www.biodiversidad.gob.mx/.
https://www.biodiversidad.gob.mx/conabio/proyectos/programa-de-restauracion-y-
compensacion-ambiental](https://www.biodiversidad.gob.mx/.https://www.biodiversidad.gob.mx/conabio/proyectos/programa-de-restauracion-y-compensacion-ambiental)

Ramírez Reyes, A. J. (2020, 20 julio). *Mercado voluntario de bonos de carbono.* www.gob.mx.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564602/Mercado_voluntario_de_bonos_de_carbono.pdf

Rodríguez, L. (2007). *Protocolo de Kyoto: Debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre Cambio Climático.* *Gestión y Ambiente*, 10(2), 119-128.

SEMARNAT & Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania. (2018). *CONSIDERACIÓN DEL USO DE COMPENSACIONES EN UN SCE.*

Suthersan, S. S., Horst, J., Schnobrich, M., Welty, N., & McDonough, J. (2016). *Ingeniería de remediación: conceptos de diseño.* Prensa CRC.

Thuiller W. (2007). *Climate change and the ecologist.* *Nature* (pp. 550–552). Vol. 448.

Unidad de Desarrollo Sustentable. (2017, noviembre). *Inventario del Arbolado Urbano de la Ciudad de Mérida.* www.merida.gob.mx.
<https://merida.gob.mx/municipio/sitiosphp/sustentable/contenidos/doc/ConoceLosArboles.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1998.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 2007.

Vázquez Torres, M. 2007. *Los árboles cultivados de Veracruz.* Secretaría de Educación de Veracruz, Secretaría de Turismo y Cultura, Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, Universidad Veracruzana. 279 p.