

Industria y Servicios de Coahuila S.A. de C.V.

Informe de Caracterización y Plan de Restauración de Suelos
Contaminados para la Atención al pasivo ambiental derivado
de la emergencia por derrame de hidrocarburo en atención a
toma clandestina en el OLD 24” Ø Nuevo Teapa – Cadereyta
Km 304+000

16 de junio de 2023

1	Introducción	1
2	Antecedentes.	2
3	Responsable de la contaminación.	3
4	Objetivo	4
4.1	Objetivos específicos	4
5	Localización del pasivo ambiental	4
6	Marco físico	6
7	Marco Geológico	7
7.1	Geología Regional.....	7
7.2	Geología Estructural	12
7.3	Geología del Sitio.....	13
7.4	Hidrogeología Regional	16
7.5	Hidrogeología del sitio.....	18
8	Trabajos previos realizados como soporte del PMCSA.....	19
8.1	Análisis de imágenes satelitales	19
8.2	Recorridos en campo.....	20
8.3	Levantamiento topográfico.	21
8.4	Identificación de ductos	23
8.5	Dimensionamiento de los Compuestos Orgánicos Volátiles mediante la evaluación gasométrica.	24
8.6	Levantamiento geofísico	28
8.7	Georradar	34
9	Plan de Muestreo	39
10	Resultados analíticos	48
11	Evaluación de la extensión del contaminante en el suelo.....	56
12	Actualización del Plan de Restauración de Suelos Contaminados para la atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a toma clandestina	

en el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000” por la técnica de biorremediación por Biopilas a un lado del sitio contaminado	64
12.1 Objetivo	65
12.1.1 Objetivos específicos	65
12.2 Características del sitio de restauración.....	65
12.3 Tecnologías de Remediación autorizadas para Industria y Servicio de Coahuila, S A. de C.V.	68
12.4 Biorremediación por el método de Biopilas a un lado del sitio contaminado (PILA-LS) ...	69
12.4.1 Habilitación del área de la celda de tratamiento.	71
12.4.2 Construcción de celda de tratamiento.	71
12.4.3 Excavaciones del material contaminado y su control:.....	72
12.4.4 Condiciones de operación en la celda para el tratamiento del suelo por la técnica de Biopilas.	73
12.4.4.1 Control de la humedad.....	74
12.4.4.2 Surfactantes.....	75
12.4.4.3 Microorganismos(SOLIBAC IP SOIL).....	76
12.4.4.4 Nutrientes.....	76
12.4.4.5 Materia orgánica.	77
12.4.4.6 Homogenización mecánica de las Biopilas.	77
12.4.5 Pruebas de tratabilidad.	80
12.4.6 Monitoreos.....	85
12.4.6.1 Muestreo inicial de suelo.....	85
12.4.6.2 Monitoreos de control interno para evaluar la degradación de los hidrocarburos (B).	85
12.4.6.3 Muestreo final comprobatorio (MFC)	86
12.4.7 Reacomodo del suelo remediado.....	90
12.4.8 Manejo de residuos generados durante el tratamiento	90
12.4.9 Programa calendarizado de trabajo.	91

Lista de Tablas

Tabla 1. Resultados obtenidos de la evaluación gasométrica para el km 304+000	26
Tabla 2. Geoposicionamiento y longitud de perfiles de tomografía	31
Tabla 3. Geoposicionamiento y longitud de radargramas.....	37
Tabla 4. Puntos de muestreo propuestos para la Caracterización de la Atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a toma clandestina en el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000”	42
Tabla 5. Recipientes para las muestras, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.....	46
Tabla 6. Métodos analíticos para hidrocarburos	48
Tabla 7. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo	48
Tabla 8. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo	49
Tabla 9. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Ligera y BTEX para las muestras de suelo del Km 304+000	50
Tabla 10. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Media y HAP's para las muestras de suelo del Km 304+000	51
Tabla 11. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Pesada para las muestras de suelo del Km 304+000.....	53
Tabla 12. Valores geoestadísticos de las muestras de suelo analizadas para el km 304+000	55
Tabla 13. Áreas de las capas afectadas por el hidrocarburo	61
Tabla 14. Volúmenes de suelo contaminado por hidrocarburo.	62
<i>Tabla 15. Autorizaciones para el tratamiento de suelos contaminados.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 16. Métodos de Restauración.</i>	<i>68</i>
Tabla 17: Las características generales para la operación adecuada de la técnica de biopilas.....	78
Tabla 18: Categoría de pruebas de tratabilidad.	80
Tabla 19: Degradación del Contaminante a Través del Tiempo, donde se muestran los valores semanales.....	83
Tabla 20. Propuesta de puntos de muestreo final comprobatorio en paredes y fondos del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta	87
Tabla 21. Calendarización de la remediación	91

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio.	5
Figura 2. Geología general del acuífero Hidalgo-Villagrán – 2803 (CONAGUA, 2020).	8
figura 3. Afloramiento de lutita fuertemente foliada con cristalización de calcita	14
Figura 4. Foliación diagonal en lutitas como resultado de esfuerzos de cizalla.	14
Figura 5. Cristalización de calcita en espacios sigmoidales que resultan del esfuerzo de cizalla en las lutitas de la formación Méndez.....	15
Figura 6. Localización del acuífero Hidalgo-Villagrán - 2803 CONAGUA (2020).....	16
Figura 7. Seguimiento al análisis de imágenes satelitales del sitio, del año 2001 al 2021.....	19
Figura 8. Recorridos de inspección en la zona afectada.....	21
Figura 9. topografía del área de estudio.	23
Figura 10. Trabajos de evaluación gasométrica.....	25
Figura 11. Dispersión obtenida de la evaluación gasométrica en el KM 304+000.....	27
Figura 12. Esquema de disposición interelectrodica Dipolo-Dipolo.....	28
Figura 13. Instalación y lectura de perfiles de tomografías.....	29
Figura 14. Distribución de las líneas de tomografía en el km 304+000.....	31
Figura 15. TER-5 del km 304+000.....	32
Figura 16. TER-1 del km 304+000.....	33
Figura 17. TER-2 del km 304+000.....	34
Figura 18. TER-3 del km 304+000.....	34
Figura 19. Levantamiento con georradar	36
Figura 20. Distribución de radargramas en el área del pasivo ambiental del km 304+000	37
Figura 21. Radargrama 1 del km 304+000.....	38
Figura 22. Radargrama 2 km 304+000.	39
Figura 23. Radargrama 3 km 304+000.	39
Figura 24. Distribución de puntos de muestreo con base en los resultados de los estudios indirectos del km 304+000.....	43
Figura 25. Secuencia de muestreo para el km 304+000	45
Figura 26. Columna estratigráfica construida partir de los registros de perforación del km 304+000	46
Figura 27. Cadenas de custodia para la toma de muestra del km 304+000.....	47
Figura 28. Ejemplo de informe de laboratorio con clasificación de las concentraciones para el km 304+000.....	49
Figura 29. Dispersión de contaminantes a 1m de profundidad en el km 304+000.....	58
Figura 30. Dispersión de contaminantes a 3.5m de profundidad en el km 304+000.....	59
Figura 31. Stack Maps de la pluma contaminante en el km 304+000.....	63

<i>Figura 32. Plano de plumas de contaminación en el sitio y volúmenes de suelo contaminado.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 33. Vista de planta de un sistema de Biopilas.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 34. Proyección de celda de tratamiento para el pasivo ambiental aledaño al km 304+000..</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35. Metodología de la técnica autorizada de Biopilas.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 36. Trabajos de tratabilidad de la muestra realizados con la tecnología por biorremediación.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 37. Cinética Gráfica de la Degradación del Contamínate</i>	<i>84</i>
<i>Figura 38. Propuesta de distribución de los puntos de muestreo en paredes y fondos de las excavaciones a realizarse en el pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta</i>	<i>87</i>
<i>Figura 39. Diagrama de secciones transversales en biopilas para su muestreo de la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”</i>	<i>89</i>
<i>Figura 40. Distribución del Muestreo Final Comprobatorio en biopilas del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta.....</i>	<i>90</i>

1 Introducción

El consumo de las sociedades contemporáneas de los combustibles fósiles ha resultado un vector de presión sobre el ambiente por lo que remediar sus daños suele ser económicamente costoso, implicando un desafío y una oportunidad para allanar el camino hacia la eficiencia energética. Las afectaciones en el suelo van desde la exploración y explotación de pozos petroleros hasta la ocurrencia de siniestros, los cuales pueden suceder en cualquier parte del ecosistema, terrestre o acuático, provocando daños ecológicos con efectos nocivos en la flora, fauna y salud humana. Una afectación importante sucede cuando estos siniestros dañan suelos agrícolas, provocando un perjuicio económico y social debido a su inutilización en la producción de cultivos o ganadería.

Los ductos empleados para el transporte de hidrocarburos son una herramienta importante en la distribución de los combustibles en todo el territorio nacional; sin embargo, con el paso del tiempo y el constante uso de esta infraestructura petrolera, se presentan fallas (microporos principalmente) en dichas estructuras, lo que generan situaciones riesgosas para el ambiente al presentarse derrames del hidrocarburo que afectan el medio ambiente.

Estos derrames no solo afectan la capa edáfica sino que también pueden impactar cuerpos de agua superficial que son aprovechados por la población generando una situación de riesgo para la salud de la población y la biodiversidad. Las consecuencias ambientales, no solamente se restringen al suelo y aguas superficiales, sino que dependiendo de factores como la porosidad y permeabilidad del suelo, los hidrocarburos pueden migrar hacia la profundidad a través de grietas o macroporos. Esta migración vertical a través de la zona no saturada eventualmente llegará al nivel de las aguas subterráneas contaminando los mantos acuíferos.

Debido a las condiciones anteriormente descritas y a raíz de la entrada de la reforma energética en nuestro país, se han realizado diferentes cambios en los órganos gubernamentales que anteriormente se encargaban de regular y supervisar la seguridad industrial y la protección del medio ambiente en el sector de hidrocarburos, el cual está ahora a cargo la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (por sus siglas ASEA), como órgano descentralizado de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). La ASEA en el marco de sus atribuciones, se encarga de diseñar normas con base en las mejores prácticas y estándares internacionales para proteger el medio ambiente de toda la cadena de valor del sector hidrocarburos en México

Uno de los instrumentos de seguimiento y control ante el derrame de hidrocarburos en aquellos pasivos ambientales que fueron declarados ante la autoridad, es el Plan de Muestreo para la Caracterización de Suelos Contaminados (PMSCS). El plan de muestreo se ha convertido en un requisito indispensable para que la autoridad ambiental avale un estudio de caracterización y para

que expida la autorización de una remediación, esto, en virtud de que el marco regulatorio actual así lo establece.

El PMSC se soporta principalmente en los modernos métodos geofísicos eléctricos y electromagnéticos de alta resolución que están perfectamente adaptados para proporcionar información sobre la profundidad, espesor, continuidad lateral y propiedades físicas de las unidades geológicas e hidrogeológicas, que pueden actuar como barrera o constituir una ruta preferencial de contaminantes en el subsuelo.

Estos métodos indirectos son además rápidos, económicos y no invasivos, lo que significa que permiten obtener información del subsuelo sin necesidad de realizar perforaciones mecánicas cuyos resultados podrían suponer vías para el ingreso de los contaminantes hacia estratos más profundos. La aplicación de estas metodologías se fundamenta en el concepto básico de que los contaminantes en el suelo y subsuelo provocan alteraciones en algunas de sus propiedades físicas, particularmente en su resistividad eléctrica. Por lo que las variaciones en estas propiedades se utilizan para inferir la presencia y transporte de contaminantes en el subsuelo.

Los métodos geofísicos son el punto de partida para generar un adecuado plan de muestreo para la aplicación de técnicas en campo tales como muestreo y análisis geoquímico. Esto permitirá la mejor planificación de la perforación de los pozos para determinar dónde y a qué profundidad se deberán perforar, para posteriormente, por medio del análisis geoquímico identificar el tipo y concentración de los contaminantes, con esto se propondrán las alternativas que permitirán su tratamiento; todo lo anterior en su conjunto se le denomina Caracterización Ambiental de Sitios Contaminados.

2 Antecedentes.

Este pasivo es el resultado de una auditoría ambiental que se efectuó al sistema de transportación de hidrocarburos por ducto, “DDV Poliducto 10-12” de diámetro Madero-Linares-Cadereyta, Oleoducto de 24” de diámetro Madero-Cadereyta y estaciones de bombeo González, Zaragoza, Victoria I, Victoria II y Linares”, realizada en 1997. Esta presa fue producto de las actividades que realizaba Petróleos Mexicanos (PEMEX) durante las actividades de mantenimiento a los ductos que pasaban por la zona, resultado de esta actividad es que se vertían en el interior de la presa una mezcla de hidrocarburos y que estos se quedaban ahí contenidos. Es preciso señalar que dicha actividad dejó de realizarse desde esa fecha y que los residuos quedaron ahí dentro de los confines de la presa.

Posteriormente, en el 2003 se realizó la licitación para el estudio de “CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y EVALUACIÓN DEL GRADO DE AFECTACIÓN POR DERRAME DE HIDROCARBURO EN PRESA EL CARRIZO

UBICADA EN EL KM 304+000 DEL OLEODUCTO DE 24” MADERO-CADEREYTA, TRAMO VICTORIA II – LINARES”, mismo que fue presentado junto con la Propuesta de Restauración Ambiental ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) quién en esa época era la autoridad quien vigilaba y atendía este tipo de situaciones de carácter ambiental.

Derivado del análisis del estudio, la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, adjunta a la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, bajo la Dirección de Restauración de Sitios Contaminados emitieron en febrero de 2004 la autorización con oficio No. DGGIMAR.710/000238 para realizar los trabajos de restauración del pasivo ambiental.

Sin embargo, por situaciones de falta de asignación de presupuesto así como de los diferentes cambios que se han dado dentro de la estructura de PEMEX no fue posible realizar dichos trabajos. No fue sino hasta principios de este año fue que se dio la asignación de un presupuesto para el cumplimiento de resarcimiento de este pasivo ambiental.

3 Responsable de la contaminación.

Es preciso señalar que, cuando se iniciaron los primeros estudios de caracterización, propuesta de remediación y la autorización de esta, el responsable de la contaminación era PEMEX Refinación, sin embargo a partir de abril de 2015, se denominó a PEMEX Logística la cual contará con personalidad jurídica y patrimonio propios, sujeta a la conducción central, dirección estratégica y coordinación de Petróleos Mexicanos, de conformidad con lo establecido en la Ley de Petróleos Mexicanos y su Reglamento. Dentro de la estructura interna de PEMEX Logística, el centro de trabajo que le corresponde la vigilancia, operación y mantenimiento del Oleoducto de 24” Madero-Cadereyta, tramo Victoria II – Linares, donde el kilometraje del oleoducto (304+000) se encuentra ubicado en el Municipio de Hidalgo en el estado de Tamaulipas, corresponden al Sector Ductos Victoria perteneciente a Subdirección de Transporte, de la Gerencia de Transporte, Mantenimiento y Servicios de Ductos, ambas dependientes de la Subgerencia de Integridad Mecánica de Ductos.

RAZÓN SOCIAL:	PEMEX LOGÍSTICA
DIRECCIÓN:	Av. Marina Nacional #829 C, Col. Verónica Anzures, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11300, Ciudad de México
ACTIVIDAD:	Transporte y Almacenamiento de Hidrocarburos
NRA:	PLO151001KT9

CENTRO DE TRABAJO:	Sector Ductos Victoria
DIRECCIÓN:	Alberto Carrera Torres #727, Col. Ascencio Gómez Padilla, C.P.87000, Cd. Victoria, Tamaulipas.
CONTACTO:	Ing. Luis Fernando Gallegos Hernández
TÉLEFONO:	834 143 49 56
CORREO:	luis.fernando.gallegos@pemex.com

4 Objetivo

Realizar la Caracterización de Suelos Contaminados para la Atención al pasivo ambiental derivado de la contención de hidrocarburos en la presa El Carrizo 1 ubicada en el km 304+000 del oleoducto de 24" Ø Nuevo Teapa – Cadereyta, tramo Victoria II - Linares, lo anterior cumpliendo con lo establecido en norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.

4.1 Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento topográfico del sitio para conocer las elevaciones naturales del suelo y considerarla dentro de la volumetría final de suelo contaminado
- Desarrollar el marco geológico conceptual del sitio, el cual ayude a comprender mejor la distribución y posible dispersión del contaminante.
- Evaluar y dimensionar la presencia del hidrocarburo en el medio a través de prospección gasométrica de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) provenientes del hidrocarburo que se encuentran en el subsuelo, para posteriormente mediante la prospección geofísica definir y delimitar las áreas de afectadas por el hidrocarburo derramado. Lo anterior con la finalidad de generar el plan de muestreo
- Diseñar y ejecutar el plan de muestreo de suelo para obtener muestras representativas que serán analizadas por un laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación y con aprobación por parte de la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA)
- Realizar el dimensionamiento de la pluma contaminante en el suelo y dependiendo del tipo de contaminante se propondrá la técnica de remediación a seguir para su posterior limpieza.

5 Localización del pasivo ambiental

El sitio de estudio corresponde al área aledaña situada en el Km 304+000 del oleoducto de 24" Ø Nuevo Teapa-Cadereyta, tramo Victoria II – Linares. Específicamente en la instalación identificada como Presa el Carrizo I, la cual está situada a una distancia aproximada de 1.00 km al sur del pueblo de Estación Carrizos, correspondiente al municipio de Hidalgo, estado de Tamaulipas. Para acceder a este sitio, se localiza a 22.1 km en dirección sureste de la localidad de Estación Santa Engracia, la

cual tiene la mayor población dentro del municipio. Y con respecto a Hidalgo, que es la capital del municipio, localizada a 42.4 km en dirección sur. Pertenece a la subregión Victoria No. 4 del Estado de Tamaulipas, a una altitud de 400 metros sobre el nivel del mar. El Municipio cuenta con extensión territorial de 2,142.43 kilómetros cuadrados, lo que representa el 2.33 por ciento del total de la entidad. Colinda al Norte con el Municipio de Villagrán; al Sur con el de Güémez; y al Este con los de San Carlos y Padilla y al Oeste con el Estado de Nuevo León; está integrado por 128 localidades de las cuales las más importantes son: Hidalgo, Guillermo Zúñiga, Oyama, Independencia, San José de Santa Engracia, Ejido Hidalgo, El Sauz, Cruz y Cruz, Cruz y Carmen, Estación Cruz, Estación Santa Engracia y El Tomaseño.

Este sitio es una presa que contiene hidrocarburo, la cual cuenta con un área aproximada de 864.73 metros cuadrados en el interior, esta presa se encuentra en el kilómetro 304+000 del oleoducto de 24" Ø Madero – Cadereyta, tramo Victoria II - Linares. Esta instalación se encuentra ubicada en la porción nororiental del país, en el municipio de Hidalgo, en el estado de Tamaulipas, con las coordenadas siguientes: 2,696,474.18 N y 471,731.84 E.

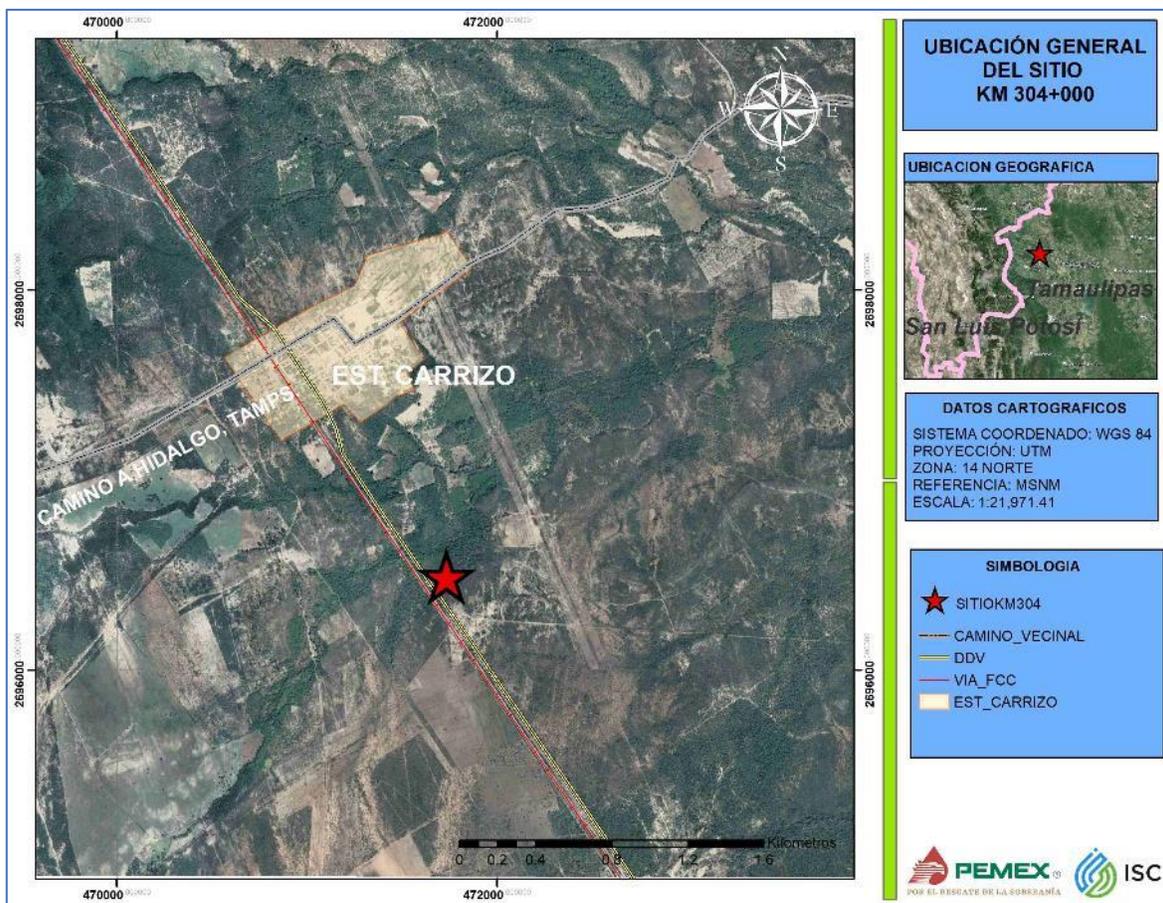


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

6 Marco físico

Clima. Las condiciones climatológicas predominantes en el área de acuerdo con la clasificación climática de Köppen, corresponde a un clima semicálido subhúmedo, (A)C(w0)(e)w", con lluvias en verano y una precipitación invernal mayor a 10.2 por ciento, cociente P/T de 36.94; registrando una precipitación menor de 5 mm en el mes más seco. La precipitación media anual es de 883.0 mm y la temperatura media anual alcanza los 23.9 °C, la mayor incidencia de lluvias se registra entre mayo y octubre, con un rango que varía entre 81.1 y 197.9 mm, la mínima corresponde al mes de enero con un valor mínimo de 15.0 mm. Las temperaturas máximas promedio más altas se presentan de mayo a septiembre con un valor entre 37.28 y 39.58 °C; los meses con temperaturas mínimas promedio más bajos son diciembre, enero y febrero con una temperatura que oscila entre 11.49 y 12.64 °C.

Hidrología superficial. A nivel regional, la cuenca del río Soto La Marina forma parte de la Región Hidrológica No. 25 San Fernando – Soto La Marina. La cabecera de la cuenca se encuentra en el macizo montañoso conformado por las serranías Santa Clara, La Melera y La Guadalupana al suroeste de Ciudad Victoria, donde se forman los ríos San Pedro y Santa Ana así como los arroyos San Marcos, Juan Capitán y El Sauz que discurren en dirección noreste y a la altura de Güémez confluyen a la presa Vicente Guerrero. El río Soto La Marina sigue un rumbo noreste que conserva hasta Nicolás Bravo donde vira hacia el sureste para luego cambiar con rumbo este que mantiene hasta desembocar al mar y recorre una longitud de 33.5 kilómetros desde su nacimiento en la presa Vicente Guerrero. De manera local se menciona que los alrededores del pasivo ambiental se encuentran arroyos de temporada, que se desarrollan principalmente por las diferencias en las elevaciones del terreno.

Edafología. Se presentan tres tipos de suelo en el área del derecho de vía, al sur del poblado Carrizos están situados los suelos del grupo Feozem calcárico, al este y sur se extiende el Xerosol cálcico y por último al oeste y norte se desarrolla el Regosol calcárico. Los suelos del grupo Feozem calcárico predominan en el área, distribuidos de forma casi homogénea pues sólo son interrumpidos por digitaciones de Xerosol cálcico e intrusiones de áreas con beneficio de materiales terrígenos alóctonos empleados en el establecimiento de infraestructura social tales como caminos vecinales. Los suelos del orden Feozem suelen tener de una moderada a alta capacidad de retención de agua, la cual se encuentra frecuentemente entorno al 28 % y puede alcanzar el 54 %. Los suelos del grupo Xerosol cálcico se extienden hacia la porción este y sur del poblado de Carrizos, dominando toda la planicie y su lomerío. Son suelos claros pobres en materia orgánica (0.7 %), con un horizonte A2 rico en arcillas y en concreciones carbonatadas. El pH es básico (8 a 8.5) y una capacidad de intercambio

de moderada a baja (24 meq/100 g de suelo). En cuanto al contenido de humedad, la capacidad de campo es moderada (27 %) aun cuando puede incrementarse conforme al tipo y cantidad de arcilla hasta 63 %. Los suelos de este grupo son poco susceptibles a la erosión. Los suelos del grupo Regosol calcárico se localizan al norte y oeste del poblado Carrizos. Presentan una estructura granular media (1.5 cm) deleznable al tacto y profundidades variables, pero que van de 0.4 a 1.0 metros, con contenido de materia orgánica de pobre a moderadamente rica (0.9 a 1.5 %) y capacidad de campo entre 19 a 26 %, esencialmente debido a un alto contenido de arenas y limos en su estructura.

Vegetación. Las formaciones vegetales mantienen un gradiente diferencial marcado donde la vegetación se restringe a cercas vivas en torno a las áreas agropecuarias, y difuminado en aquellas áreas donde las actividades humanas han dejado de incidir directamente en un periodo largo de tiempo. En los alrededores del derecho de vía no existen comunidades conservadas, tan solo se extienden asociaciones vegetales secundarias constituyendo manchones dentro de una matriz caracterizada por gramíneas con presencia de elementos arbóreos aislados, identificándose como fisonomías de carácter secundario. Por tal motivo, el área donde se localiza el proyecto carece de comunidades vegetales definidas, referida en su relación ecológica. La zona se ha visto seriamente deteriorada por el crecimiento de las actividades productivas como la agricultura y ganadería, que han transformado a la vegetación nativa de matorral submontano en pastizales y dehesas.

Fauna. Las especies que conforman la fauna de una zona están fuertemente relacionadas con las comunidades vegetales presentes, sin embargo, cuando la estructura y composición florística cambia, varias de las especies animales son de igual forma desplazadas, quedando solo aquellas con un rango de tolerancia mayor o que han sido favorecidas por la transformación. En consecuencia, la fauna cercana al derecho de vía está caracterizada por roedores, aves y pequeños reptiles, de las especies importantes que se han reportado en el municipio de Hidalgo, Tamaulipas se encuentran animales silvestres tales como el ganso canadiense, venado y paloma ala blanca.

7 Marco Geológico

7.1 Geología Regional

La geología del sitio está definida por eventos de origen ígneo intrusivo y sedimentario, que van desde el Jurásico hasta el Reciente. De esta forma, la Cuenca Tampico-Misantla, elemento paleogeográfico al que pertenece el sitio, presenta a profundidad Lechos Rojos y conglomerados del

Triásico y Jurásico, que dieron origen a las Formaciones Huizachal y La Joya, unidades que integran el denominado “Complejo Basal”. Le sobre yacen las rocas calcáreas del Cretácico Inferior, carbonatos y terrígenos del Cretácico Superior, así como sedimentos marinos clásticos del Paleógeno-Neógeno y depósitos continentales del Cuaternario (Figura 1).

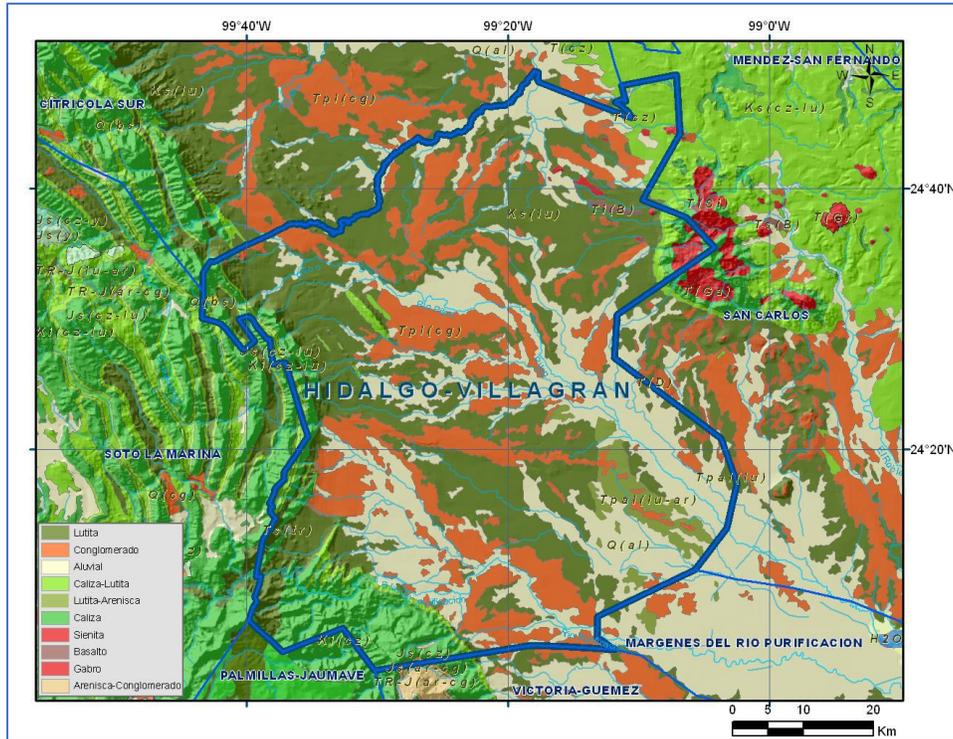


Figura 2. Geología general del acuífero Hidalgo-Villagrán – 2803 (CONAGUA, 2020).

En la región afloran rocas que varían en edad y litología: los Lechos Rojos del Triásico y los carbonatos del Jurásico Superior, que integran el “Complejo Basal”. Sobre este complejo se encuentran las rocas calcáreas del Cretácico Inferior y carbonatos y terrígenos del Cretácico Superior; sedimentos marinos clásticos del Paleógeno-Neógeno y depósitos continentales del Cuaternario. A continuación, se describe la secuencia estratigráfica presente en el área, de la unidad más antigua a la más reciente.

Triásico – Jurásico: Esta unidad está formada por una secuencia de Lechos Rojos (Ts Lr) en la que se encuentran areniscas conglomeráticas, limolitas y algunos horizontes de lutitas en estratos delgados, medianos, gruesos y masivos. Algunas areniscas presentan estratificación cruzada. Los conglomerados presentan una matriz arcillo-arenosa y fragmentos de cuarzo, de gneis y de rocas ígneas. La secuencia en cuestión representa a la Formación Huizachal (Ts Hu), misma a la que se le ha asignado un espesor de 2000 m.

Jurásico Superior

Formación Zuloaga (TJ Zu): Está constituida por calizas en estratos delgados, medianos y gruesos, con presencia de un conglomerado basal de clásticos de arenisca y fragmentos de rocas ígneas dentro de una matriz areno-arcillosa. Presenta un espesor aproximado de 400 m y aflora en el área de Huizachal–Peregrina.

Formación La Casita (Js Ca): Descansando sobre la unidad anterior se presenta un espesor que varía entre 70 y 90 m de estratos delgados y medianos de areniscas calcáreas, calizas arcillosas con nódulos y lentes de pedernal, margas arenosas y calizas arcillo-arenosas; algunas de sus areniscas presentan estratificación cruzada.

Cretácico Inferior

Formación Taraises (Ki Ta): Se encuentra formada por calizas criptocristalinas, en capas de espesor medio con estilolitas mal desarrolladas y paralelas al plano de estratificación; las capas de caliza alternan con delgados estratos de lutitas. Al N y SW del valle de Huizachal, se midió un espesor promedio de 26 m; en el cañón de Peregrina es de 55 m de espesor y en el Cañón del Rosario el grosor de la misma formación varía entre 50 y 60 m. El contacto entre la Formación Taraises y La Casita es concordante y con la Tamaulipas Inferior, que le sobre yace, es transicional concordante.

Formación Tamaulipas, (Ki Tm): Está constituida por calizas criptocristalinas en estratos gruesos, con estilolitas paralelas a los planos de estratificación y nódulos esferoidales y elipsoidales de pedernal; alternando con las calizas anteriores, en ocasiones se observan algunos horizontes de calizas microcristalinas. El espesor de esta formación tiene 214 m, en capas que varían de 10 cm a más de 2 m, se observan horizontes de calizas dolomitizadas que varían de unos centímetros hasta dos metros.

Formación Tamaulipas Inferior (Khap cz-lu). Consiste en calizas de estratificación mediana a gruesa de color gris claro y gris oscuro con nódulos de pedernal y presencia de dolomitización en su porción basal. Se encuentra aflorando sobre los cañones de Juan Capitán, Ojo Caliente y el Novillo, que cortan la Sierra Madre Oriental, donde está constituida por calizas y dolomitas de color gris a gris oscuro, en estratos que varían de unos centímetros a dos metros de espesor, con pequeños horizontes de óxido de hierro interestratificados.

Formación Tamaulipas Superior (Kace cz): Sección de calizas criptocristalinas de estratificación media con lentes de pedernal.

Formación Otates, (Ki Ot): Su localidad tipo se encuentra en el cañón de los Otates, ubicado sobre el flanco occidental de la Sierra de Tamaulipas. Inicialmente se consideró como "horizonte" y posteriormente fue elevado al rango de Formación, debido a su amplia extensión e importancia, conforme a la magnitud del evento geológico-sedimentológico que representa. Está constituida por calizas arcillosas de estructura laminar ligeramente carbonosas de color gris oscuro, su espesor se estima de 6 a 13 m.

Formación Cuesta del Cura (Ki Cu): Constituida por calizas criptocristalinas en capas de espesor medio que alternan con estratos de espesor delgado a medio de margas laminadas; ambas rocas contienen abundantes lentes y bandas delgadas de pedernal negro. Hacia su cima muestra algunas capas de bentonita. Su espesor promedio es de 150 m y subyace discordantemente a los sedimentos de la Formación Agua Nueva. Esta formación se presenta como una alternancia de calizas densas y calizas arcillosas con intercalaciones de lutitas calcáreas con bandas y lentes de pedernal negro, en una estratificación ondulante y formando estructuras de "boudinage". Sus contactos son concordantes y transicionales, subyaciendo a la Formación Agua Nueva y sobreyaciendo al miembro inferior de la Formación Tamaulipas Superior. Sus exposiciones se presentan sobre los cañones de la Sierra de Tamaulipas, como el del Moro.

Cretácico Superior

Formación Agua Nueva (Kcct cz-lu): Consiste en calizas criptocristalinas, calizas arcillosas y calizas arcillo-carbonosas, en capas de espesor delgado a medio que alternan con lutitas en capas de potencia parecida a la de las calizas. En la porción inferior de la formación, las calizas contienen abundantes nódulos de pedernal negro y hematita; casi en el contacto con la Cuesta del Cura se observan capas delgadas de bentonita. Su contacto es concordante y transicional con la Formación Cuesta del Cura, sobre la que descansa. Se le observa sobre el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en los flancos del Anticlinorio Huizachal–Peregrina y en el flanco poniente de la sierra de Tamaulipas.

Formación San Felipe (Kcoss lu-cz): Es una secuencia rítmica de calizas criptocristalinas y calizas arcillosas, dispuestas en estratos de espesor delgado a medio, que alternan con estratos de lutitas bentoníticas y calcáreas. Su localidad tipo se localiza en la ranchería de San Felipe, S.L.P., 6 km al este de Cd. Valles. Los sedimentos de esta formación se encuentran descansando sobre la Formación Agua Nueva y su espesor promedio es de 210 m.

Formación Méndez (Kcm lu-mg): Corresponde a una serie de intercalaciones de lutitas calcáreas de colores gris azulado y café con fractura nodular, intercaladas con margas, en capas que varían de 5 cm a más de 2 m de espesor, las cuales en ocasiones alternan con estratos delgados de bentonita.

Se le estima una potencia de 550 m. Se encuentra descansando concordantemente, de manera transicional, sobre la Formación San Felipe.

Paleógeno-Neógeno

Formación Velasco, (Ti Ve): Unidad formada por lutitas calcáreas intercaladas con margas y areniscas calcáreas. La unidad presenta concreciones calcáreas de formas caprichosas hasta de 20 cm de diámetro.

Rocas Intrusivas del Oligoceno-Mioceno (Tm Gd-D, Tm Gd-Si): Rocas intrusivas generadas durante el Paleógeno, de composición variable, desde el gabro hasta la granodiorita. De esta forma, pueden coexistir granodioritas y dioritas (Tm Gd-D) hasta granodioritas con sienitas (Tm Gd-Si).

Conglomerados del Plioceno (Tpl Cgp): Corresponde a conglomerados en estratos masivos constituidos por clásticos de caliza, caliza arcillosa, pedernal, calcedonia y cuarcita, en tamaños que varían desde las gravas hasta las arenas, cementados por carbonatos en matriz calcáreo-arcillosa. Se encuentra expuesta formando terrazas, en ocasiones, cubierta por una capa delgada de caliche. Se ha asignado a estos depósitos con diversas edades (desde el Eoceno hasta el Plioceno y Pleistoceno); sin embargo, la falta de una definición y delimitación claras sólo permite asignarle una edad relativa correspondiente al Pleistoceno Temprano.

Cuaternario

Pleistoceno, (Cpli Cg) Conglomerados en estratos masivos constituidos por clastos de caliza, caliza arcillosa, pedernal, calcedonia y cuarcita. Presentan matriz arenosa ocasionalmente con arcilla; están cementados por carbonatos. Los fragmentos tienen tamaños que cubren un amplio rango granulométrico. El grado de cementación varía desde pobremente cementados hasta bien cementados; se encuentran expuestos formando terrazas, en ocasiones, cubiertos por una capa delgada de caliche. Se ha asignado a estos depósitos que afloran en la Planicie Costera con diversas edades (desde el Eoceno, Plioceno y Pleistoceno) y correlacionado con las gravas cementadas con caliche de la Formación Reynosa; sin embargo, debido a la falta de una definición y delimitación claras, así como por su correlación probable con la "Formación Reynosa", diversos autores prefieren el término Conglomerados del Cuaternario asignándole una edad relativa del Pleistoceno Temprano; mientras se aclara su edad absoluta.

Holoceno Reciente

Depósitos Aluviales y Fluviales: El aluvión está constituido por un conjunto de materiales clásticos que varían desde gravas hasta arcillas; forman depósitos lenticulares con alto grado de heterogeneidad, tanto lateral como vertical, debido a las posiciones sucesivas de las principales corrientes superficiales. Estos materiales descansan indistintamente sobre las rocas más viejas, su espesor es variable, desde unos cuantos metros hasta un máximo de 36 m en el Valle del río Purificación.

Los depósitos fluviales holocénicos están constituidos por gravas, arenas y limos, presentan poco espesor y se ubican predominantemente hacia los cauces principales; aunque en algunas zonas se encuentran en los paleocauces de las antiguas corrientes.

Rocas Ígneas

Dioritas: Dentro de la zona, se encuentran algunos afloramientos de rocas ígneas intrusivas (dioritas) de probable edad Paleógeno-Neógena, se ubican en al noreste del anticlinal Huizachal–Peregrina y al norte del poblado Camacho Nuevo, en la margen derecha del río Purificación.

Basalto: Unidad constituida por basaltos de olivino. Presentan estructura vesicular y amigdaloides con relleno de calcita; se les puede encontrar desde inalterados hasta muy intemperizados. Los derrames se encuentran localizados en el valle de Ciudad Victoria, que descansan sobre los conglomerados cuaternarios.

7.2 Geología Estructural

Al iniciarse el Paleógeno los movimientos provocados por la Orogenia Laramide, pliegan los sedimentos cretácicos, causando pliegues recostados; derivando fallas inversas que en ocasiones ponen en contacto rocas del Cretácico Inferior (Formación Cupido) con rocas del Cretácico Superior (Formación Agua Nueva). Los movimientos tectónicos del Cretácico Tardío pliegan y emergen estructuras anticlinales y sinclinales de las rocas sedimentarias del área, tanto cretácicas como paleógenas, anteriores al Oligoceno, con orientación noroeste-sureste. En la Sierra Madre Oriental, los plegamientos se presentan muy cerrados, algunos recumbentes hacia el noreste, desplazados por una falla inversa frontal.

Por otra parte, las rocas del Paleógeno-Neógeno presentan una inclinación suave al oriente, generada por un sistema de fallas normales con bloque caído, por lo general al este. Durante el Paleógeno se depositaron en toda la región sedimentos terrígenos, -Conglomerado Reynosa-, provenientes de la porción occidental de México, que sufrió anomalías al principio de esta época y un posterior levantamiento.

7.3 Geología del Sitio

Las rocas aflorantes en el sitio están constituidas por lutitas pertenecientes a la Formación Méndez (Cretácico Superior, Campaniano-Maestrichtiano) (SGM, 2023). Estas rocas presentan una coloración amarillo verdoso que al intemperizarse se tornan en color amarillo claro. Presentan una fuerte foliación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) cuya orientación coincide con el rumbo tectónico de la Sierra Madre Oriental, esto es con rumbo NNW-SSE, por lo que se consideran resultado de los esfuerzos tectónicos ocurridos durante la Orogenia Laramide (aprox. hace 70 millones de años).

Adicionalmente a la foliación principal, se han desarrollado esfuerzos de cizalla con orientación diagonal que dan como resultado la disgregación de la roca en fragmentos con formas romboidales (Figura 2). Derivado de los esfuerzos anteriormente mencionados también se han generado los espacios donde ha ocurrido la cristalización de calcita (CaCO_3) formando cuerpos sigmoidales (Figura 3), con tonalidades amarillas debido a la presencia de óxidos de hierro (limonita). El mejor afloramiento del sitio se ubica dentro de la presa, formando una pequeña protuberancia en su porción occidental y cubre escasos 15 m^2 aproximadamente (Figura 4). Desde el punto de vista hidráulico, esta roca es de baja permeabilidad debido a su composición altamente arcillosa, ya que las fracturas tienden a cerrarse hacia la profundidad. Este comportamiento ha sido documentado en diversos afloramientos del noreste de México por observaciones geológicas directas y métodos indirectos como geofísica de alta resolución (Montalvo-Arrieta et al., 2008; Infante et al., 2010; Montalvo-Arrieta et al., 2011; Infante-Pacheco et al., 2020).



figura 3. Afloramiento de lutita fuertemente foliada con cristalización de calcita

Sobreyaciendo parcialmente a las lutitas se han desarrollado suelos arcillosos de color café claro. El espesor promedio de la cubierta edáfica es de 1.6 m.



Figura 4. Foliación diagonal en lutitas como resultado de esfuerzos de cizalla.



Figura 5. Cristalización de calcita en espacios sigmoidales que resultan del esfuerzo de cizalla en las lutitas de la formación Méndez.

Referencias bibliográficas

- CONAGUA (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Hidalgo-Villagran (2803) Estado de Tamaulipas. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas, 34 p.
- Infante V., Gallardo L.A., Montalvo-Arrieta J.C., Navarro de León I. (2010) Lithological classification assisted by the joint inversion of electrical and seismic data at a control site in northeast Mexico. *Journal of Applied Geophysics*, v. 70, n. 2, p. 93-102. ISSN: 0926-9851. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.11.003.
- Infante-Pacheco V.E., Montalvo-Arrieta J.C., Navarro de León I., Velaco-Tapia F. (2020) Improvement of Shallow Seismic Characterization Using the Singular Value Decomposition (SVD) Method in Seismic Data Inversion: A Case Study of a Site in Northeast Mexico. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 25, n. 4, p. 447-462. ISSN: 1083-1363 (Print), 1943-2658 (Online). DOI: 10.32389/JEEG20-037.
- Montalvo-Arrieta J.C., Cavazos-Tovar P., Navarro de León I., Alva-Niño E. & Medina-Barrera, F. (2008) Mapping seismic site classes in Monterrey Metropolitan Area, northeast Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 60, n. 2, p. 147-157. ISSN: 1405-3322. DOI: 10.18268/BSGM2008v60n2a1.

- Montalvo Arrieta J.C., Ramos-Zúñiga L.G., Navarro de León I., Ramírez-Fernández J.A. (2011) Una aproximación a la regionalización sísmica del estado de Nuevo León, basada en velocidades de propagación de ondas de corte y geología. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. 63, n. 2, p. 217-233. ISSN: 1405-3322. DOI: 10.18268/BSGM2011v63n2a6.
- SGM (2023) Léxico estratigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano. Gobierno de México. https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/. Consultado el 03/08/2023.

7.4 Hidrogeología Regional

El sitio 304 (Estación Carrizos) forma parte del acuífero Hidalgo-Villagrán, definido con la clave 2803 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción centro-oeste del estado de Tamaulipas, entre los paralelos 24° 03' y 24° 49' de latitud norte y entre los meridianos 99° 04' y 99° 44' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 3801 km². Colinda al este con el acuífero San Carlos, al sur con los acuíferos Márgenes del Río Purificación, Victoria-Güémez y Palmillas Jaumave, del estado de Tamaulipas, al oeste con el acuífero Soto La Marina y al norte con Citrícola Sur, estos últimos del estado de Nuevo León (Figura 5).

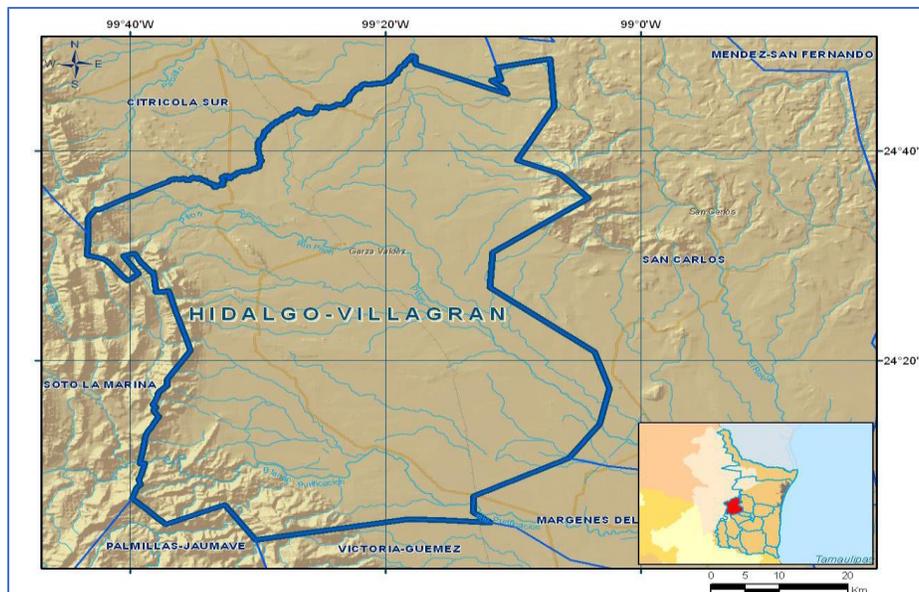


Figura 6. Localización del acuífero Hidalgo-Villagrán - 2803 CONAGUA (2020).

Hidrodinámicamente, el acuífero es de tipo libre en su mayor extensión, mostrando condiciones locales de semi confinamiento en la porción noroeste. Con base en los registros geológicos de pozos, el acuífero se encuentra alojado principalmente en rocas sedimentarias arcillosas intercaladas con carbonatos débilmente cementados (lutitas-margas), generadas durante el Cretácico. En menor proporción, por materiales sedimentarios (conglomerados y arenas) formados durante el Neógeno y Holoceno correspondiente a depósitos aluviales y al conglomerado Reynosa, que rellenan el valle. La cima fracturada y alterada de la Formación Méndez que subyace a los depósitos de relleno también forma parte del acuífero que se extiende en el valle.

La litología de la Formación Méndez constituida esencialmente por lutitas y margas, le confiere baja permeabilidad, la cual es notablemente aumentada en las zonas en donde se presentan sistemas de fallas y fracturas. La permeabilidad secundaria de esta formación es frecuente en toda la unidad, siendo mayor en las zonas en donde las fracturas se concentran. Forma parte del acuífero en las porciones bajas y capta una parte del agua de lluvia que se precipita sobre sus afloramientos.

En el estudio de Consorcio de Ingeniería Mexicana (2001) se reporta un valor promedio de la transmisividad igual a 5×10^{-3} m²/s en los límites con el Acuífero Citrícola Sur, obtenido de pruebas de bombeo. Así mismo, se reportan valores de transmisividad que varían entre 0.03×10^{-3} y 13.2×10^{-3} m²/s, obtenidos de pruebas de bombeo. Se debe señalar que durante las pruebas se observaron abatimientos del nivel estático de 5 a 6 m en un periodo de 12 horas.

Los valores de la transmisividad reportados revelan que se trata de un acuífero de capacidad transmisora de media a baja, derivada de la baja permeabilidad y poco espesor de los materiales granulares y aluviales que lo constituyen. Debido a que las pruebas de bombeo no contaron con pozo de observación, no fue posible la estimación del coeficiente de almacenamiento. Con base en la estratigrafía de la zona, se estima que para tiempos largos el acuífero se comporta como libre en los depósitos aluviales del relleno del valle; por tanto, su coeficiente de almacenamiento es equivalente a su rendimiento específico, que puede variar en el rango de 0.1 a 0.2, dependiendo de la granulometría de los materiales. El acuífero en las lutitas fracturadas de la Formación Méndez es semiconfinado, por lo que el coeficiente de almacenamiento puede variar entre 0.0001 y 0.005.

Con respecto a la evolución del nivel estático, no se cuenta con información piezométrica histórica que permita la configuración. Las escasas mediciones piezométricas recabadas se encuentran dispersas en tiempo y espacio y no cubren en su totalidad la extensión superficial del acuífero. Adicionalmente, la configuración de la elevación del nivel estático no demuestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea que indiquen la presencia de conos de abatimiento causados por

la concentración de pozos. Por estas razones, se puede afirmar que las variaciones en el nivel del agua subterránea no han sufrido alteraciones importantes en el transcurso del tiempo, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

7.5 Hidrogeología del sitio

Particularmente, las condiciones hidrogeológicas para el sitio de la Estación Carrizos se caracterizan por la existencia de dos unidades hidrogeológicas: Una unidad hidrogeológica somera consistente en suelo arcilloso de color café claro, con espesores variables que llegan a alcanzar los 2.5 m hasta estar ausente completamente. El suelo cuando está en condiciones de saturación (p. ej. Después de eventos de precipitación) se comporta temporalmente como un acuífero granular de permeabilidad media a baja, esto es tomando en cuenta su contenido de arcilla. Subyaciendo a esta capa irregular de suelo se encuentran rocas de composición lutítica de la formación Méndez. Esta unidad litológica representa hidro estratigráficamente un acuitardo, cuya reducida permeabilidad se debe a la existencia de fracturas. En las observaciones de campo se constató que estas fracturas en su mayoría están rellenas por cristales de calcita de color blanco lechoso con algunas tonalidades de color amarillo debido a la presencia de óxidos de hierro (mineral limonita). Las fracturas presentan dos arreglos en su orientación: el principal que tiene una orientación NW-SE corresponde a la orientación tectónica de la Sierra Madre Oriental y al fallamiento normal observado en la provincia Cuenca de Burgos y un arreglo secundario, diagonal al primero, con orientación N-S que resulta de los esfuerzos cortantes o de cizalla.

Hidrodinámicamente el comportamiento de las aguas subterráneas se da bajo condiciones libres o no confinadas y la unidad permanentemente saturada es la lutita. El nivel freático observado en un aprovechamiento hidráulico abandonado (noria) en el sitio se estima en aproximadamente 2.3 m de profundidad, por lo que se considera muy somero.

Referencias bibliográficas

- CONAGUA (2020) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Hidalgo-Villagran (2803) Estado de Tamaulipas. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas, 34 p.

8 Trabajos previos realizados como soporte del PMCSC.

8.1 Análisis de imágenes satelitales

Ante cualquier emergencia ambiental por derrame de hidrocarburo, Industrias y Servicios de Coahuila S.A. de C.V. (ISC) cuenta con una secuencia planeada y organizada de actividades para llevar a cabo la evaluación del sitio, con el objetivo de determinar la naturaleza y distribución de contaminantes sobre y debajo de la superficie. La primera fase de los trabajos consiste en el análisis de la información documental e histórica disponible, en donde se analiza a través de fotografías satelitales la historia del terreno, actividades desarrolladas en el sitio, poblaciones cercanas, información hidrogeológica; así como los recorridos en campo para conocer la topografía del terreno, condiciones físicas y búsqueda de indicios de contaminantes (manchas superficiales, olores, vapores, vegetación quemada, etc.). Con esta información, es posible estimar el área posiblemente impactada sobre la cual se aplicará metodología de evaluación indirecta (geofísica), para obtener una visión más definida de la distribución del contaminante.



Figura 7. Seguimiento al análisis de imágenes satelitales del sitio, del año 2001 al 2021

Derivado del análisis de imágenes satelitales obtenidas del software GoogleEarth Pro, se seleccionaron las imágenes de los años 2001, 2014, 2016 y 2021 que son consideradas las de mayor relevancia (Figura 7), donde se logra apreciar claramente la zona del pasivo ambiental que en su momento fue utilizada como una presa de desfogue de producto proveniente de la T.R.D.E. Carrizos que se encuentra aproximadamente a 54.00 m al este del pasivo. En la imagen del 2001 se aprecia

que la zona aledaña a la presa se empleaba como zona de cultivo y con el paso de tiempo se dejó de realizar la actividad en el terreno, donde posteriormente se fue cubriendo de vegetación secundaria, sin mostrar algún otro cambio significativo en la comparativa de las imágenes. Al norte del pasivo se aprecia un arroyo de temporada bien definido, el cual está cubierto por una densa capa arbórea, característica de este tipo de cuerpos de agua, dicho arroyo no presenta algún indicio de impacto por hidrocarburo, en el momento del recorrido se encontraba sin agua. Al parecer el pasivo se ha mantenido contenido en esta estructura (presa), sin que se tenga mayor contacto con las personas o animales.

8.2 Recorridos en campo

Una vez tomado en cuenta el análisis de las imágenes satelitales, se procedió a realizar una inspección visual en el sitio, para acceder al sitio se recorre la carretera 85 en el tramo Cd. Victoria – Hidalgo, una vez que se encuentra en la entrada a Hidalgo en la comunidad denominada “El Tomaseño”, se toma la salida contraria hacia la cabecera municipal (lado derecho recorriendo de norte a sur), accediendo a un camino secundario de terracería, el cual debe ser recorrido 24 km aproximadamente hasta llegar al ejido Estación Carrizos, mismo que se caracteriza por ser una estación del tren de carga; posteriormente al arribar a la Estación, se atraviesan las vías del tren y se llega al derecho de vía de PEMEX, el cual fue adoptado como una calle para transitar las personas del ejido y una vez en el derecho de vía se toma dirección hacia el sur-sureste por aproximadamente 1.2 km hasta llegar estación de PEMEX T.R.E.D. Carrizos.

Hacia el este de dicha instalación se recorren 54.00 m aproximadamente y se encuentra con el pasivo ambiental del km 304+000 del oleoducto de 24” Nuevo Teapa-Cadereyta, que es una presa que se utilizaba para verter hidrocarburo producto de los trabajos sobre el ducto. Una vez en el punto se identificaron los rasgos naturales y antropogénicos aledaños al sitio para considerar durante la ejecución de los trabajos. Asimismo, se establecieron los puntos idóneos para la colocación de los dispositivos de prospección geofísica para cuantificar de manera indirecta la presencia de contaminantes en el subsuelo. En el caso de las aguas superficiales, tal como se identificó mediante el análisis de las imágenes satelitales, durante el camino se pudieron apreciar varios sitios denominados “vados” por donde fluye de manera temporal el agua proveniente de las lluvias acaecidas en la región, uno de ellos se localiza aproximadamente a unos 50m de esta estación, sin embargo, no entra en contacto con el material contenido en la presa, dado que está rodeada de bordos que impiden dicho contacto.

Derivado de la inspección en el sitio, se determinó un área de trabajo de limpieza y despalme de 5,000 m², esto en base en la afectación superficial al suelo en el sitio ya que el hidrocarburo provocó un “embarramiento” dentro de la presa, sin embargo, se considera unos metros más allá del límite de esta.



Figura 8. Recorridos de inspección en la zona afectada.

8.3 Levantamiento topográfico.

Una de las actividades importantes durante la ejecución de los trabajos es el levantamiento Topográfico del Sitio, mediante el cual se georreferencian los rasgos naturales y antropogénicos del sitio de estudio y sus áreas colindantes. Asimismo, se ubican y georreferencian todos los dispositivos de prospección utilizados para este estudio de caracterización, permitiendo establecer el control terrestre el cual servirá como base en la ubicación de todos los trabajos de estudios indirectos con los cuales se determinará el área afectada para su definición de los puntos de muestreo de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Para el levantamiento que se realizó en este sitio se utilizó el siguiente equipo y herramienta:

- 1.- GPS Topográfico Marca CHCNAV Modelo X91 Receptor Base y Receptor Rover con accesorios y Cables de conexión, con sus soportes (tripie) y bastón del Rover
- 2.- Antena y Radio UHF Moderno Externo.
- 3.- Batería de alimentación.
- 4.- Estacas de madera y aerosol de pintura fosforescente.
- 5.- Mojonera de concreto.

Los trabajos de control terrestre se llevan a cabo desarrollando las actividades siguientes:

- Reconocimiento del sitio de los trabajos: Se realizaron recorridos por toda el área de trabajo con el fin de conocer a detalle el sitio y las zonas donde se requiriera una mayor precisión en el levantamiento.
- Ubicación de puntos de control: Estos se instalaron dentro del área de trabajo, previo al reconocimiento del sitio de los trabajos eligiendo la zona en donde se colocará dicho punto, el cual tiene las siguientes características: Están ubicados en áreas de fácil acceso, con gran visibilidad hacia otras zonas del área de trabajo, son visibles fácilmente, las coordenadas de estos puntos de control se anotaron en la libreta de campo y se plasmó su ubicación en el formato de trabajo. Con este punto de control nos permitió georreferenciar correctamente y ubicar en el mismo sistema de coordenadas los datos que se obtengan durante el levantamiento topográfico así como lo son los métodos indirectos.
- Instalación de equipo y levantamiento de condiciones estructurales y curva de niveles en área de influencia: Con nuestro punto de control ubicado se procedió a ubicar nuestro GPS Receptor Base.
- Configuración de los equipos con ayuda de la colectora de datos, la cual es la encargada en enlazar ambos receptores con el radio UHF y almacenar digitalmente los puntos levantados en campo. La colectora incluye el software SurvCE en dicho programa se seleccionaron el sistema de coordenadas geográficas, el cual fue el sistema World Geodetic System 1984 (WGS 84) y proyección de coordenadas en Universal Transverse Mercator (UTM). Posteriormente se realizó el enlace inalámbrico (vía Bluetooth) a los dos receptores y posteriormente realizar su enlace inalámbrico entre la colectora y el radio UHF.
- Ya terminado la instalación del equipo, se procedió al levantamiento de puntos el cual consistió en identificar los rasgos antropogénicos y naturales de la zona de estudio los cuales incluyen principalmente en: Caminos y accesos al sitio, Derechos de vía, líneas de Ductos si estuvieran identificadas, pozos de agua existentes, presas o cuerpos de agua de estudio, construcciones cercanas de interés para su estudio, seccionamiento de terreno para obtener pendientes del suelo, mallas o cercas de terrenos en caso de ser parte del área de estudio específico, postes de CFE, PEMEX, etc y puntos y trayectorias de trabajos de métodos indirectos para la identificación de áreas potencialmente impactadas.

Posteriormente, los datos obtenidos en campo se procesaron mediante diversos programas de cómputo, entre los cuales se encuentran: SurvCE, bloc de notas de Microsoft, Civil Cad (Modulo instalado en AutoCAD 2014), AutoCAD 2015

Mediante el programa SurvCe incluido en la colectora de datos, se selecciona la opción de exportar datos en formato Texto. El archivo generado se descarga en una computadora por medio de una conexión alámbrica USB. Para la elaboración del plano final se importó el archivo del Bloc de notas

con la ayuda de Civil Cad, el cual arroja la nube de puntos georeferenciados con su descripción. Con los puntos georeferenciados y debidamente identificados se realizó el dibujo de la poligonal envolvente, la cual delimita nuestra área de estudio, así como también se dibujaron las líneas de trayectorias de mallas, D.D.V., accesos, etc. Como resultado del dibujo se obtuvieron los diferentes planos en los cuales se detallan el sitio. El polígono de estudio abarcó un área aproximada de 0.5 Ha.



Figura 9. topografía del área de estudio.

8.4 Identificación de ductos

En este pasivo en particular del km 304+000, no se encuentra cercano al derecho de vía por lo tanto no se realizaron actividades de identificación de ductos debido a que no recorre ninguna línea o tubería subterránea en la zona donde se ubica el pasivo.

8.5 Dimensionamiento de los Compuestos Orgánicos Volátiles mediante la evaluación gasométrica.

Otra de las etapas de las evaluaciones primordiales para determinar la extensión del contaminante, fue mediante la determinación de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) a través de Gasometrías, el cual es un método adecuado para determinar de forma rápida la extensión de un derrame de hidrocarburos líquidos volátiles y semi volátiles en el suelo y subsuelo. A diferencia de otras técnicas prospectivas, el análisis gasométrico proporciona información expedita. El análisis cuantitativo y cualitativo de estos COV's provee información sobre el ambiente que prevalece en la zona vadosa, lo que puede auxiliar en la determinación de la fuente, la presencia, la composición y la distribución de los contaminantes. La técnica de levantamiento gasométrico nos sirve como una primera medida para definir la pluma de contaminación en la matriz suelo. Entre las limitaciones del método se encuentra que no proporciona información referente a la distribución vertical del contaminante y las mediciones están influenciadas por el clima (lluvias, época de calor y frío), no obstante, constituye una excelente herramienta para orientar los esfuerzos de los métodos directos como el muestreo de suelo

Se realizaron un total de 50 gasometrías distribuidas de manera uniforme sobre el área de trabajo. Para ello, se realizó la perforación de pozos en el suelo mediante una perforadora Power Probe 9780D hasta una profundidad de 1.00 m, colocando dentro la perforación un tubo de PVC de 2" de diámetro, el cual fue hincado para asegurar su preservación, posteriormente fue tapado en su parte superior (a nivel del suelo), sellando el espacio entre las paredes del pozo y el tubo de PVC con la finalidad de evitar toda pérdida de estos vapores, siendo el objetivo de esta instalación captar en el transcurso de 24 horas todos aquellos Compuestos Orgánicos Volátiles provenientes de la degradación natural de materia orgánica, así como aquellos COV's provenientes de la degradación de agentes externos al medio natural, que en este caso son los hidrocarburos derramados en el suelo que afectan las concentraciones naturales de estos compuestos.

Para las mediciones de las concentraciones de COV's capturados en los tubos hincados se utilizó el equipo MiniRAE 3000 el cual, su principio básico es que, en un extremo de la fibra óptica se hace pasar de forma continua un haz de luz, el cual al llegar al detector cuantifica la señal emitida (estado basal o cero). Una vez que el sensor químico de fibra óptica es introducido en el ambiente aéreo contaminado con hidrocarburos, se impregna y en consecuencia la intensidad de luz que retorna al detector es inversamente proporcional a la concentración de hidrocarburos presentes, ya que estos se combinan con la cubierta porosa de la fibra óptica. Este proceso es reversible al cabo de unos segundos, permitiendo hacer lecturas subsecuentes en lapsos cortos de tiempo.

Al final todas las gasometrías fueron retiradas, rellenando la perforación con el mismo material que fue extraído durante la instalación del tubo colector.

FOTOGRAFIA DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP



Figura 10. Trabajos de evaluación gasométrica

La instalación e hincado de las gasometrías, se realizó tomando en cuenta tanto las zonas en las que el personal de PEMEX comentó como zona impactada que en este caso el punto era evidente al tratarse de una presa de desfogue, la cual presentaba taludes por encima de los 2.0 m de altura y en el centro de esta se apreciaba el impacto del hidrocarburo en el suelo. Tomando en cuenta estas situaciones, la instalación de gasometrías se desarrolló de la siguiente manera:

- Las gasometrías de la GS-1 a la GS-20, se instalaron alrededor de la presa de desfogue, con una separación aproximada entre 10.0m y 15.0m dependiendo de la accesibilidad de los puntos. El objetivo primordial de estas gasometrías era el de encontrar indicios que mostraran que el impacto no solo se encontraba dentro de la presa, si no, por fuera del perímetro de esta.

- Las gasometrías GS-21 a GS-50, se instalaron en 3 filas de 10 gasometrías por fila, con separación entre estas que van de los 8.0m a los 10.0 m cubriendo todo el área interna de la presa. La instalación de GS-21, GS-40 y GS-41, sirvió para definir si la tubería de desfogue que atraviesa el talud oeste de la presa pudiese presentar alguna grieta o poro que en su momento haya provocado el derrame de hidrocarburos sobre estas estructuras.

La ubicación y resultados de las gasometrías se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resultados obtenidos de la evaluación gasométrica para el km 304+000

GASOMETRIA	X	Y	COV's (ppm)	GASOMETRIA	X	Y	COV's (ppm)
GS-1	471684.95	2696476.32	187	GS-26	471722.71	2696482.26	319
GS-2	471688.76	2696466.24	169	GS-27	471727.62	2696484.72	303
GS-3	471693.50	2696455.83	140	GS-28	471731.26	2696486.66	337
GS-4	471697.22	2696446.60	235	GS-29	471736.68	2696488.44	338
GS-5	471704.34	2696439.74	209	GS-30	471744.13	2696490.73	372
GS-6	471719.49	2696442.70	152	GS-31	471750.40	2696485.39	497
GS-7	471728.30	2696448.12	136	GS-32	471742.86	2696481.84	462
GS-8	471737.86	2696452.53	163	GS-33	471736.09	2696479.21	458
GS-9	471750.31	2696460.23	101	GS-34	471732.70	2696477.35	538
GS-10	471759.54	2696469.54	212	GS-35	471727.54	2696474.47	671
GS-11	471764.53	2696477.16	102	GS-36	471721.69	2696472.19	745
GS-12	471758.95	2696485.63	251	GS-37	471714.92	2696469.31	772
GS-13	471753.61	2696492.91	159	GS-38	471709.33	2696466.68	767
GS-14	471746.84	2696497.65	135	GS-39	471705.69	2696464.14	518
GS-15	471742.18	2696501.56	221	GS-40	471701.12	2696461.60	369
GS-16	471733.97	2696497.67	174	GS-41	471704.59	2696454.07	421
GS-17	471722.03	2696492.59	182	GS-42	471711.19	2696456.69	632
GS-18	471708.91	2696488.44	157	GS-43	471716.27	2696459.91	660
GS-19	471697.99	2696484.21	258	GS-44	471721.86	2696461.86	571
GS-20	471690.45	2696481.16	125	GS-45	471727.87	2696464.23	539
GS-21	471697.31	2696469.48	305	GS-46	471732.95	2696467.44	429
GS-22	471701.46	2696471.68	581	GS-47	471738.03	2696470.32	551
GS-23	471705.52	2696474.13	481	GS-48	471743.96	2696473.29	480
GS-24	471711.03	2696476.76	710	GS-49	471749.29	2696476.33	436
GS-25	471717.97	2696479.72	364	GS-50	471755.48	2696478.87	453

Una vez realizadas las mediciones de las concentraciones de los Compuestos Orgánicos Volátiles, se procedió a procesar la información en el software ArcGIS 10.3 mediante el cual obtenemos un plano representativo de la distribución de las concentraciones, con lo que se podrá proyectar la siguiente fase de prospección geofísica en todos aquellos puntos donde los valores de concentración de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) presentarán valores por encima de los de fondo. El plano resultante de la dispersión de la pluma de Compuestos Orgánicos Volátiles se presenta en la Figura 11

Los resultados muestran que los valores naturales del suelo se asocian a las gasometrías que van de la GS-1 a la GS-20 donde no se muestran valores por encima de los 260 ppm de COV's, por lo que

todo valor por encima de los 300 ppm COV's es considerado como zona de impacto, recordando que este es un método indirecto el cual solo confirma la presencia o ausencia de los hidrocarburos, no pudiendo estimar de manera directa la concentración de estos en el suelo. El valor máximo reportado es de 772 ppm de COV's ubicándose en la parte oeste de la presa, cercana a la tubería de desfogue de los hidrocarburos provenientes de la estación de PEMEX T.R.E.D. Carrizos. Es importante mencionar que la edad del pasivo y los tipos de contaminantes presentes, generan que las lecturas de Compuestos Orgánicos Volátiles no sean altas, por encima de 1,000 ppm, como en algunos otros sitios donde hemos desarrollado este tipo de metodologías indirectas, ya que con el tiempo y el intemperismo los mismos vapores que puede emitir un hidrocarburo absorbido por el suelo, van disminuyendo. El valor promedio de las lecturas gasométricas está en 370.94 ppm de COV's y el valor más bajo en las gasometrías es de 101 ppm de COV's. Según la dispersión obtenida de los Compuestos Orgánicos Volátiles para el km 304+000, pareciera indicar que el hidrocarburo en su mayoría se encuentra contenido en la misma presa de desfogue hasta el límite con los taludes de esta.

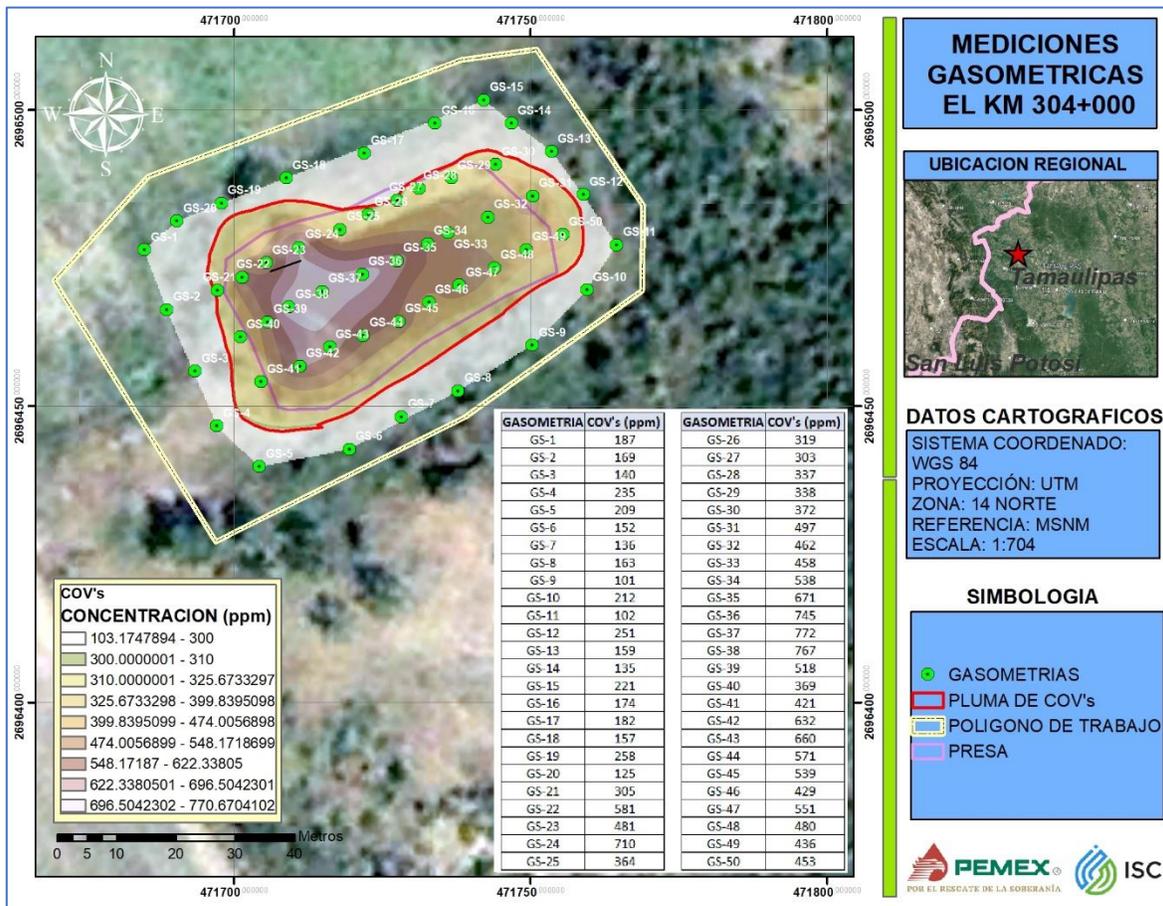


Figura 11. Dispersión obtenida de la evaluación gasométrica en el KM 304+000

8.6 Levantamiento geofísico

La tomografía tiene por objetivo específico, determinar la distribución de la resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de exploración, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. Para ello se utilizan una serie de electrodos insertados en el suelo con un espaciamiento específico (MN) a lo largo de la línea del perfil. Un cable multicanal conecta a cada electrodo al sistema central midiendo y almacenando la resistividad del subsuelo.

En el caso de los trabajos realizados en campo se utilizó un arreglo Dipolo-Dipolo, en el cual se forman dos dipolos, uno denominado “de corriente” por el cual se inyecta la energía al terreno y el otro llamado “de potencial” a través del cual se miden las diferencias de potencial a varias distancias. La distancia se representa entre el centro de los dos dipolos y se hace variar para aumentar la profundidad de investigación en el subsuelo. El resultado final es una sección distancia-profundidad con la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo, asociada a los términos geológicos de la zona.

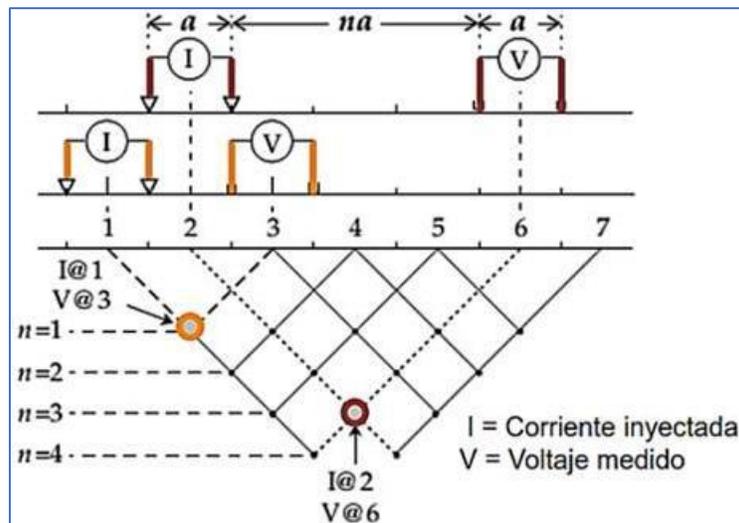


Figura 12. Esquema de disposición interelectrodica Dipolo-Dipolo

El equipo que se utilizó fue el Resistímetro Syscal Pro-Switch 24, con un procesamiento de datos con el programa RES2DINV el cual usa la técnica de inversión de los mínimos cuadrados con restricción de alisado para producir el modelo 2D del subsuelo con solamente los datos de

resistividad aparente. Es completamente automático y no requiere dar el modelo inicial. La metodología de uso fue la siguiente:

1. Ubicación física del área de trabajo. - Se ubican los inicios y finales de las líneas según lo planteado previamente
2. Instalación física del equipo. - Posterior a la ubicación, se realiza la instalación de electrodos de manera equidistante y se conectan a los cables inteligentes los cuales llegan hasta la unidad central o Resistivímetro. Una vez conectado se inician ajustes de parámetros.
3. Levantamiento de datos. - La adquisición de datos se realiza desde la unidad central, una vez programada las lecturas se realizan de manera automática, guardándose en el mismo equipo
4. Procesamiento de información. - La información generada es procesada mediante un Software que permiten la inversión de datos generando un modelo en dos dimensiones a partir de los valores de resistividad.



Figura 13. Instalación y lectura de perfiles de tomografías

Se ejecutaron en total 7 tomografías cumpliendo un volumen de trabajo de 414.00 metros lineales en total, estas líneas de estudio fueron dispuestas de la siguiente manera; TER-1 (69.00 m), TER-3 (69.00 m), TER-4 (69.00 m) y TER-5 (69.00 m) de Noreste – Suroeste, la TER-2 (46.00 m) Sureste – Noroeste, TER-6 (46.00 m) y TER-7 (46.00 m) Noroeste - Sureste.

Con base a los resultados obtenido por medio del analisis gasometrico se logro dirigir de manera mas especifica la geofisica, es decir ya con el conocimiento de las zonas de mayor concentracion de

COV's, una vez teniendo la dispersion estadística de las concentraciones, se proyectan las líneas para identificar la profundidad a la cual pudiera estar llegando el contaminante, cabe mencionar que las gasometrías se ejecutan hasta 1.00 metro, por lo cual son representativas hasta dicha profundidad y con la geofísica como segunda evaluación podemos determinar la distribución vertical del contaminante.

De acuerdo con lo anterior se propusieron 7 líneas de tomografía distribuidas dentro y fuera de la zona de interés, las cuales quedaron establecidas de la siguiente manera:

- Para la TER-1 se tomaron en cuenta los valores de concentración que arrojaron las gasometrías alineadas de Noreste a Suroeste desde la GS-31 hasta la GS-40, quedando con esta misma orientación la línea de tomografía y una longitud de 69.00 metros, cabe mencionar que esta fue dispuesta de esta manera por los valores de concentración que presentaron principalmente las gasometrías GS-36 (745 ppm), GS-37 (772 ppm), GS-38 (767 ppm) y GS-39 (518 ppm), las cuales tuvieron una mayor concentración de COV's.
- Al igual que la TER-1 y tomando en cuenta que en la zona Suroeste de la presa es donde se concentro la mayor cantidad de COV's se ejecutaron de manera paralela y con la misma longitud las TER-3 y TER-4 que corresponden a la línea de gasometrías de la GS-21 (305 ppm) a la GS-30 (327 ppm) y de la GS-41 (421 ppm) a la GS-50 (453 ppm) respectivamente
- Para poder correlacionar de mejor manera las tomografías y los resultados de gasometrías se realizaron cruces entre tomografías, ejecutando las TER-2, TER-6 y TER-7 de manera perpendicular a las líneas mencionadas en los puntos anteriores, estas tienen orientación Noroeste a Sureste y tienen longitud de 46.00 metros cada una
- La TER-6 cubre la línea donde se encuentran las gasometrías GS-21 (305 ppm), GS-40 (369 ppm) y GS-41 (421 ppm), las cuales presentan valores altos de concentración, de igual manera esta tomografía sale de los límites de la presa, tomando valores de resistividad de suelo natural
- En el caso de la TER-2 además de haber cruzado por el centro las tomografías perpendiculares se colocó sobre los puntos donde se ejecutaron las gasometrías GS-25 (364 ppm), GS-36 (745 ppm) y GS-45 (539 ppm), como ya menciono anteriormente con la finalidad de tener una buena correlación en los datos de la zona con mayor concentración de COV's
- La ubicación de la TER-7 se decidió con base a las gasometrías GS-30 (372 ppm), GS-31 (497 ppm) y GS-50 (453 ppm), que de igual manera hace cruce con las tomografías perpendiculares, únicamente que esta se ubica en la zona Noreste de la presa
- Por último se ejecuto una tomografía de “calibración” es decir donde no se registraron valores de concentración de COV's, para determinar las resistividades reales del suelo

natural, fue la tomografía TER-5 ejecutada al lado Noroeste de la presa, cercano a las gasometrias que se encuentran en esta zona, ya que estas presentaron concentraciones por debajo del limite que se establecio (300 ppm).

Tabla 2. Geoposicionamiento y longitud de perfiles de tomografía

TOMOGRAFIA EN KM 304+000					
LINEA	COORDENADAS UTM WGS84				LONGITUD
	INICIO		FIN		
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	
TER-1	471747.11	2696488.50	471693.86	2696452.04	69.00
TER-2	471738.90	2696455.73	471714.06	2696489.93	46.00
TER-3	471751.95	2696495.62	471689.79	2696465.48	69.00
TER-4	471764.86	2696478.88	471702.91	2696448.44	69.00
TER-5	471743.01	2696499.82	471680.18	2696471.06	69.00
TER-6	471697.26	2696482.49	471718.34	2696441.50	46.00
TER-7	471731.36	2696498.59	471758.88	2696461.69	46.00
				TOTAL (ML):	414.00

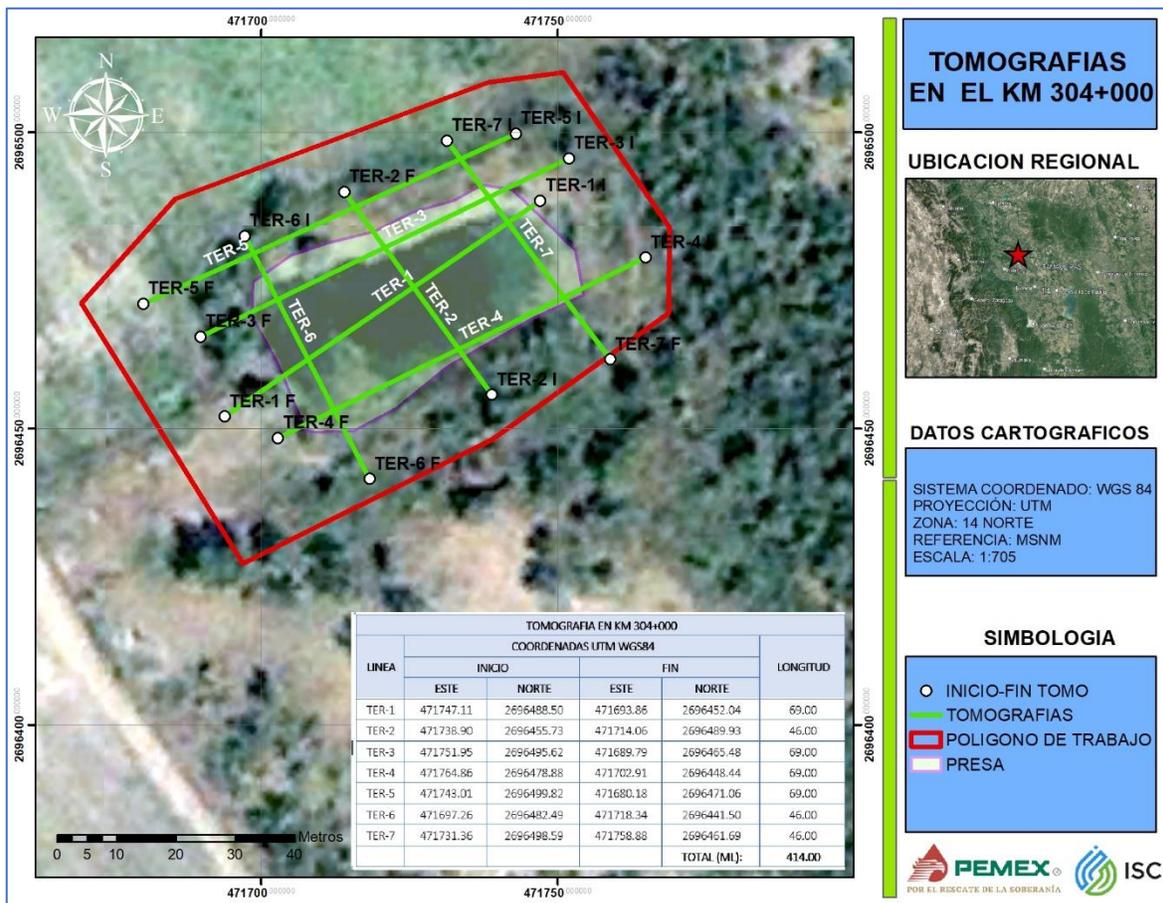


Figura 14. Distribución de las líneas de tomografía en el km 304+000

Para obtener una buena calidad de datos en los métodos indirectos es importante considerar los sitios “limpios” o alejados de la zona de contaminación, con la finalidad de determinar la resistividad real de suelo y de esta manera identificar con mayor certeza las zonas anómalas que pudieran relacionarse con la presencia de contaminante. Para determinar la resistividad natural del suelo se ejecutó la tomografía TER-5 (Figura 15), misma que nos sirve como calibración en este sitio. Esta línea tiene una longitud de 69.00 metros y una profundidad aproximada de investigación de 11.90 metros, registrando un rango resistivo de 13.1 hasta 204 Ohm*m relacionándolo con la presencia de materiales como arcilla y limo, los cuales se encuentran únicamente en los primeros 0.75 metros de profundidad en promedio, teniendo un rango de resistividad que va de los 13 a los 40 Ohm*m aproximadamente, por otro lado también se registran valores que se asocian a la presencia de lutitas, mismas que se encuentran por debajo de la capa de limos y arcillas, cabe mencionar que en algunas zonas es posible apreciar el afloramiento de las mismas, registrando un rango de resistividad que va de los 40 a los 204 Ohm*m según la escala de resistividades de la TER-5.

Cabe mencionar que el rango resistivo registrado en toda la zona de estudio va de los 13.00 a los 583.00 Ohm*m. Las resistividades más bajas se registran en la zona somera, también las lutitas registran valores relativamente bajos (40 Ohm*m) ya que es muy probable que se encuentren con presencia de humedad.

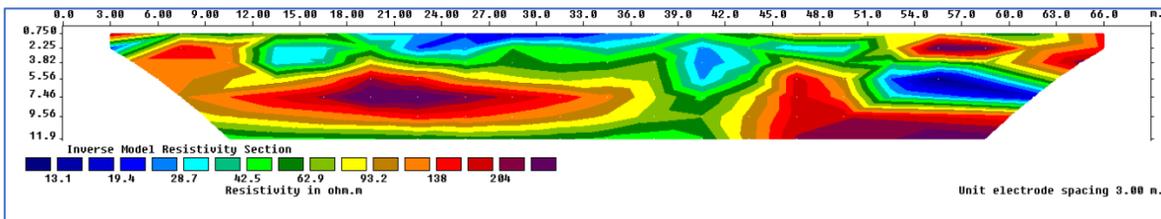


Figura 15. TER-5 del km 304+000

Como resultado del análisis de la información geoelectrica obtenida se registró un rango de resistividad donde podemos determinar la presencia de suelo impactado con hidrocarburo, mismo que se identificó en campo por medio de análisis organoléptico (observación en cambios de coloración en roca y suelo, olor en la zona de estudio y acumulaciones de hidrocarburo en el sitio en general, mismo que se encuentra bien delimitado).

De acuerdo con lo anterior es posible decir que el registro de resistividad del suelo contaminado se encuentra en un rango que va de los 18.00 hasta los 50.00 Ohm*m, esto se puede decir ya que las

resistividades de los suelos son modificadas al tener contacto con algún otro material, que en este caso es un hidrocarburo, mismo que actúa alterando la resistividad tanto del suelo como de la roca, por tal situación es que el rango resistivo de los materiales impactados tiene valores tanto de arcillas y limos como de la propia roca, para identificar el suelo que se encuentra posiblemente impactado, podemos verlo en las imágenes de tomografía dentro de la escala de colores en tonos azules y verde, este comportamiento resistivo se observa en la parte central de las imágenes de tomografía, mismas que se ejecutaron dentro de la presa.

En el caso de la TER-1 se registró el rango resistivo en el cual se determina pertenece al suelo impactado (19.00 a 50.00 Ohm*m), mismo que se encuentra entre los 10.50 y 58.50 metros de acuerdo con la escala horizontal de la imagen, es posible relacionar esto basado en los resultados, así como en las observaciones realizadas en campo, ya que el contaminante es visible en toda la zona y que de acuerdo con la imagen estos valores “anómalos” llegan a una profundidad aproximada de 3.82 metros en promedio, sin embargo, podemos observar que en la zona Suroeste de la presa se registran valores similares a los de la zona impactada, aunque por otro lado podría tratarse un estrato saturado con agua, por lo cual se propone realizar 4 puntos de muestreo con base a estos resultados y con la finalidad de definir si se trata de contaminante o bien otro tipo de material, así como una profundidad máxima de muestreo de 10.00 metros, ya que dichos valores se logran observar hasta los 9.54 metros de profundidad.

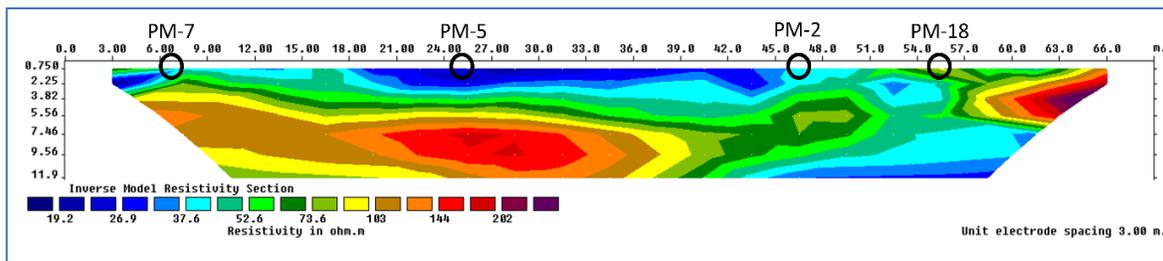


Figura 16. TER-1 del km 304+000

Para el caso de la TER-2 se observa una gran similitud con la TER-1, ya que se registró una primera capa la cual guarda una resistividad que indica la posible presencia de contaminante, aunque en este caso el rango resistivo se encuentra en la escala colorimétrica que va desde el azul hasta el color verde claro, esta misma zona se correlaciona directamente con la línea anterior ya que como se mencionó se cruzan en el centro, cabe mencionar que de igual manera se identifica una zona posiblemente saturada, la cual se encuentra fuera del área de la presa, encontrándola a partir de los

33.00 metros y a una profundidad inicial de 3.70 y con limite a los 6.37 metros, se propone realizar perforaciones en los metros 9.00 y 30.00 ubicados de acuerdo con la escala horizontal.

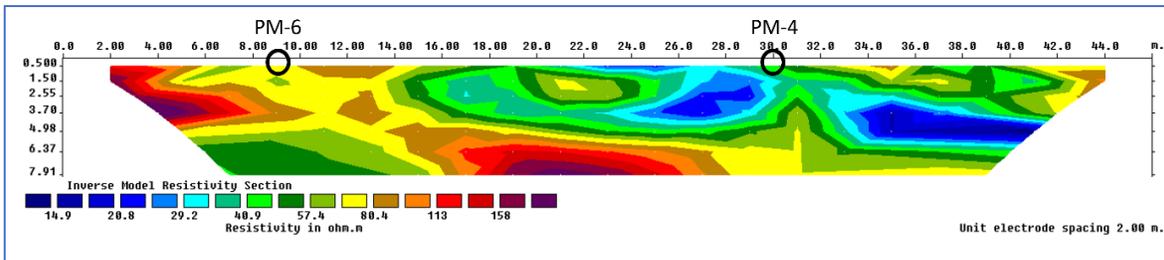


Figura 17. TER-2 del km 304+000

Por ultimo en la TER-3 se registraron valores de resistividad que de igual manera se asocian a la presencia de contaminantes, estos valores se encuentran desde la capa superficial y se registro en un rango de resistividad que va de los 18.00 a los 48.00 Ohm*m donde se propone realizar 3 puntos de muestreo, el primer punto se propone a los 3.00, el segundo a 34.50 y el tercero a 54.50 esto basado en la escala horizontal de la tomografía, proponiendo realizar la toma de muestra hasta una profundidad maxima de 10.00 metros ya que como se menciona anteriormente el contaminante tiende a modificar las propiedades resistivas de los materiales y es importante identificar las zonas que presentan valores que pudieran estar asociados a la presencia de materiales contaminados.

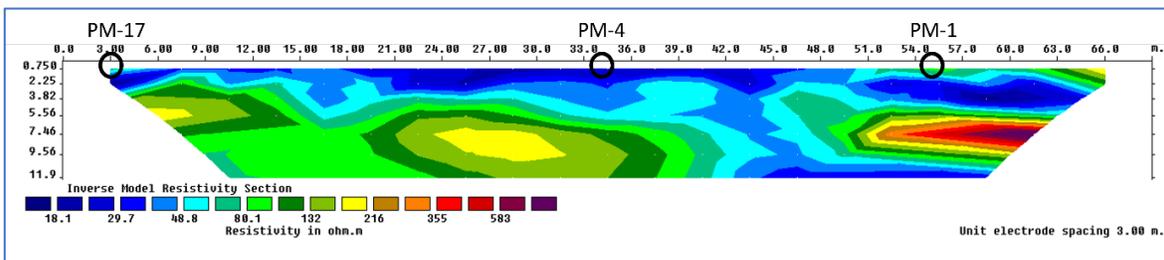


Figura 18. TER-3 del km 304+000

8.7 Georradar

Se trata de una técnica no destructiva que proporciona una imagen del subsuelo midiendo las diferencias en las propiedades electromagnéticas de los materiales, basado en la emisión de ondas de corta duración y en la reflexión de dichas ondas en el medio. En los últimos quince años ha ido en aumento la aplicación esta metodología debido a que estas técnicas muestran las zonas

preferentes de migración del contaminante y en combinación con la información geológica, e hidrogeológica del sitio permiten delimitar las plumas de contaminación y estimar su posible influencia en el medio. El resultado es la generación de una imagen del subsuelo con alta resolución vertical y lateral que permite estudiar el entono con base en la estratigrafía, permitiendo clasificar el sustrato, visualizar discontinuidades, estructuras geológicas, objetos enterrados, etc.

El equipo empleado es un Georadar Quantum Imager Triple Frequency Stepped Pulse System Radar Inc., compuesto por una unidad central la cual, a través un software instalado en una computadora portátil, que además sirve para guardar la información y visualizarla en tiempo real. Dentro del procesador integrado se pueden realizar las necesarias para mejorar la resolución, aplicación de filtros, ajustes de las constantes dieléctricas, etc.

El equipo cuenta con una antena direccional mono estática blindada de 100, 250 y 500 MHz, las cuales se ajustan automáticamente generando impulsos que son enviados hacia el interior del subsuelo y a su vez recibe la energía reflejada la cual es procesada y enviada al monitor. Conectado a la antena se encuentra el odómetro, el cual registra la longitud exacta de los distintos radargramas realizados.

La metodología realizada fue la siguiente:

1. Ubicación física del área de trabajo. - Se ubican los inicios y finales de las líneas según lo planteado previamente librando los impedimentos físicos para la correcta circulación del equipo.
2. Instalación física del equipo. - Posterior a la ubicación, se realiza la calibración de los parámetros, ajustando con base a la profundidad de estudio prospectivo y calidad de los perfiles. Estos parámetros son los que definen el número de canales utilizados, la unidad mínima de registro, cantidad de pulsos electromagnéticos, la constante dieléctrica, filtros de ajuste de la señal recibida, etc. La georreferenciación de los puntos de inicio y final se tomaron en cuenta para garantizar la precisión geométricas y posición de los perfiles de Georadar.
3. Levantamiento de datos. - La aplicación de esta metodología en campo requiere el desplazamiento del equipo sobre el área de interés. La adquisición de datos se realiza de manera puntual, pero debido a que se encuentra en desplazamiento se genera un perfil continuo, midiendo el tiempo que emplea a onda emitida en ser reflejada.
4. Procesamiento de información. - La información generada es guardada de manera automática en el equipo para su posterior análisis y procesado. En función del objetivo deseado y de la calidad de los registros será requerido un mayor o menor procesamiento de

los datos en bruto, ya que puede presentar variaciones aleatorias a la señal recibida. Los procesos de filtrado se aplican para eliminar el ruido de fondo de las señales.

El estudio detallado de los Radargramas resultantes permite visualizar el comportamiento electromagnético del subsuelo, identificando las discordias de las secuencias de reflexión, zonas de alteraciones que indican cambios de estratos, con el objetivo de elaborar mapas horizontales de la amplitud de las reflexiones generadas.

Con la finalidad de reforzar la información obtenida por medio de las tomografías de resistividad eléctrica, se llevaron a cabo estudios electromagnéticos por medio del georadar, se realizaron un total de 13 recorridos, generando un volumen de trabajo de 405.55 metros lineales y siendo estos ejecutados principalmente con orientación de Norte a Sur y de Oeste a Este, los recorridos con georadar fueron ubicados de manera estratégica con la finalidad de cubrir la mayor área posible.

FOTOGRAFIA DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP



Figura 19. Levantamiento con georadar

Tabla 3. Geoposicionamiento y longitud de radargramas

LINEA	COORDENADAS UTM WGS84				LONGITUD
	INICIO		FIN		
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	
RD-1	471743.27	2696485.22	471720.46	2696474.10	25.38
RD-2	471744.97	2696479.49	471717.09	2696465.22	31.33
RD-3	471747.74	2696474.75	471719.63	2696460.29	31.61
RD-4	471740.24	2696485.57	471745.51	2696470.22	16.23
RD-5	471732.09	2696481.70	471737.24	2696466.38	16.17
RD-6	471725.12	2696477.13	471730.20	2696463.09	14.93
RD-7	471720.89	2696476.52	471723.66	2696459.47	17.26
RD-8	471738.58	2696485.78	471701.77	2696470.72	39.78
RD-9	471699.87	2696471.72	471711.85	2696449.51	25.23
RD-10	471684.22	2696472.71	471703.44	2696438.77	39.01
RD-11	471761.36	2696471.83	471705.95	2696441.34	63.25
RD-12	471739.80	2696503.29	471687.04	2696475.93	60.69
RD-13	471749.36	2696496.29	471761.59	2696475.81	24.69
				TOTAL (ML):	405.55

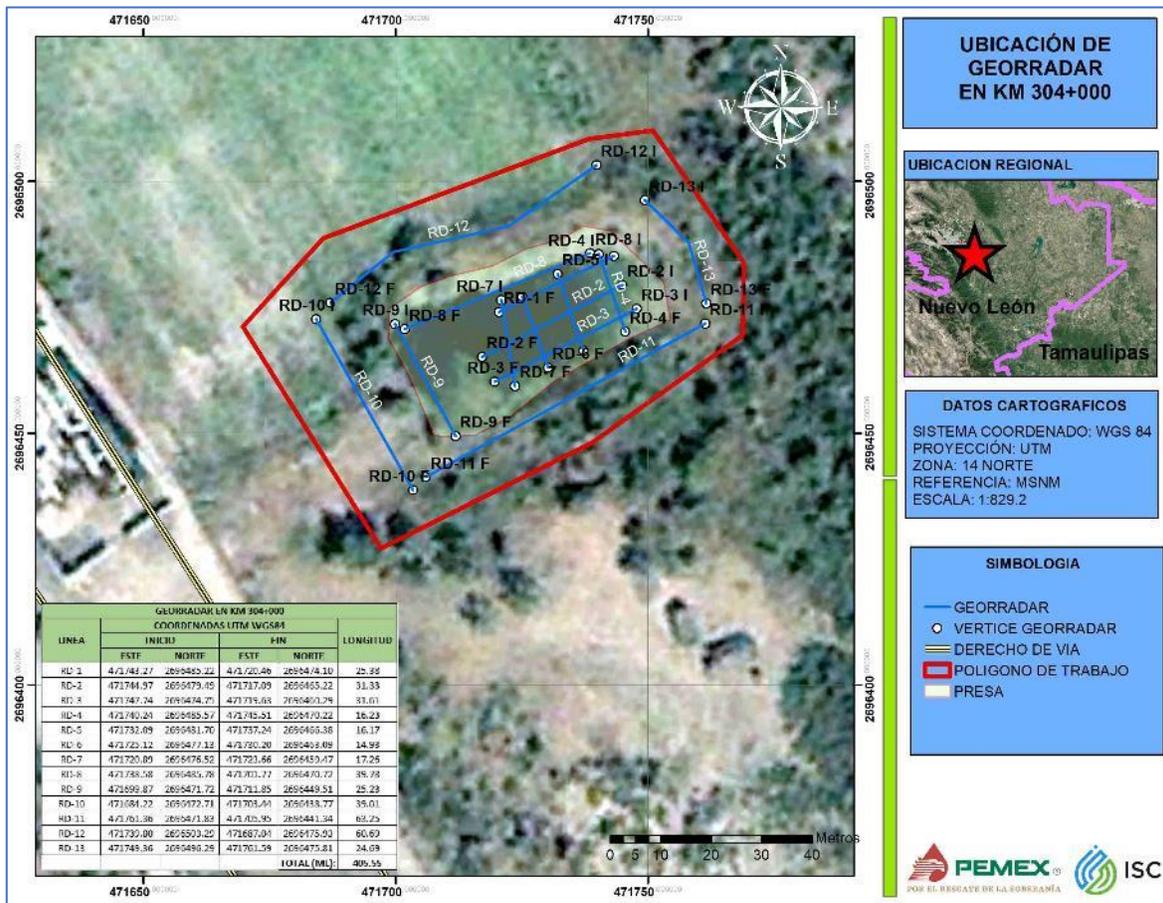


Figura 20. Distribución de radargramas en el área del pasivo ambiental del km 304+000

En general se logró identificar en los radargramas la zona con presencia de humedad preferentemente a partir de los 1.80 m de profundidad, en la zona Oeste de la presa donde se observan reflejos de onda representativos de presencia de humedad, de igual manera en los radargramas se logró identificar la primera capa de lutitas impactadas, las cuales están directamente asociadas a las características del sitio.

Cabe mencionar que las anomalías registradas en las tomografías llegan hasta los 6.00 m aproximadamente, sin embargo, en el caso de los radargramas no es posible definir con exactitud alguna anomalía, por otro lado, si se logra definir un límite somero de contaminación en las lutitas el cual preferentemente llega hasta los 0.80 m aproximadamente.

En el caso del RD-1 podemos observar lo que se mencionó anteriormente sobre las lutitas, así como la capa de contaminación superficial únicamente que en este caso se observa aproximadamente un espesor de 0.50 m, en este radargrama no se logra detectar la presencia de la zona saturada. Es importante comentar que para el caso de la contaminación por debajo de la capa superficial, profundidades mayores al 0.50 m, no es posible lograr su detección con esta técnica indirecta, ya que las concentraciones del hidrocarburo disminuyen conforme aumenta la profundidad, llegando a ser adherido a las partículas del subsuelo e integrándose como parte de este.

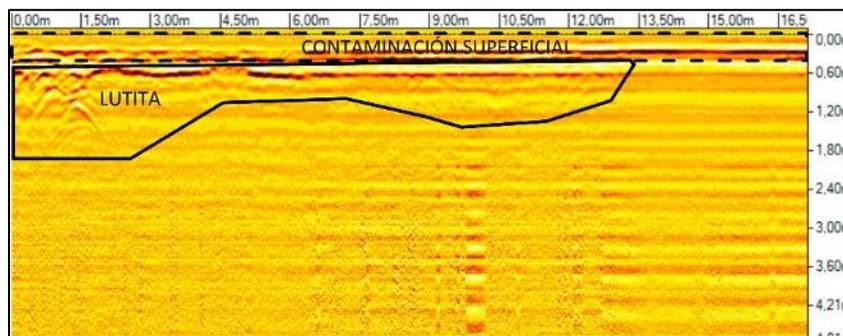


Figura 21. Radargrama 1 del km 304+000.

A diferencia con en el RD-1, en el caso del RD-2 podemos observar la zona con presencia de humedad a partir de los 1.80 metros de profundidad, comenzando en los 20.00 m de longitud del radargrama hasta el final del registro, sin embargo no es constante, no son acumulaciones de agua y no representan un sistema geohidrológico considerable. Al igual que en el RD-1 se logra observar la anomalía generada por la lutita con presencia de hidrocarburo. La mayor concentración de contaminación se encuentra en la parte superficial, llegando hasta una profundidad aproximada 0.80

metros esto de acuerdo con el registro, esto tratándose principalmente del hidrocarburo en su fracción pesada que es lo que se logra observar en superficie.

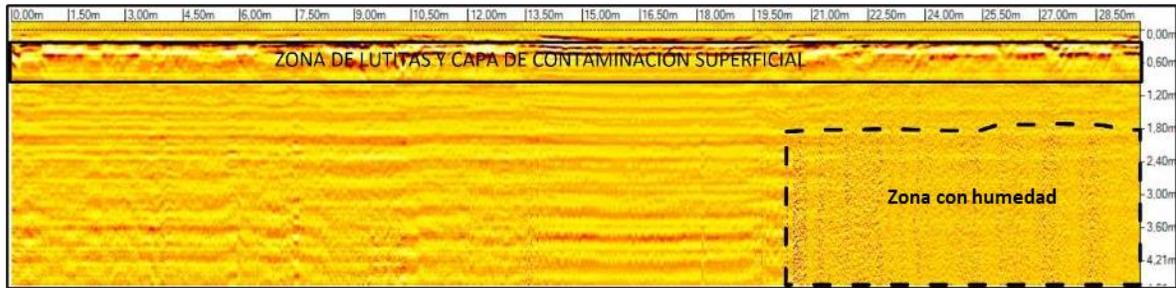


Figura 22. Radargrama 2 km 304+000.

En el RD-3 se logran observar únicamente rasgos de la zona de lutitas y de la capa de contaminación que se ha mencionado anteriormente.



Figura 23. Radargrama 3 km 304+000.

9 Plan de Muestreo

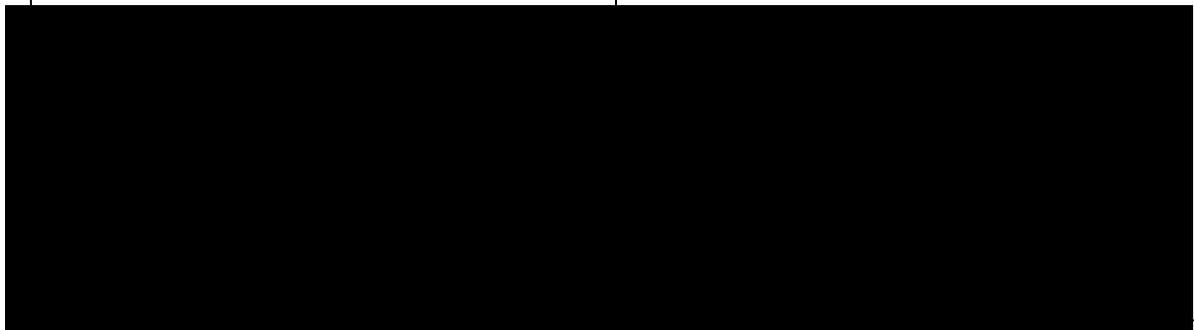
Con base en los resultados anteriormente presentados y con la finalidad de dar cumplimiento a la norma “NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.”, se propuso y ejecutó un muestreo dirigido, el cual con base en el numeral 4.11 de la presente norma lo define como el muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados cuando se cuenta con información previa del sitio o es evidente la extensión de la afectación, que para este

caso se cumplen los dos puntos ya que se cuenta con una primera aproximación por los resultados de los métodos geofísicos, además de que era evidente la afectación generada.

Nombre del documento	Plan de muestreo para la Atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo en atención a toma clandestina en el OLD 24" Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000
Responsable técnico de muestreo	Laboratorios y Suministros Ambientales Industriales S. A. de C.V.(LABSA)
Lugar de desarrollo del plan de muestreo	Ejido el Carrizo, en el municipio de Hidalgo, Tamaulipas
Fecha de ejecución	Del 18 al 24 de abril de 2023
Supervisión PEMEX	Ing. Luis Fernando Gallegos Hernández

Responsables de la elaboración del Plan de Muestreo

NOMBRE DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP



Bajo esta información se estableció que los parámetros a analizar de las muestras durante la ejecución del plan de muestreo fueron las Fracciones Pesada, Media y Ligera, así como los Hidrocarburos Específicos BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos) y HAP's (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), esta definición se da con base a lo establecido en la “*Tabla 1. Hidrocarburos que deberán analizarse en función de producto contaminante*” de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (*Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y especificaciones para la remediación*).

De acuerdo con la “Tabla 4. Número mínimo de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada” establecida en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, tomando en cuenta que el área superficial establecida fue de 0.5 ha, indica que la cantidad de puntos a muestrear es de 15, sin embargo, para este caso en particular se perforaron 18 puntos de muestreo obteniendo con esto 81 muestras de suelo las cuales incluyen sus duplicados a cada 10 muestras. Los puntos de muestreo se perforaron de acuerdo con la siguiente distribución:

- PM-10 y PM-12 se encuentran referenciadas con la tomografía TER-5, la cual fue instalada por afuera de la presa que considera la zona contaminada, con la finalidad de confirmar que dicha zona está libre de contaminantes y con esto corroborar el buen funcionamiento del modelo geoelectrico presentado. Al igual que los puntos anteriores, el PM-18, PM-15, PM-16 y PM-17 fueron establecidos sobre las tomografías en aquellos puntos iniciales o finales de las líneas, debido a que este tipo de estudios indirectos presenta un vacío de información en los extremos y se designan estos puntos para confirmar la continuidad de las condiciones del subsuelo.
- Por su parte los puntos PM-11, PM-9, PM-13 y PM-14 no están relacionados a ninguna línea tomográfica, pero fueron establecidos estratégicamente alejados de la zona impactada y de los resultados de los estudios indirectos (gasometrías, georradar y tomografía eléctrica), esperando obtener resultados sin concentraciones lo cual es aprovechado para la modelación de la dispersión del hidrocarburo, fungiendo como límites de las plumas de contaminantes.

El resto de los puntos de muestreo del PM-1 al PM-8 fueron realizados dentro de la presa de desfogue, orientados sobre las 6 tomografías realizadas en el área impactada, acomodados de manera estratégica buscando la distribución vertical del contaminante, más allá de la distribución horizontal la cual era evidente que estaba contenida dentro de la presa. Como se mencionó en el modelo geoelectrico, existen zonas donde la lutita se encuentra en capas someras y otras zonas donde al parecer se presenta a mayores profundidades.

De la mayor parte de los puntos de muestreo realizados se obtuvo la cantidad de 4 muestras en cada punto a las profundidades de 1.0m, 3.5m, 6.5m y 10.0m, solamente en los casos del PM-11 y PM-5

se tomaron muestras a los 8.5m de profundidad, debido a que se identificaron anomalías geoelectricas, que sobre el muestreo se descubrió que solamente eran cambios estratigráficos sobre la columna de suelo.

Tabla 4. Puntos de muestreo propuestos para la Caracterización de la Atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a toma clandestina en el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000”

PUNTO	COORDENADAS UTM WGS84		PROFUNDIDADES DE MUESTREO				
	ESTE	NORTE	1.0M	3.5M	6.5M	8.5M	10.0M
PM-1	471702.83	2696471.67					
PM-2	471708.25	2696461.14					
PM-3	471712.18	2696452.99					
PM-4	471721.41	2696479.81					
PM-5	471726.12	2696473.32					
PM-6	471733.68	2696462.91					
PM-7	471740.97	2696485.71					
PM-8	471748.73	2696475.30					
PM-9	471747.42	2696505.08					
PM-10	471725.28	2696491.70					
PM-11	471688.69	2696483.33					
PM-12	471696.34	2696478.46					
PM-13	471709.49	2696439.40					
PM-14	471736.92	2696453.44					
PM-15	471756.69	2696464.62					
PM-16	471761.67	2696477.31					
PM-17	471749.15	2696494.27					
PM-18	471700.79	2696456.79					

El muestreo se realizó con equipo mecánico Power Probe 9780D, mediante el método de empuje directo, donde se utiliza el hincado de barrenos de doble pared que tiene un diámetro exterior de 2 3/8” y un tubo interior desechable de PVC (liner) de 1 1/2” de diámetro y una longitud de 0.6096m. Además cuenta con un martillo hidráulico de 350p/l de potencia y de alta frecuencia, el cual permite obtener muestras de suelo inalterado cumpliendo con los fines para la recopilación de la muestra para su envío al análisis de laboratorio. Paralelo con los trabajos de perforación, se realizó un registro en tiempo real de cada contacto litológico encontrado a profundidad el cual consiste en una breve descripción del material de la muestra, textura, color, contenido de materia orgánica, etc., así como indicios de contaminación.

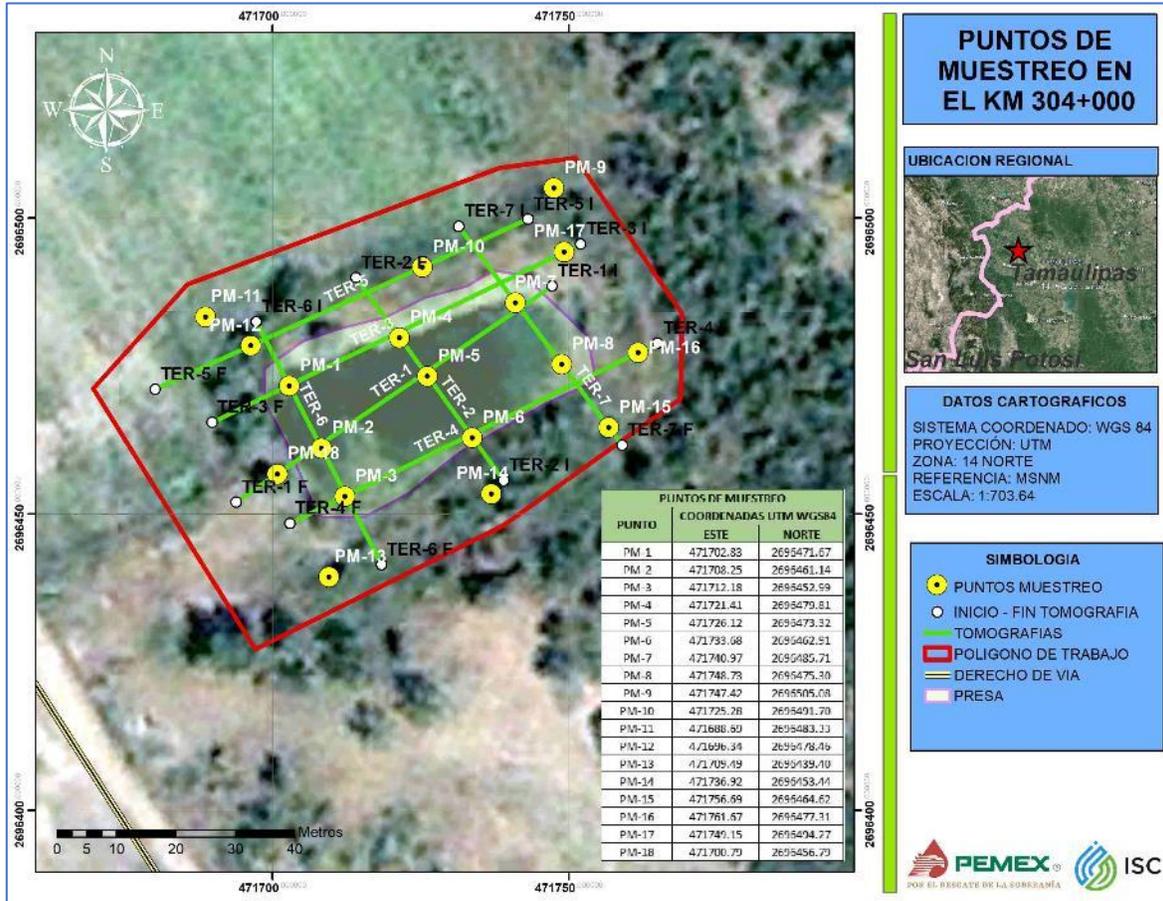


Figura 24. Distribución de puntos de muestreo con base en los resultados de los estudios indirectos del km 304+000.

Esta metodología de muestreo es la más eficiente usada para este tipo de trabajos, ya que mediante este método se reduce al máximo el riesgo de contaminación cruzada, dando como resultado la obtención de muestras, de manera inalteradas y más representativas de las condiciones del sitio de estudio. Como lo establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 en el punto 7.2.7, evitando el uso de fluidos de perforación y la utilización de equipos y recipientes que ocasionen la pérdida de hidrocarburos volátiles y la contaminación cruzada. La secuencia para la toma de muestras hasta una profundidad de 10 metros fue la siguiente:

1. Ubicación de puntos de acuerdo con el plan de muestreo, utilizando un equipo de Estación GPS RTK marca CHCNAV.
2. Una vez ubicados los puntos mediante el equipo Medidor de Conductividad Electromagnética Multiprofundidad (CMD), se realizó un reconocimiento en las áreas de trabajo en búsqueda de instalaciones subterráneas.

3. Ubicado el equipo de perforación en el punto de trabajo, se realizó su nivelación horizontal en relación con el terreno, así como la nivelación vertical del mástil de la perforadora.
4. Se colocó la zapata de la perforadora junto con el tubo exterior de 0.6096m, el cual en su interior se encuentra el liner de PVC de 1 ½” de diámetro; es en este liner donde se alojó la muestra, cabe señalar que los cartuchos de liner utilizados para la colecta de muestras son libres de contaminantes.
5. Una vez perforados los primeros 0.50 m se procedió a la rectificación del alineado y posición del muestreador.
6. Alineada la tubería se procedió a colocar los aditamentos (los cuales sirven para la protección de cuerdas de tubería) para realizar el hincado de tubería con el martillo hidráulico de alta frecuencia.
7. Cuando se llegó a la profundidad límite con la tubería exterior (1.5 m), se procedió al retiro del liner con el material recuperado, y se realizó la identificación visual para posteriormente realizar un corte a 1.0 m de acuerdo con la profundidad indicada en el plan de muestreo, después se entregó al signatario realizando su sellado, etiquetado, preservado y traslado al laboratorio para su respectivo análisis.
8. Inmediatamente retirada la muestra se introdujo un nuevo cartucho de liner, agregando un tramo de tubería interna y externa de 1.52m de longitud con la cual se perforó hasta 1.80m y así sucesivamente hasta que se llegó a las profundidades máximas señaladas en el Plan de muestreo.
9. Una vez concluidos los objetivos del muestreo en cada punto, se procedió a la extracción de la tubería.
10. Posteriormente se llevó a cabo la limpieza del equipo de muestreo con una brocha o cepillo, la tubería que colectaba la muestra se lavó con agua y detergentes libres de fosfatos (como lo marca la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 en el punto 7.1.16 para su reutilización), entre muestra y muestra.



Figura 25. Secuencia de muestreo para el km 304+000

FOTOGRAFIA DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP

Con la perforación de los 18 pozos, se logró establecer un modelo estratigráfico de la zona donde se localiza el pasivo ambiental del km 304+000, recordando que este sitio es una obra de infraestructura petrolera para contener los residuos derivados de los trabajos realizados en la estación de PEMEX T.R.E.D. Carrizos; de acuerdo a los registros de perforación se encuentra un material de relleno o que fue en algún momento removido a partir de los 0.80m y se encuentra levemente impactado por hidrocarburos ya que su coloración y olor eran característicos de la presencia del contaminante, en la parte superior de esta capa se encuentran 0.80m de material evidentemente contaminado, formando en algunos puntos acumulaciones del hidrocarburo que se podía identificar a simple vista. En la mayoría de los barrenos a partir de los 2.50m comenzaba la presencia de humedad, sin lograr acumulaciones de agua ya que la tubería de perforación no presentó indicios de estar en un manto o zona saturada. En la parte oeste de la presa se logra identificar un afloramiento de lutitas, el cual no es constante en toda la zona, se puede establecer que en la mayor parte de la presa de desfogue la lutita comienza de manera uniforme a partir de los

3.0m de profundidad, algunas de las muestras obtenidas a esta profundidad presentaron un embarramiento de hidrocarburo.



Figura 26. Columna estratigráfica construida partir de los registros de perforación del km 304+000

Una vez recuperada la muestra, se entregó al signatario por parte del laboratorio, tanto el signatario y el laboratorio se encontraban acreditados por la EMA y aprobados por ASEA. El signatario fue el encargado de la preservación de la muestra hasta las instalaciones de laboratorio para su posterior análisis, en este caso el medio de preservación fue mantenerlas a una temperatura de 4 °C en hielo las cuales fueron analizadas antes de cumplir el tiempo máximo de conservación (14 días), como lo establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Tabla 5. Recipientes para las muestras, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	TEMPERATURA DE PRESERVACIÓN (°C)	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN (DÍAS)
Hidrocarburos Fracción Ligera	Cartucho con contratapa o sello de PTFE, que se asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4	14
BTEX		4	14
Hidrocarburos Fracción Media	Frasco de vidrio con boca ancha, con contratapa o sello de PTFE, o cartucho	4	14

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	TEMPERATURA DE PRESERVACIÓN (°C)	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN (DÍAS)
Hidrocarburos Fracción Pesada HAP	con sello que asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4	14
		4	14

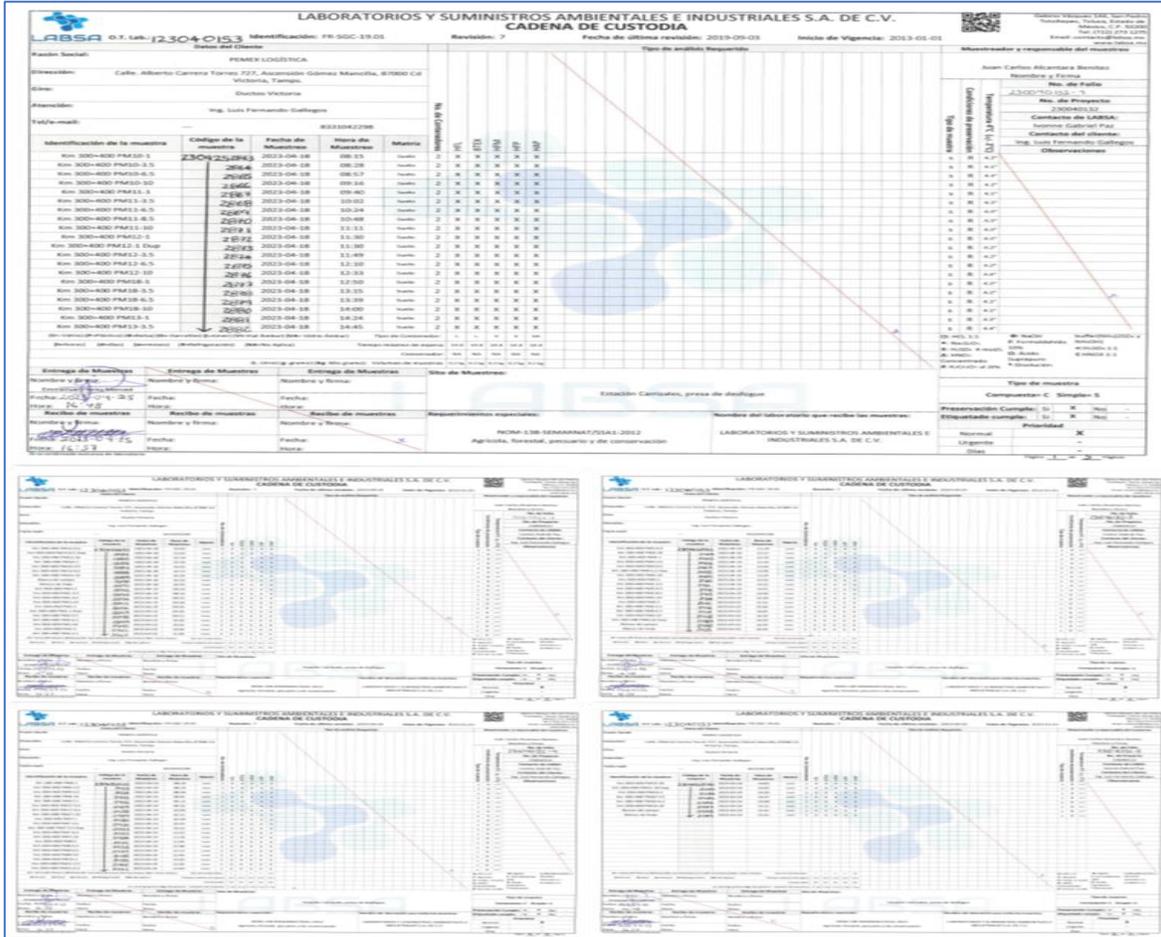


Figura 27. Cadenas de custodia para la toma de muestra del km 304+000

10 Resultados analíticos

El propósito del análisis de suelo es determinar la distribución horizontal y vertical de los potenciales contaminantes en área de estudio. El diseño del muestreo fue basado en los resultados de la exploración geofísica dentro y fuera del área estudiada, fue recomendado para definir con precisión zonas críticas y de esa manera garantizar y cubrir en su totalidad el área afectada, la cual brinda mayor exactitud a las estimaciones de volumetría del suelo impactado. Como se ha mencionado, las muestras colectadas en la ejecución de los planes de muestreo fueron enviadas al laboratorio LABSA S.A. de C.V. el cual cuenta con la acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) así como la aprobación por parte de la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA). Se establecen como objetivos, la cuantificación de las fracciones: Ligera, Media, Pesada, BTEX y HAP's dando un total de 81 análisis.

Método EPA usado, de acuerdo con la normatividad aplicable para hidrocarburos NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012:

Tabla 6. Métodos analíticos para hidrocarburos

PRUEBA	NORMATIVIDAD	TECNICA	RESUMEN DEL METODO
Hidrocarburos fracción ligera	NMX-AA-105-SCFI-2014	ESPECTOMETRIA DE MASAS	El análisis de Hidrocarburos Fracción Ligera cubre el intervalo de átomos de carbono de C5 a C10, en su mayoría compuestos volátiles
Hidrocarburos fracción media	NMX-AA-145-SCFI-2008	CROMATOGRAFIA DE GASES (FID)	Hidrocarburos Fracción Media cuyas moléculas cubran el intervalo de número de átomos de carbono de C10 a C28.
Hidrocarburos fracción pesada	NMX-AA-134-SCFI-2006	GRAVIMETRIA	Se evalúa una porción de muestra por separado para calcular el porcentaje de sólidos y el peso de la fracción seca es utilizado para calcular la concentración de HFP en peso seco.
HAPS	NMX-AA-146-SCFI-2008	ESPECTOMETRIA DE MASAS	El método describe el análisis para determinar la concentración de hidrocarburos Aromático-policíclicos (HAP) en extractos preparados a partir de muestras de suelo
BTEX	NMX-AA-141-SCFI-2014	ESPECTOMETRIA DE MASAS	El método de concentraciones bajas de BTEX en suelos es aplicable al intervalo de 0,5 µg/kg a 200 µg/kg.

De igual manera se emplean la “TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo” y la “TABLA 3.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo” presentes en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, con la finalidad de clasificar adecuadamente los resultados de las concentraciones analizadas de las muestras de suelo, tomando en cuenta que el uso de suelo para este pasivo en particular es de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación.

Tabla 7. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO	
	Agrícola, pecuario y conservación	forestal y de	Residencial y recreativo		Industrial y comercial
Ligera	200		200	500	NMX-AA-105-SCFI-2008
Media	1 200		1 200	5 000	NMX-AA-145-SCFI-2008
Pesada	3 000		3 000	6 000	NMX-AA-134-SCFI-2006

Tabla 8. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial	
Benceno	6	6	15	NMX-AA-141-SCFI-2007
Tolueno	40	40	100	NMX-AA-141-SCFI-2007
Etilbenceno	10	10	25	NMX-AA-141-SCFI-2007
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	NMX-AA-141-SCFI-2007
Benzo[a]pireno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Dibenzo[a,h]antraceno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[a]antraceno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[b]fluoranteno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[k]fluoranteno	8	8	80	NMX-AA-146-SCFI-2008
Indeno (1,2,3-cd)pireno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008

Una vez recibidos los informes de resultados de los análisis de las muestras colectadas, se procedió a generar una tabla con el concentrado de los resultados emitidos por el laboratorio LABSA S.A. de C.V., en los informes emitidos por el laboratorio se clasifican las concentraciones obtenidas con base en los límites máximos permisibles de las tablas anteriores, clasificando con la leyenda de “cumple” cuando el resultado de la concentración de hidrocarburos en el suelo está por debajo del límite máximo permisible, en caso de que la concentración de la muestra exceda el límite se le clasifica como “no cumple”.




PARÁMETRO(S)	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA(S)				MÉTODO DE REFERENCIA	REALIZADO
	Km 304+000 PM1-1	I (±)	Cumplimiento	L.M.P.		
	Código de la muestra: 2304252892					
HFP (mg/Kg)	3,254.850	243.463	NO CUMPLE	3,000	NMX-AA-134-SCFI-2006	JGM/JMC
HFM (mg/Kg)	2,629.690	378.467	NO CUMPLE	1,200	NMX-AA-145-SCFI-2008	JGM/JMC
HFL (mg/Kg)	1,338.030	131.903	NO CUMPLE	200	NMX-AA-105-SCFI-2008	JGM/JMC
HAP's (Benzo [a] Pireno) (mg/Kg)	1.880	0.200	CUMPLE	2	NMX-AA-146-SCFI-2008	JGM/JMC
HAP's (Dibenzo [a,h] Antraceno) (mg/Kg)	3.910	0.356	NO CUMPLE	2	NMX-AA-146-SCFI-2008	JGM/JMC
HAP's (Benzo [a] Antraceno) (mg/Kg)	3.040	0.326	NO CUMPLE	2	NMX-AA-146-SCFI-2008	JGM/JMC
HAP's (Benzo [b] Fluoranteno) (mg/Kg)	5.740	0.628	NO CUMPLE	2	NMX-AA-146-SCFI-2008	JGM/JMC
HAP's (Benzo [k] Fluoranteno) (mg/Kg)	7.490	0.687	CUMPLE	8	NMX-AA-146-SCFI-2008	JGM/JMC
HAP's (Indeno [1,2,3-cd]Pireno) (mg/Kg)	3.140	0.293	NO CUMPLE	2	NMX-AA-146-SCFI-2008	JGM/JMC
{Benceno} (mg/Kg)	10,370	1.025	NO CUMPLE	6	NMX-AA-141-SCFI-2014	JGM/JMC
{Tolueno} (mg/Kg)	33.930	2.920	CUMPLE	40	NMX-AA-141-SCFI-2014	JGM/JMC
{Etilbenceno} (mg/Kg)	17.870	1.576	NO CUMPLE	10	NMX-AA-141-SCFI-2014	JGM/JMC
{Xilenos} (mg/Kg)	49.780	5.060	NO CUMPLE	40	NMX-AA-141-SCFI-2014	JGM/JMC

Figura 28. Ejemplo de informe de laboratorio con clasificación de las concentraciones para el km 304+000

A continuación, se presentan las tablas de resultados agrupados de acuerdo con el tipo de contaminante, señalando con un color amarillo aquellos resultados que exceden los límites máximos permisibles.

Tabla 9. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Ligera y BTEX para las muestras de suelo del Km 304+000

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Ligera (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)
Km 304+000 PM10-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1Dup	1.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-1	1.00	1,338.03	10.37	33.93	17.87	49.78
Km 304+000 PM1-3.5	3.50	88.49	0.51	7.88	2.42	4.05
Km 304+000 PM1-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-1	1.00	636.29	6.85	32.91	11.10	52.93
Km 304+000 PM2-1.00 Dup	1.00 Dup	1,346.99	11.56	46.76	17.40	47.83
Km 304+000 PM2-3.5	3.50	496.59	4.56	24.80	2.42	13.62
Km 304+000 PM2-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-1	1.00	279.48	10.18	33.40	11.01	44.23
Km 304+000 PM3-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-1	1.00	266.74	6.96	49.74	16.71	50.02
Km 304+000 PM4-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5 Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-1	1.00	554.02	7.07	45.21	12.18	31.33
Km 304+000 PM5-3.5	3.50	188.54	3.25	12.94	6.32	36.25
Km 304+000 PM5-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-1	1.00	444.08	5.19	56.45	16.00	58.06
Km 304+000 PM6-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Ligera (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)
Km 304+000 PM6-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10 Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-1	1.00	473.24	8.23	30.25	14.01	43.68
Km 304+000 PM7-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-3.50 Dup	3.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-1	1.00	361.40	5.17	59.12	9.99	58.71
Km 304+000 PM8-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10 Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND

Tabla 10. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Media y HAP's para las muestras de suelo del Km 304+000

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Media (mg/kg)	Benzo [a] pireno (mg/kg)	Dibenzo [a,h] antraceno (mg/kg)	Benzo [a] antraceno (mg/kg)	Benzo [b] fluoranteno (mg/kg)	Benzo [k] fluoranteno (mg/kg)	Indeno (1,2,3-cd) pireno (mg/kg)
Km 304+000 PM10-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1Dup	1.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Media (mg/kg)	Benzo [a] pireno (mg/kg)	Dibenzo [a,h] antraceno (mg/kg)	Benzo [a] antraceno (mg/kg)	Benzo [b] fluoranteno (mg/kg)	Benzo [k] fluoranteno (mg/kg)	Indeno (1,2,3-cd) pireno (mg/kg)
Km 304+000 PM13-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-1	1.00	2,619.69	1.88	3.91	3.04	5.74	7.49	3.14
Km 304+000 PM1-3.5	3.50	489.17	0.70	0.99	0.31	1.50	2.09	1.16
Km 304+000 PM1-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-1	1.00	2,055.63	2.77	3.44	3.90	3.37	12.16	2.80
Km 304+000 PM2-1Dup	1.00 Dup	1,955.21	4.33	4.43	3.13	4.66	14.65	2.14
Km 304+000 PM2-3.5	3.50	1,103.96	1.29	1.85	2.33	2.64	2.05	1.21
Km 304+000 PM2-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-1	1.00	1,333.04	1.85	4.84	5.63	3.32	10.15	4.59
Km 304+000 PM3-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-1	1.00	1,271.20	4.28	4.71	6.00	3.90	14.65	3.91
Km 304+000 PM4-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-1	1.00	1,876.92	5.04	2.03	2.35	4.37	15.02	2.84
Km 304+000 PM5-3.5	3.50	85.25	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-1	1.00	1,254.70	5.61	2.58	1.85	5.71	13.73	4.78
Km 304+000 PM6-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-1	1.00	1,206.13	5.98	5.34	2.53	3.03	12.60	5.61
Km 304+000 PM7-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-3.5Dup	3.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-1	1.00	1,255.06	2.98	4.76	1.95	1.98	11.67	5.74
Km 304+000 PM8-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Media (mg/kg)	Benzo [a] pireno (mg/kg)	Dibenzo [a,h] antraceno (mg/kg)	Benzo [a] antraceno (mg/kg)	Benzo [b] fluoranteno (mg/kg)	Benzo [k] fluoranteno (mg/kg)	Indeno (1,2,3-cd) pireno (mg/kg)
Km 304+000 PM16-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tabla 11. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Pesada para las muestras de suelo del Km 304+000

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)	PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)
Km 304+000 PM10-1	1.00	ND	Km 304+000 PM4-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM10-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM4-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM10-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM4-6.50 Dup	6.50 Dup	ND
Km 304+000 PM10-10	10.00	ND	Km 304+000 PM4-10	10.00	ND
Km 304+000 PM11-1	1.00	ND	Km 304+000 PM5-1	1.00	4,969.94
Km 304+000 PM11-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM5-3.5	3.50	2,869.14
Km 304+000 PM11-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM5-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM11-8.5	8.50	ND	Km 304+000 PM5-8.5	8.50	ND
Km 304+000 PM11-10	10.00	ND	Km 304+000 PM5-10	10.00	ND
Km 304+000 PM12-1	1.00	ND	Km 304+000 PM6-1	1.00	3,202.78
Km 304+000 PM12-1.00 Dup	1.00 Dup	ND	Km 304+000 PM6-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM12-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM6-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM12-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM6-10	10.00	ND
Km 304+000 PM12-10	10.00	ND	Km 304+000 PM6-10.00 Dup	10.00 Dup	ND
Km 304+000 PM18-1	1.00	ND	Km 304+000 PM9-1	1.00	ND
Km 304+000 PM18-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM9-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM18-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM9-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM18-10	10.00	ND	Km 304+000 PM9-10	10.00	ND
Km 304+000 PM13-1	1.00	ND	Km 304+000 PM17-1	1.00	ND
Km 304+000 PM13-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM17-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM13-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM17-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM13-6.50 Dup	6.50 Dup	ND	Km 304+000 PM17-10	10.00	ND
Km 304+000 PM13-10	10.00	ND	Km 304+000 PM7-1	1.00	3,914.94
Km 304+000 PM14-1	1.00	ND	Km 304+000 PM7-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM14-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM7-3.50 Dup	3.50 Dup	ND
Km 304+000 PM14-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM7-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM14-10	10.00	ND	Km 304+000 PM7-10	10.00	ND
Km 304+000 PM1-1	1.00	3,254.85	Km 304+000 PM8-1	1.00	3,272.30
Km 304+000 PM1-3.5	3.50	1,549.14	Km 304+000 PM8-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM1-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM8-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM1-10	10.00	ND	Km 304+000 PM8-10	10.00	ND
Km 304+000 PM2-1	1.00	5,845.02	Km 304+000 PM15-1	1.00	ND
Km 304+000 PM2-1.00 Dup	1.00 Dup	5,189.49	Km 304+000 PM15-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM2-3.5	3.50	3,455.44	Km 304+000 PM15-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM2-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM15-10	10.00	ND
Km 304+000 PM2-10	10.00	ND	Km 304+000 PM15-10.00 Dup	10.00 Dup	ND
Km 304+000 PM3-1	1.00	3,359.11	Km 304+000 PM16-1	1.00	ND
Km 304+000 PM3-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM16-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM3-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM16-6.5	6.50	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)		PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)
Km 304+000 PM3-10	10.00	ND		Km 304+000 PM16-10	10.00	ND
Km 304+000 PM4-1	1.00	3,434.03				

Una vez conformadas las tablas se les realizó un análisis geoestadístico (Tabla 12) a las concentraciones resultantes, para este análisis únicamente se consideraron aquellas muestras que presentaron algún grado de concentración de hidrocarburos, no importando si este excedía el límite máximo permisible estipulado en la norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Los análisis estadísticos indican:

- Fracción ligera:** La concentración más alta reportada es de 1,346.99 mg/kg y en el caso de la concentración más baja es de 88.49mg/kg. Del total de las 81 muestras obtenidas (incluyen duplicados) en el muestreo dirigido, el 14.81% de éstas presentan alguna concentración de hidrocarburos y el 12.34% mostraron concentraciones que exceden el límite máximo permisible para usos de suelo de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación que es de 200 mg/kg de acuerdo con la TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. La media o valor promedio de las muestras que presentan concentraciones es de 539.49mg/kg con una desviación estándar de 334.56 mg/kg, lo que se traduce en que la mayoría de las concentraciones obtenidas se encuentran entre los 204.93mg/kg y los 874.05mg/kg, es decir la mayor parte de las muestras exceden el límite máximo permisible. En este caso no existen concentraciones “moda” es decir, no se cuenta con 2 o más concentraciones con el mismo valor; en cuanto a la mediana se obtiene en 458.66mg/kg, que es el valor medio en la columna de concentraciones.
- Fracción media:** La concentración más alta reportada es de 2,619.69mg/kg y en el caso de la concentración más baja es de 85.25 mg/kg. Del total de las 81 muestras obtenidas (incluyen duplicados) en el muestreo dirigido, el 14.81% de éstas presentan alguna concentración de hidrocarburos y el 10.09% mostraron concentraciones que exceden el límite máximo permisible para usos de suelo de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación que es de 1,200 mg/kg de acuerdo con la TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. La media o valor promedio de las muestras que presentan concentraciones es de 1,375.50 mg/kg con una desviación estándar de 591.93 mg/kg, lo que se traduce en que la mayoría de las concentraciones obtenidas se encuentran entre los 783.56 mg/kg y los 1,967.43 mg/kg. En este caso no existen concentraciones “moda” es decir, no se cuenta con

2 o más concentraciones con el mismo valor; en cuanto a la mediana se obtiene en 1,263.13 mg/kg, que es el valor medio en la columna de concentraciones, lo cual indica en este caso que las concentraciones son cercanas al límite máximo permisible, más aún cuando la desviación estándar es baja.

- Fracción pesada:** La concentración más alta reportada es de 5,845.02 mg/kg y en el caso de la concentración más baja es de 1,549.14 mg/kg. Del total de las 81 muestras obtenidas (incluyen duplicados) en el muestreo dirigido, el 14.81% de éstas presentan alguna concentración de hidrocarburos y el 12.34% mostraron concentraciones que exceden el límite máximo permisible para usos de suelo de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación que es de 3,000 mg/kg de acuerdo con la TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. La media o valor promedio de las muestras que presentan concentraciones es de 3,693.02 mg/kg con una desviación estándar de 1202.51 mg/kg, lo que se traduce en que la mayoría de las concentraciones obtenidas se encuentran entre los 2,490.51 mg/kg y los 4,895.52 mg/kg. En este caso no existen concentraciones “moda” es decir, no se cuenta con 2 o más concentraciones con el mismo valor; en cuanto a la mediana se obtiene en 3,396.57 mg/kg, que es el valor medio en la columna de concentraciones.

Tabla 12. Valores geoestadísticos de las muestras de suelo analizadas para el km 304+000

Medida	Fracción Ligera	Fracción Media	Fracción Pesada
Concentración alta	1,346.99	2,619.69	5,845.02
Concentración menor	88.49	85.25	1,549.14
Porcentaje de muestras con concentración	14.81%		
Porcentaje de muestras contaminadas	12.34%	10.09%	12.34%
Media	539.49	1,375.50	3,693.02
Moda	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana	458.66	1,263.13	3,396.57
Rango	1258.5	2534.44	4295.88
Varianza	164,992.45	472,054.29	1,333,604.44
Desviación estándar	334.556822	591.933381	1202.506

En general de este análisis estadístico podemos ver que para este sitio en particular la mayor parte de las concentraciones se encuentran en un rango cercano a los límites máximos permisibles de las tres fracciones, situación que facilitará las acciones de remediación de suelos mediante la técnica que se designe con base en la distribución de este.

11 Evaluación de la extensión del contaminante en el suelo

Continuando con el análisis de los resultados de laboratorio del muestreo exploratorio, se llevó a cabo el procesamiento de la información mediante el Software ArcMap 10.3, con el objetivo de representar de una manera gráfica en un mapa georreferenciado, la presencia del contaminante en el área afectada. El procedimiento necesario para obtener los mapas consistió en realizar un análisis cuantitativo ejecutado por el software mediante la herramienta “interpolation” contenida en el “Tool Box”, para el uso de esta herramienta es necesario contar con las coordenadas UTM (X,Y) de cada punto de muestreo de donde se recabe información, ya sea de valores de resistividades, concentraciones de muestras (principalmente) y gasometrías, esto con la finalidad de obtener una georreferencia real. Además de las coordenadas también debemos de contar con los valores “Z” que para este caso serán las concentraciones de los contaminantes mismas que fueron cuantificadas en el análisis realizado por el laboratorio LABSA a las muestras obtenidas en el sitio del pasivo ambiental.

El método de interpolación que fue utilizado es el de “Natural Neighbor” el cual, al igual que todos los métodos de interpolación, parte del principio de obtener información o datos donde haya una ausencia de estos, generados a partir del conocimiento de un conjunto discreto de puntos. Este algoritmo utilizado, encuentra el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre éstas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor. También se conoce como interpolación de Sibson o de “robo de área”. Sus propiedades básicas son que es local, utiliza sólo un subconjunto de muestras que circundan a un punto de consulta y asegura que los datos interpolados estarán dentro del rango de las muestras utilizadas. No infiere tendencias ni produce picos, depresiones, crestas o valles que no estén ya representados por las muestras de entrada. La superficie pasa por las muestras de entrada y es suave en todas partes, excepto en las ubicaciones de las muestras de entrada.

Como resultado de la modelación del contaminante se obtuvieron 2 planos georreferenciados, uno de ellos (Figura 29) representa la dispersión de las fracciones ligera, media y pesada a 1m de profundidad y el otro a 3.5m (Figura 30). De acuerdo con las modelaciones de las dispersiones de las 3 fracciones identificadas mediante los resultados analíticos de las muestras obtenidas en el sitio del pasivo ambiental del km 304+000, podemos observar que tanto para la profundidad de 1.0m como para la de 3.5m la fracción ligera que es representada en color azul, es la que mayor área de contaminación presenta, englobando en su mayoría a las otras dos fracciones (pesada y media). En ambos casos, las dispersiones se pueden ver contenidas dentro de los límites de la presa de

desfogue, sin presentar concentraciones en aquellos muestreos que se encuentran por afuera de la presa e inclusive sobre aquellos cercanos a los taludes.

De manera superficial la pluma contaminante de la fracción pesada que se presenta en color rojo es similar a la de la fracción ligera en cuanto su distribución, la zona donde difieren dichas plumas es en la parte este-noreste donde la fracción ligera se extiende aún más que la pesada. Para el caso de la media es la de menor distribución a 1 m de profundidad, quedando dentro de las otras dos plumas. Para el caso de las dispersiones a 3.5m de profundidad la distribución de la pluma de fracción pesada es la de menor superficie, limitándose a solo la parte oeste-suroeste de la presa, recordando que la fracción pesada presenta una menor movilidad en las capas del subsuelo, ya que presenta una viscosidad que le limita el movimiento.

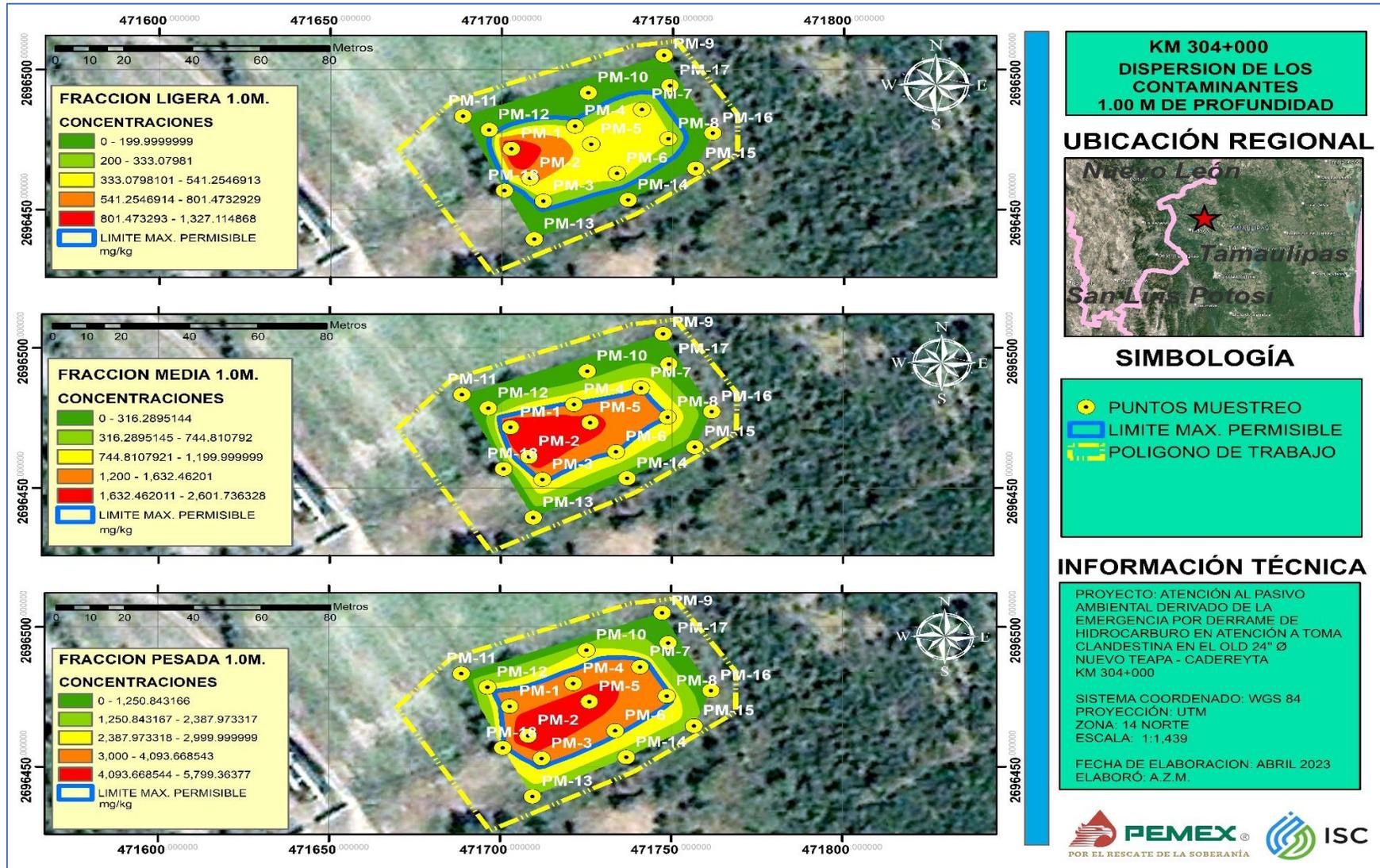


Figura 29. Dispersión de contaminantes a 1m de profundidad en el km 304+000

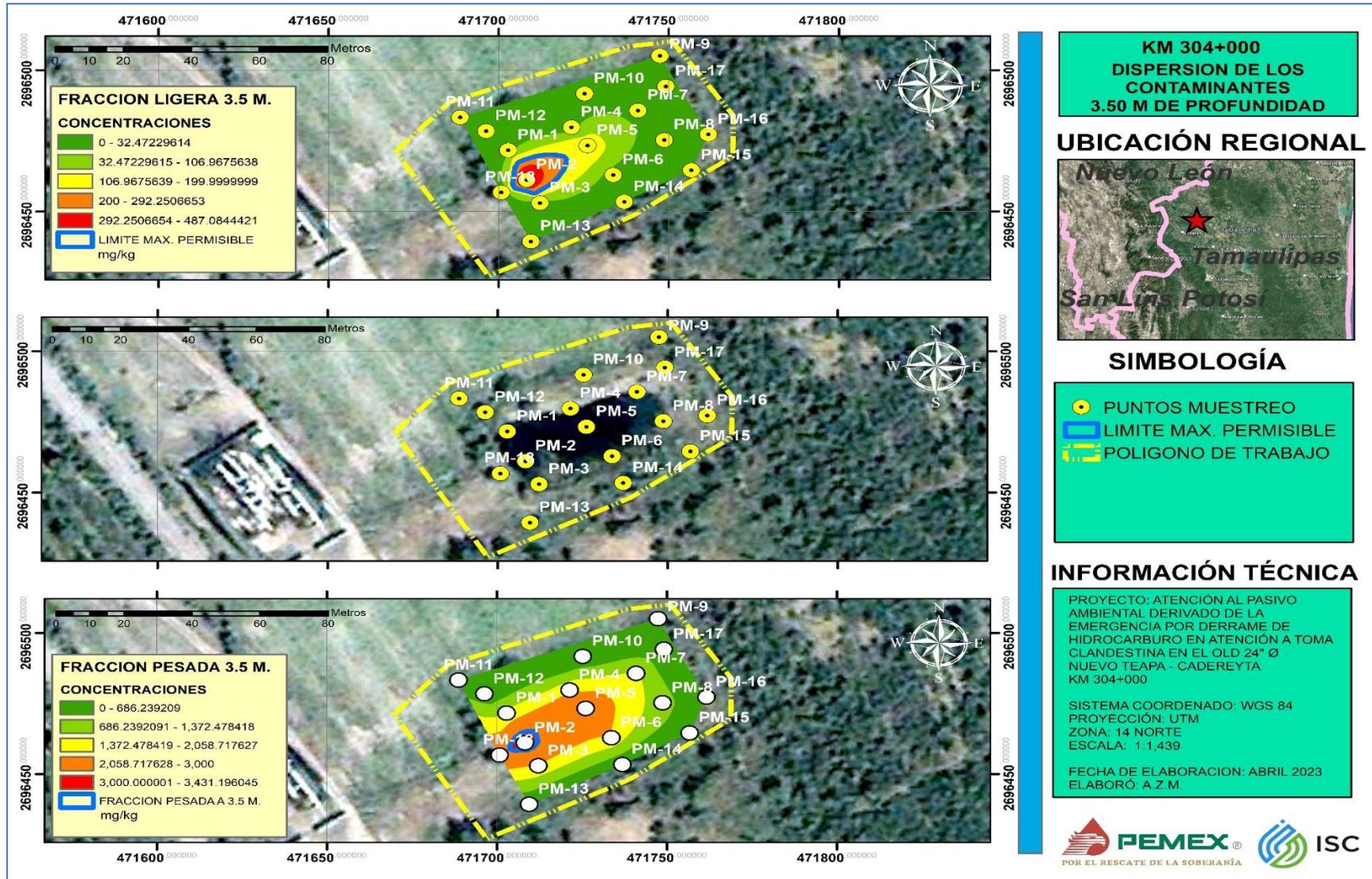


Figura 30. Dispersión de contaminantes a 3.5m de profundidad en el km 304+000

Al encontrar distribuciones diferentes para cada pluma contaminante de hidrocarburos en sus 3 fracciones, se procedió a realizar una operación de álgebra de mapas con la finalidad de obtener una mancha única de contaminación; para esto fue necesario realizar una operación de álgebra de mapas mediante el software ArcMap 10.3, empleando la herramienta "unión de shapes" con campos previamente asignados para la suma de estos y al resultado se le aplicó la "Dissolve" para así obtener un polígono único de contaminantes, que en los planos es representado de color naranja y que toma en cuenta el área de las 3 fracciones como una sola, recordando que el contaminante de mayor distribución es la fracción ligera.

Posteriormente, obtenidas las plumas de dispersión del contaminante, mediante el uso del ArcMap 10.3 y con el uso de la herramienta "Calculate Geometry", se procede a calcular el área de afectación de los contaminantes mediante el software. De igual manera se realizó un cálculo de dispersión de contaminante a los 2m de profundidad para obtener una pluma de contaminante idealizada que nos sirvió para acotar el cálculo del volumen de suelo contaminado. Posteriormente de haber obtenido la dispersión de hidrocarburos a los 2m de profundidad, se realiza el cálculo del área como se mencionó anteriormente para cada polígono generado a una profundidad establecida. Con el conjunto de polígonos a diferentes profundidades fue posible realizar de manera manual el cálculo del volumen aproximado de suelo impactado mediante las siguientes operaciones:

$$V_1 = \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) * h$$

Dónde:

V_1 = Volumen inicial de suelo contaminado

α = Área de la capa superior

β = Área de la capa inferior

h = espesor entre la capa superior y capa inferior

Para el caso del material que se encuentra contaminado por hidrocarburos (principalmente fracción ligera), las dispersiones generadas en el software nos dan como resultado las siguientes áreas:

Tabla 13. Áreas de las capas afectadas por el hidrocarburo

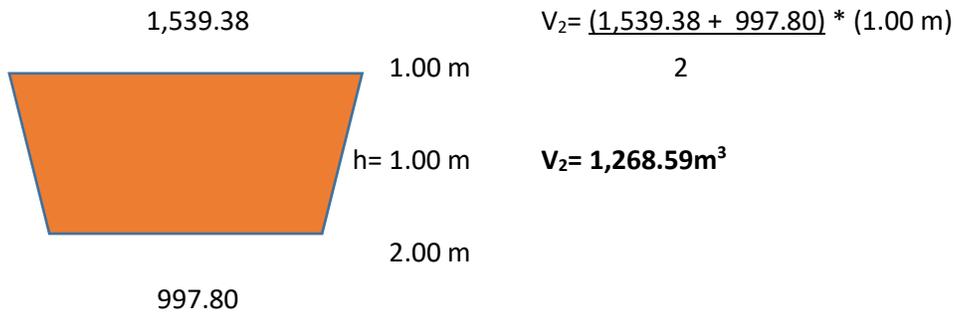
PROFUNDIDAD (M)	ÁREA (m2)
1.00	1,539.38
2.00	997.80
3.50	155.50

- Volumen de 1.00m a 2.00m de profundidad

α = área de la capa superior 1.00m de profundidad = 1,539.38m²

β = Área de la capa inferior 2.00m de profundidad = 997.80 m²

Aplicando la formula mencionada obtenemos que:

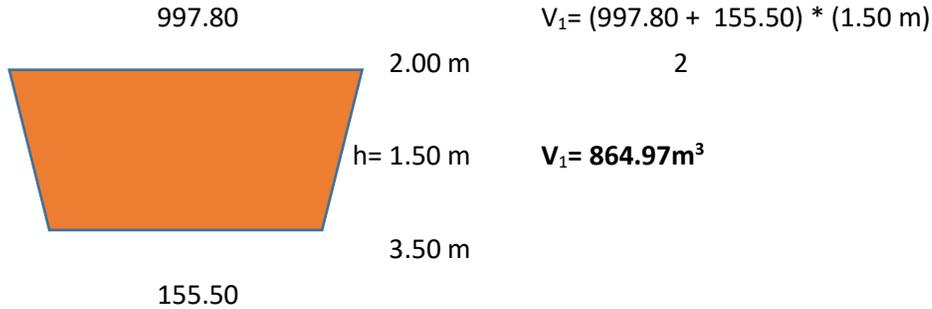


- Volumen de 2.00m a 3.50m de profundidad

α = área de la capa superior 2.00m de profundidad = 997.80m²

β = Área de la capa inferior 3.50m de profundidad = 155.50m²

Aplicando la formula mencionada obtenemos que:



Realizando esta operación estrato por estrato dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 14. Volúmenes de suelo contaminado por hidrocarburo.

Profundidad (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
1.00	1,539.38	1,539.38
2.00	997.8	1,268.59
3.50	155.5	864.98
Volumen total:		3,672.95

El volumen de suelo contaminado con hidrocarburo es de aproximadamente 3,672.95 m³, los cuales se encuentran en su totalidad por afuera del derecho de vía de los ductos de PEMEX. Como lo hemos mencionado, esta contaminación se encuentra contenida en una presa de desfogue que recibía los residuos de las maniobras que aplicaban en la estación de PEMEX T.R.E.D. Carrizos. Donde el contaminante de mayor distribución es la fracción ligera, siendo la capa superficial (1.0m) la que presenta mayor área y volumen de suelo contaminado por hidrocarburos, llegando hasta una profundidad de 3.50m representando el 23.55% del volumen de suelo contaminado a extraer para realizar su remediación.

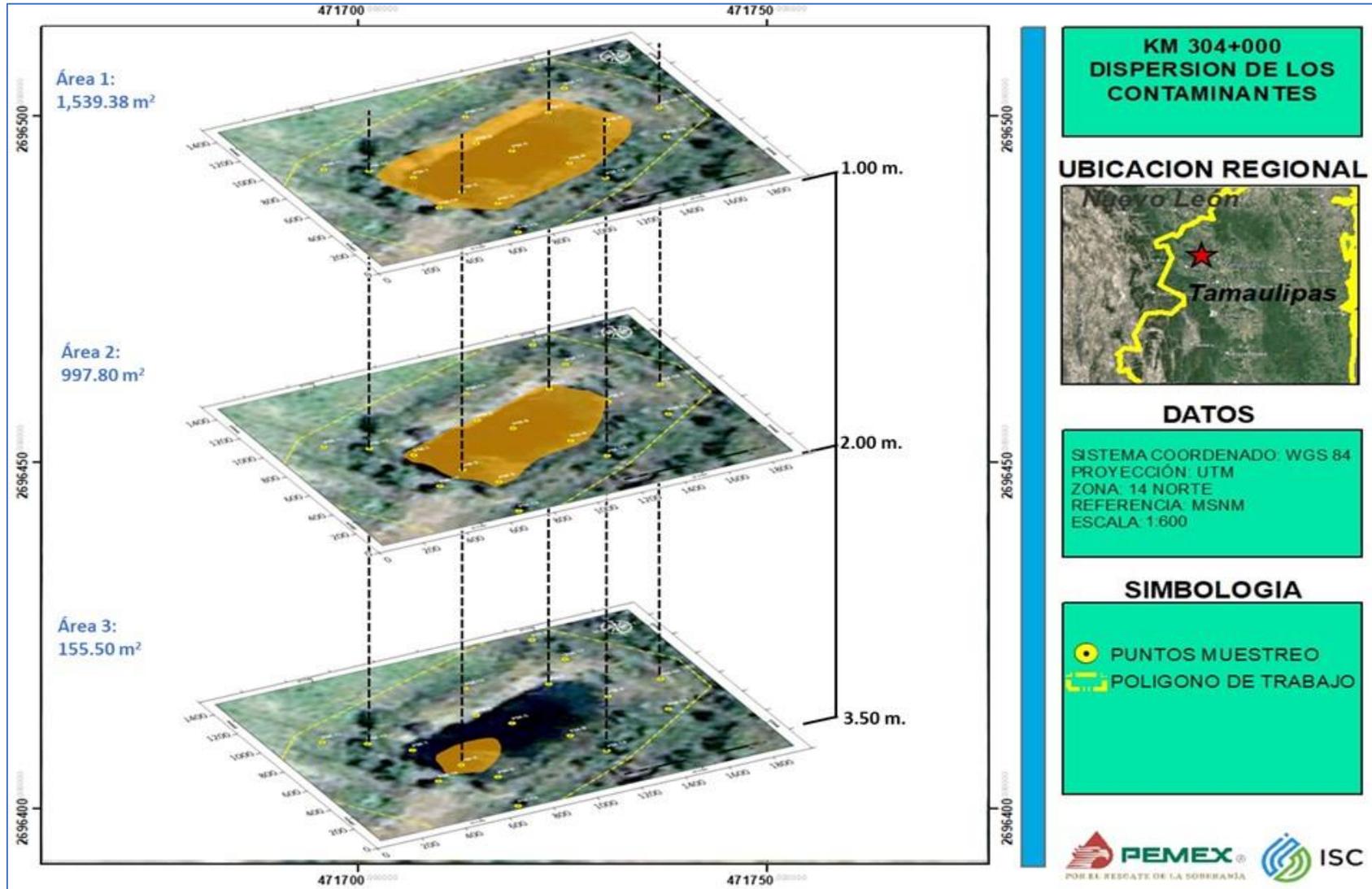


Figura 31. Stack Maps de la pluma contaminante en el km 304+000

12 Actualización del Plan de Restauración de Suelos Contaminados para la atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a toma clandestina en el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000” por la técnica de Biorremediación por Biopilas a un lado del sitio contaminado

La afectación de suelo por hidrocarburos, en el área aledaña del Km. 304+000 del oleoducto de 24" Ø Nuevo Teapa - Cadereyta, se encuentra contenida en una presa que esta identificada como “Carrizo I” en ella se encuentran material producto de las actividades realizadas por Petróleos Mexicanos (PEMEX).

Posteriormente se realizó el estudio de caracterización del sitio para identificar el grado de contaminación por hidrocarburo en el área de la presa y sus colindancias. Dicho estudio concluyó que el volumen de suelo impactado por hidrocarburos cuyas concentraciones superan los valores permisibles establecidos por normatividad ambiental vigente en nuestro país (en este caso es la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, proyectando un volumen aproximado de 3,672.95 m³ de suelo contaminado.

La relativa simplicidad estructural de los microorganismos motiva su extraordinaria capacidad de adaptación a los múltiples microambientes en los distintos hábitats, una propiedad utilizada a lo largo del tiempo por el hombre para gestionar residuos biodegradables y tratar aguas de uso doméstico e industrial. En este sentido la biorremediación se puede definir como una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos, específicamente su capacidad para biodegradar total o parcialmente una amplia gama de compuestos, con el objetivo de limpiar terrenos o aguas contaminadas.

El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa en que, en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células, se van a producir una serie de reacciones de óxido-reducción cuyo fin es la obtención de energía. La cadena la inicia un sustrato orgánico (en este caso los contaminantes son hidrocarburos) que es externo a la célula y que actúa como dador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia. Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio.

De toda la amplia gama de técnicas dirigidas a la limpieza de emplazamientos contaminados, la biorremediación por su interés potencial y carácter multidisciplinario ha recibido una atención

preferente en los últimos años por parte de profesionales de muy diversos campos. La complejidad intrínseca de esta tecnología hace necesaria una aproximación con enfoques diferentes y complementarios, en donde microbiólogos, químicos e ingenieros tienen un papel relevante y necesitan beneficiarse de los conocimientos y experiencia de cada uno de los integrantes del equipo. En lo que respecta a la microbiología del proceso, uno de los resultados más evidentes del esfuerzo investigador en los últimos años, ha sido la descripción de las rutas biodegradativas microbianas, aeróbicas y anaeróbicas, de una amplia variedad de compuestos relevantes desde el punto de vista medioambiental.

En la Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en celda se tiene que planear cuidadosamente los tiempos y movimientos de tierra para asegurar la relación costo efectividad de la tecnología. A lo largo del proceso de remediación, se tienen que monitorear los niveles de contaminantes y los niveles de emisiones para ir optimizando las condiciones de operación del sistema de restauración. El proceso de restauración continúa hasta que se obtengan por debajo de los límites máximos permisibles estipulados en la norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para el uso de suelo del sitio contaminado. Finalmente, para poder dar por concluida la remediación del sitio, para posteriormente realizar el reacomodo del material del lugar donde fue extraído.

12.1 Objetivo

Desarrollar el programa de remediación que permita disminuir las concentraciones de hidrocarburos en el suelo contaminado, hasta llegar por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la Tabla 2 y Tabla 3 de la NOM-138-SEMARNAT/SSA-2012 para uso de suelo agrícola.

12.1.1 *Objetivos específicos*

- Establecer la técnica de remediación adecuada para un volumen de suelo contaminado por hidrocarburos de 3,672.95 m³ en el área aledaña al Km. Km. 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta
- Establecer el programa de obra para el desarrollo de la remediación del suelo contaminado.

12.2 Características del sitio de restauración.

El sitio de estudio corresponde al área aledaña situada en el Km 304+000 del oleoducto de 24" Ø Nuevo Teapa-Cadereyta, tramo Victoria II – Linares. Específicamente en la instalación identificada

como Presa el Carrizo I, la cual está situada a una distancia aproximada de 1.00 km al sur del pueblo de Estación Carrizos, correspondiente al municipio de Hidalgo, estado de Tamaulipas.

La presa del carrizo (lugar donde se ubica el pasivo ambiental) fue construida en el año de 1996 como parte de su infraestructura petrolera temporal, únicamente para contener parte del producto residual proveniente del ducto por acción de la operación denominada “corrida de diablos” en ese mismo año.

Lo anterior con base en la investigación histórica realizada por medio de consultas al personal de mantenimiento de PEMEX Logística anteriormente PEMEX Refinación, Sector Ductos Victoria.

Posteriormente en septiembre de 1997 se realiza una auditoría ambiental al sistema de transportación de hidrocarburos por ducto, donde se define que la presa el Carrizo presenta deficiencias dentro del rubro de suelo y subsuelo. En el 2003 se realizó la licitación para el estudio de “CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y EVALUACIÓN DEL GRADO DE AFECTACIÓN POR DERRAME DE HIDROCARBURO EN PRESA EL CARRIZO I UBICADA EN EL KM 304+000 DEL OLEODUCTO DE 24” MADERO-CADEREYTA, TRAMO VICTORIA II – LINARES”, mismo que fue presentado junto con la Propuesta de Restauración Ambiental ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) quién en esa época era la autoridad quien vigilaba y atendía este tipo de situaciones de carácter ambiental.

Derivado del análisis del estudio, la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, adjunta a la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, bajo la Dirección de Restauración de Sitios Contaminados emitieron en febrero de 2004 la autorización con oficio No. DGGIMAR.710/000238 para realizar los trabajos de restauración del pasivo ambiental.

Hasta el 2022 no se habían realizado acciones en el sitio por situaciones de falta de asignación de presupuesto, así como de los diferentes cambios que se han dado dentro de la estructura de PEMEX (actualmente Logística).

En un análisis de imágenes satelitales del 2001 a la fecha, se puede observar que la presa continua con su labor de contener el material residual ahí depositado, ya que se han desarrollado actividades agropecuarias a su alrededor sin presentar alguna queja o daño por parte de los propietarios, además el crecimiento de vegetación es continuo sin presentar afectaciones a las comunidades forestales como el mezquite.

En el estudio de caracterización realizado en el sitio se definieron las características del sitio, conociendo a detalle las condiciones que imperan en el sitio, mismos que fue corroborado tanto de manera bibliográfica así como con los estudios de geofísica, topografía. Resultado de ello, fue que se pudo establecer un plan de muestreo representativo del sitio y que, mediante el análisis de las

muestras obtenidas, permitió conocer el grado de contaminación que alberga el suelo que se encuentra en el sitio.

Con los resultados de los análisis químicos obtenidos se configuraron las plumas de contaminación y se calcularon las áreas y volúmenes a remediar, mismos que fueron plasmados en planos con coordenadas, para poder ubicar en campo dichas plumas y así realizar su tratamiento más adecuado.

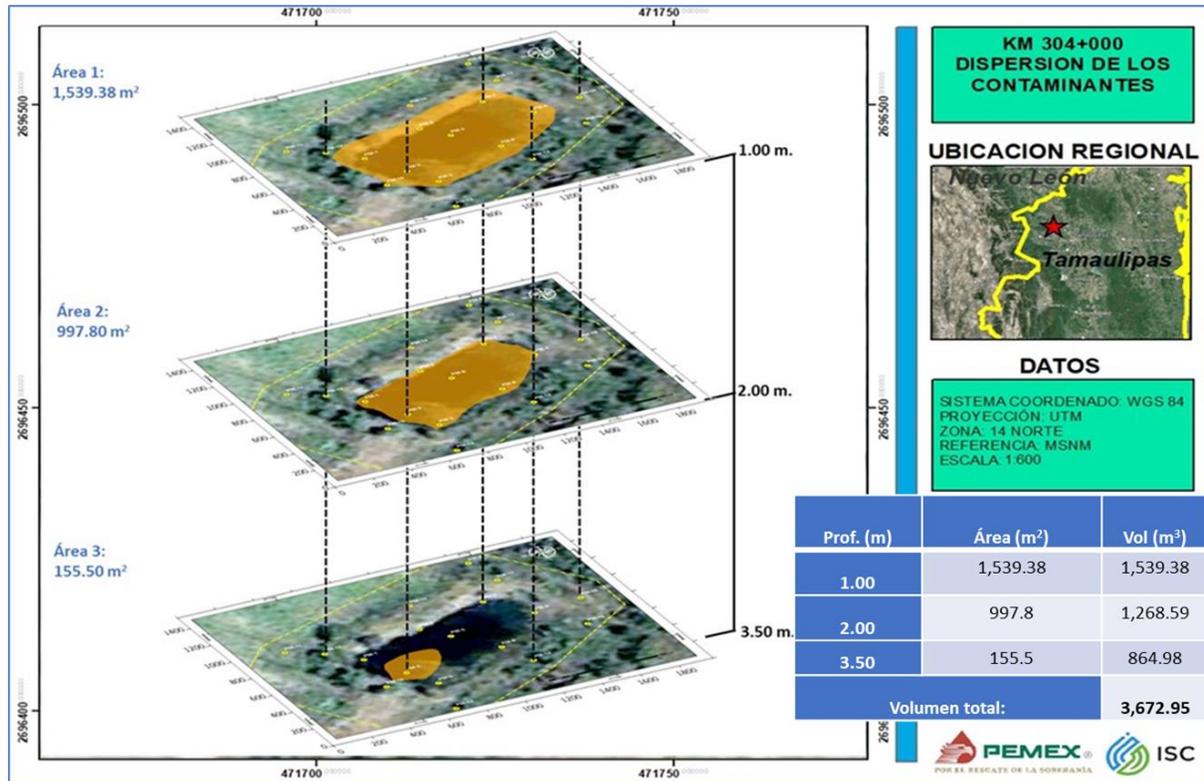


Figura 32. Plano de plumas de contaminación en el sitio y volúmenes de suelo contaminado.

En el caso del sitio que se caracterizó, el tipo de suelo se consideró como agrícola. Así, cualquier tecnología de remediación deberá considerar alcanzar los niveles de restauración para este tipo de suelo para la fracción media, pesada y ligera, así como para BTEX y HAP's. Este plan de remediación considera como meta el lograr que los niveles de todas las fracciones de hidrocarburo contengan concentraciones por debajo de los límites establecidos por la normatividad ambiental vigente (en este caso es la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio, y procedimientos para la restauración).

12.3 Tecnologías de Remediación autorizadas para Industria y Servicio de Coahuila, S A. de C.V.

Industrias y Servicios de Coahuila, S.A. de C.V. cuenta con los permisos y autorizaciones vigentes para desarrollar distintas tecnologías de tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, emitidos por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) así como de la Agencia Seguridad Energía y Ambiente (ASEA), mismos que se muestran a continuación:

Tabla 15. Autorizaciones para el tratamiento de suelos contaminados

DEPENDENCIA	AUTORIZACIÓN No.	VIGENCIA
SEMARNAT	19-V-49-22	10 AÑOS
ASEA	ASEA-ATT -SCH-0095-2022	10 AÑOS

Con la finalidad de determinar la mejor tecnología para la remediación del sitio se realiza un análisis principalmente de los procesos y restricciones de cada uno de los métodos, en la Tabla 16 se presenta el resumen de las tecnologías de remediación de las cuales la empresa cuenta con autorización para su ejecución en condiciones similares a las que nos ocupa en el sitio aledaño al Km 485+763.10, en dicha tabla se presentan los trabajos a desarrollar, sus limitantes y la opinión que se da para la aplicación de dicho método:

Tabla 16. Métodos de Restauración.

MÉTODO	PROCESO	RESTRICCIONES PRÁCTICAS	OPINIÓN
Biodegradación por Landfarming en el sitio contaminado	Excavar, agregar nutrientes, realizar el laboreo del material para homogenizar y airear el material, lo cual favorece la degradación de los hidrocarburos.	Cadenas muy largas de hidrocarburo son difíciles de degradar, por lo que requieren del apoyo de adición de compuestos oxidantes y/o surfactantes, mismos que permitan la disgregación en fracciones más pequeñas de hidrocarburos	Requiere de superficies considerables para su tratamiento. Es una tecnología excelente para las fracciones de hidrocarburo media y pesada. Se obtienen buenos resultados ya que se pueden controlar todas las variables de operación. La desventaja de esta técnica es que solo se puede aplicar hasta 1m de profundidad
Bioventeo Aerobio en el sitio contaminando.	Realizar estudios de ROI para determinar la cantidad y ubicación de los pozos de inyección de aire y de nutrientes en el subsuelo.	Se requiere que el sitio presente una geología homogénea para la correcta difusión del aire y de los nutrientes en los diferentes pozos.	Esta técnica aplica favorablemente para los hidrocarburos de fracción ligera, media, BTEX, y HAP's. Aunque depende mucho de la permeabilidad del suelo
Extracción de vapores "in situ"	Extraer los vapores orgánicos a través de pozos de extracción, y tratarlos mediante una serie de filtros para no contaminar la	Permeabilidad tiene que ser mayor de 10-8 cm ² , La humedad de saturación debe ser menor a 85%. Depende de la concentración de compuestos	Es la tecnología más adecuada cuando se trata de hidrocarburos fracción ligera, y BTEX, aunque también aplica para Hidrocarburos fracción media y

MÉTODO	PROCESO	RESTRICCIONES PRÁCTICAS	OPINIÓN
	atmósfera. Se debe vigilar la presencia de mantos freáticos	volátiles que se encuentren en la composición del contaminante	HAP's. El parámetro más importante para que sea efectiva es la permeabilidad del suelo.
Biorremediación por Biopilas a un lado del sitio contaminado	El material es colocado en una celda de tratamiento, en ella se adicionan los insumos que permitan el adecuado desarrollo de los microorganismos y que ello permita la degradación de los hidrocarburos, una vez que se ha restaurado, se regresa a su sitio original. nutrientes, reponer en el sitio original.	Para evitar la volatilización de los contaminantes hacia la atmósfera es necesario colocar membranas para cubrirlo. Por otra parte, concentraciones de contaminante muy elevadas tienden a producir un efecto inhibitorio en los microorganismos responsables de su degradación	Es utilizada principalmente para hidrocarburos fracción media y pesada, aunque también puede funcionar en fracción ligera donde se usa una membrana impermeable para evitar su volatilización.
Oxidación química a un lado del sitio	Este tipo de tratamiento requiere de excavar, mover a una celda de tratamiento para ahí realizar la oxidación de todo el material.	Obtención rápida de degradación de hidrocarburos, aunque requiere de un estricto control del pH, y grandes cantidades de reactivos para poder oxidar todo el contaminante.	El proceso de oxidación afecta también a la calidad biológica que posea el suelo tratado, por lo que se requiere de un tratamiento posterior para neutralizar el material y restaurar la microbiota.

Derivado del análisis de las diferentes técnicas autorizadas con las que cuenta industria y Servicios de Coahuila, S.A. de C.V. y considerando el tipo de contaminante así como los volúmenes de suelo impactado es de 3,672.95 m³, **se propone utilizar para este sitio la técnica conocida como “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”**, donde es necesario contar una celda de tratamiento que evite el contacto del suelo contaminado con el suelo limpio y que a la vez sea lo suficientemente impermeable para evitar que los lixiviados migren hacia el suelo y subsuelo. A continuación, se realiza una descripción de esta tecnología.

12.4 Biorremediación por el método de Biopilas a un lado del sitio contaminado (PILA-LS)

Esta técnica es otro sistema de tratamiento biológico, donde los hidrocarburos son degradados mediante un proceso de mineralización con el cual los microorganismos utilizan los hidrocarburos como fuente de carbono para su alimentación, donde reducen las cadenas de los hidrocarburos en compuestos más sencillos.

A diferencia de la técnica de remediación por Land farming, en esta podemos establecer un mayor control en el proceso de la degradación biológica de los hidrocarburos, al monitorear de manera contante los procesos que se desarrollan dentro de la Biopila. Donde, una serie de biopilas serán colocadas en el interior de una celda de tratamiento, misma que será construida en un área aledaña al sitio contaminado, en ella se depositará de manera gradual el material contaminado, hasta ir

formando una pila de cierta altura que permita de manera posterior la aplicación mediante riego de los diversos productos destinados especialmente para acelerar el desarrollo metabólico de los microorganismos (básicamente agentes surfactantes y nutrientes orgánicos) y por consecuencia incrementar la velocidad de degradación de los contaminantes en un periodo de tiempo relativamente menor. El escenario ideal es aquel en el que las poblaciones microbianas están capacitadas para utilizar los contaminantes como sustratos de crecimiento y en que las condiciones ambientales no inhiben su desarrollo. Es decir, que la biodegradación del contaminante permite a los microorganismos obtener la energía necesaria para sus funciones vitales y, al mismo tiempo, sintetizar todos sus componentes celulares. En el caso de los hidrocarburos, la biodegradación más eficiente es la ligada al metabolismo microbiano aeróbico, es decir, su oxidación mediante oxígeno molecular, que en el complejo proceso metabólico celular hará el papel de lo que denominamos “aceptor final de electrones”. La aireación será, pues, la primera estrategia de estimulación que llevaremos a cabo en un proceso de biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos.

Las tres razones principales que provocan estos largos plazos son:

- Cantidad de oxígeno biodisponible en el suelo, insuficiente para el adecuado desarrollo de los microorganismos degradadores de los hidrocarburos.
- Escasa cantidad o mala distribución en el suelo de nutrientes, humedad lo que propicia que los procesos de degradación no se produzcan de manera uniforme.
- Otra es que los contaminantes no son biodisponibles por encontrarse adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo, razón por la cual cobra importancia la adecuada adición de los Surfactantes que son adicionados al material.

El sistema general de la técnica de biorremediación por biopilas en una celda de tratamiento se muestra a continuación:

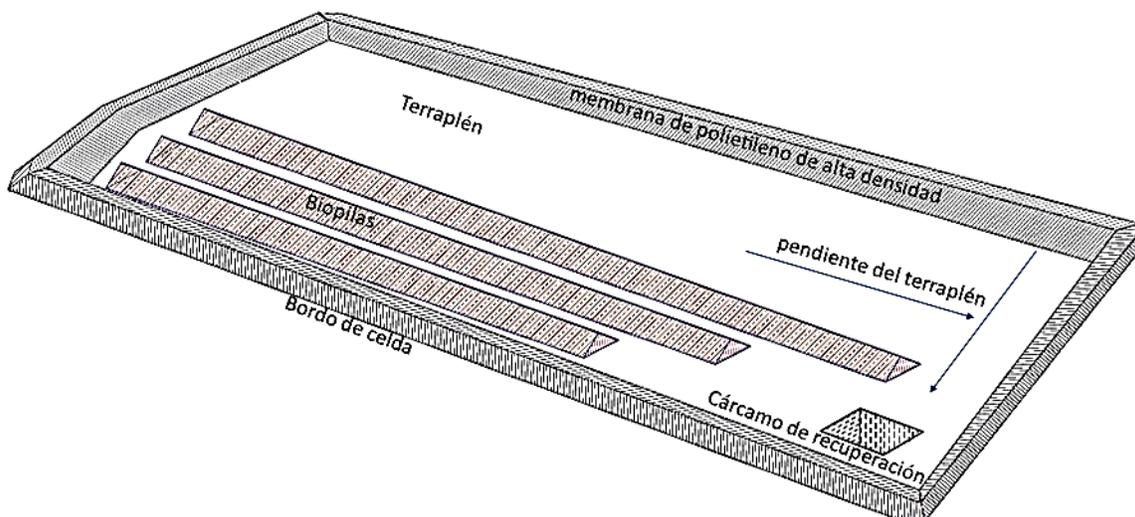


Figura 33. Vista de planta de un sistema de Biopilas.

12.4.1 *Habilitación del área de la celda de tratamiento.*

Como primera etapa de los trabajos de biorremediación, consiste en el desarrollo de las actividades de adecuación del sitio donde se instalará la celda de tratamiento, misma que se ubicará en un área colindante próxima al sitio contaminado. La actividad inicia con el transporte del personal, material, equipo y herramienta necesarios hasta el sitio donde se llevarán a cabo los trabajos. Una vez en el área delimitada se realizan las actividades de limpieza para el retiro de todo aquel material que pudiese alterar el buen desarrollo de los trabajos, posteriormente se realiza el despalme con maquinaria para de esta manera ir realizando la nivelación del terreno, dejando una pendiente aproximada de 5% y de esta manera conducir todo aquel líquido excedente que se encuentre dentro de la celda de tratamiento hacia la fosa de captación de lixiviados, la cual se ubicará en el punto más bajo del terreno donde está situada la celda.

Otra de las actividades a desarrollar es la habilitación de los caminos de acceso donde se ubicará la celda y de esta manera poder asegurar un adecuado desarrollo de los trabajos de remoción y transporte del material extraído del sitio contaminado. Dichos trabajos serán realizados empleando la maquinaria pesada (retroexcavadoras, excavadoras, camiones de volteo de 14 m³, entre otros).

12.4.2 *Construcción de celda de tratamiento.*

Una vez terminados los trabajos de nivelación del terreno, para la construcción de la celda se llevan a cabo en las siguientes etapas:

- El tendido de una primera capa de material de banco (básicamente arcillas) con un espesor no menor a los 20 cm, la cual será compactada hasta obtener un 90% de compactación de la prueba Proctor y de esta manera funcionar como base de la celda de tratamiento e impedir la posible migración de lixiviados. Así mismo se construirán los bordos de la celda, utilizando el mismo material de banco, dichos bordos tendrán una altura máxima de 1.50m.
- La siguiente etapa consiste en el tendido de una película de polietileno de alta densidad (PEAD), de 1.0 mm de espesor la cual es la barrera impermeable que prevendrá la infiltración de contaminantes hacia capas inferiores del suelo no afectado, esta se colocará en toda la extensión de la celda de tratamiento, así como de los bordos de esta, asegurándola para que esta no se mueva una vez que esta fue colocada.
- Así mismo se construirá un cárcamo para la captación de lixiviados con, al menos, la capacidad suficiente para captar los escurrimientos que se generen durante el proceso de tratamiento.

- Una vez instalada todo el PEAD, se colocará una capa de material de banco (arcillas) con un espesor máximo de 30 cm, misma que será compactada hasta un 90% de prueba Proctor, esto con la finalidad de proteger la película del paso de la maquinaria para el acarreo del material contaminado que fue removido (mediante excavación) y depositado en la celda de tratamiento.

Con base al volumen de suelo contaminado a extraer, se plantea la construcción de una celda de tratamiento de un área de 7,226.019 m², con bordos de 1.5m de altura aproximadamente y su fosa de lixiviados, la cual puede ser establecida a 50m al suroeste del área a excavar.

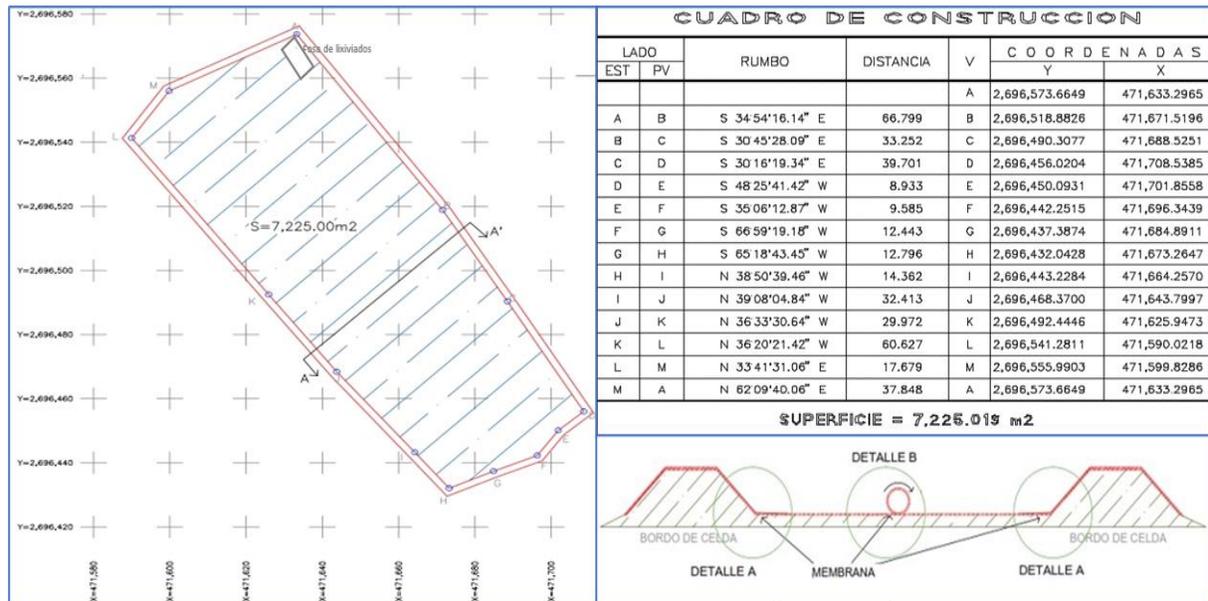


Figura 34. Proyección de celda de tratamiento para el pasivo ambiental aledaño al km 304+000

12.4.3 Excavaciones del material contaminado y su control:

Una vez que la celda está lista, se inicia la excavación del suelo contaminado, mediante el uso de maquinaria pesada, siendo esta una operación en la que deben extremarse todas las medidas de seguridad para evitar accidentes y daños a la estabilidad de las líneas de transporte de Pemex. Estos trabajos no deben iniciarse si no se tienen perfectamente identificadas las líneas que pasan a través del derecho de vía y el área de excavación que deberá estar bien establecida en el plan de excavación, este último está basado en el estudio de caracterización, considerando las observaciones de campo y los alcances de las partidas de excavación.

Este plan se apoya con la información (planos y coordenadas) que permitan trazar en campo las áreas de las plumas de contaminación indicadas en el estudio de caracterización. Por lo que, a través del apoyo del levantamiento topográfico del sitio, para hacer el replanteo o georreferenciación del

trazado de las áreas de excavación, identificando plenamente el área la profundidad que abarcan cada pluma de contaminación, a la que se debe excavar en cada una de ellas. Los volúmenes extraídos serán medidos en banco y registrados en la bitácora de obra para determinar los avances y acumulados diarios de cada una de las partidas de excavación.

Con la finalidad de disminuir las emisiones a la atmósfera en las excavaciones, la extracción de suelo se realizará con maquinaria pesada para hacer los cortes y de inmediato cargar a camiones de volteo y estos llevar el suelo a la celda para el tratamiento.

El material excavado con maquinaria pesada (excavadora o retroexcavadora), este será colocado en camiones de volteo para su traslado a la celda de tratamiento. Cabe señalar que los camiones de volteo que transportarán el material extraído del sitio utilizarán cubiertas impermeables para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera durante el recorrido a la celda. Se cuidará en todo momento los accesos a la celda, señalando entradas y salidas, todo esto con el fin de evitar cualquier situación con las unidades en movimiento que ahí estarán circulando, durante el movimiento de material hacia la celda.

Una vez que se ha llegado al punto de tiro, el camión de volteo realizará las maniobras pertinentes, que le permitan descargar el material de tal manera que deje espacios reducidos entre cada descarga, esto con el fin de ir integrando la pila de manera uniforme, en el caso de que se desborde el material extraído hacia otras zonas de la celda, se realizará el acomodo mediante una retroexcavadora hasta dejar la pila en condiciones adecuadas de operación.

Como medida de control de la excavación, una vez que se haya llegado a una profundidad o área límite, se realizará la toma de muestra y análisis para la determinación de TPH's por medio del PetroFLAG y con ello verificar que el suelo que está presente contiene valores cercanos a los correspondientes al suelo natural (no mayores a las 300 ppm). Llevando un registro diario de los avances y acumulados en el volumen de cada de la excavación realizada y que esta coincida con lo señalado para cada pluma de contaminación identificada en el estudio de caracterización. Una vez que se llega a valores de concentración de TPH's por debajo del valor límite establecido, se dejará de excavar en esa zona y se continuarán con las otras hasta dejar completamente el sitio libre de material contaminado. Para posteriormente solicitar el muestreo comprobatorio, mismos que se realizará con un laboratorio debidamente acreditado y que cumpla con la normatividad ambiental vigente.

12.4.4 Condiciones de operación en la celda para el tratamiento del suelo por la técnica de Biopilas. Ahora bien, para poder obtener buenos resultados en esta técnica de remediación, es de suma importancia lograr que el suelo contaminado presente en la celda se encuentre completamente

disgregado, para que las condiciones sean consideradas como representativas de todo el material contenido en la celda, para ello es necesario ir realizando su acomodo de manera correcta, conformando las biopilas con una base de 4.0 m y una altura de 3.0 m. Para maniobras de la maquinaria dentro de la celda de tratamiento se dejará un espacio entre biopilas de aproximadamente 2.5 m de ancho así como un espacio mínimo de 3.0 m a las cabeceras y costados de las mismas. La pilas deberán contar con un ángulo de reposo de 45°.

Cabe mencionar que debido a las características de los contaminantes presentes, como lo son la fracción ligera y los BTEX, se han tomado consideraciones especiales para su pronta degradación y con esto evitar en lo posible la transferencia de contaminantes a la atmosfera. En primera instancia y como se mencionó anteriormente, se empleará maquinaria pesada para disminuir los tiempos de corte, así como de extracción del material contaminado, posteriormente se emplearán camiones de volteo con capacidad de 14m³ que estarán cubiertos por una membrana impermeable con lo cual se disminuirán de manera considerable dichas transferencias. Una vez llegado el material a la celda, se procederá a conformar la biopila e inmediatamente se hará la agregación de humedad con el surfactante al igual que la adición de microorganismos, nutrientes y abono para posteriormente cubrir la pila con una membrana impermeable por un periodo de 20 días, mismos en los que se proyecta que se acelere la degradación de los hidrocarburos de fracción ligera y BTEX. Dicha situación será monitoreada mediante el análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles en cada biopila y una vez que se haya detectado la disminución de los COV's, se procederá a realizar una nueva homogenización y aplicación de los reactivos mencionados, de igual manera se considera el volver a cubrir la pila con la membrana.

A continuación se desarrolla las fases del proceso de tratamiento de suelo

12.4.4.1 Control de la humedad.

Uno de los aspectos importantes para lograr un medio adecuado para lograr la biorremediación de los hidrocarburos, es el mantener el nivel necesario de humedad, por lo que se debe de planificar la cantidad de agua que se debe de incorporar, tomando en cuenta el tipo de suelo que será tratado es del tipo arcilloso, cuya capacidad de drenaje es menor al esperado en este tipo de tratamientos, por lo que se incrementará la humedad sin que se llegue a la saturación, experiencias en proyectos similares, así como la literatura señala que esta debe de mantenerse en un intervalo del 20 al 75%. La mejor manera de lograr el control adecuado de la humedad se logrará con el laboreo del material, tal como se mencionó anteriormente. El agua será adicionada empleando una pipa pequeña conforme se va avanzando con el acarreo del material hacia la celda o con una de mayor volumen una vez que todo el material a tratar se encuentra depositado en la misma.

En caso de que se presentasen lluvias durante el tratamiento del material, el agua excedente será captada en la fosa de lixiviados, ubicada en el extremo más bajo de la celda, donde se realizará su recuperación y posteriormente ser ingresada en la celda de tratamiento, como parte del agua de uso para el tratamiento. Por último, la aplicación del agua en el material será cuando esta sea utilizada como medio de dilución durante la adición de los diferentes reactivos se serán utilizados durante el tratamiento.

12.4.4.2 *Surfactantes.*

Estos Surfactantes son compuestos anfífilos que poseen la capacidad de interactuar con una molécula que presenta a la vez un grupo polar (hidrofílico) y un grupo apolar (hidrófobo) y por lo tanto ubicarse en la interfase de estos. Esta afinidad por las interfaces es lo que les otorga sus principales características de disminuir la tensión superficial, logrando de esta manera aumentar la solubilidad de los hidrocarburos inmersos en el suelo.

Otra característica del surfactante es su tendencia en asociarse, esto ocurre en una acumulación de surfactantes, el cual comienza por adsorberse a las interfaces disponibles, luego su concentración aumenta hasta que se forman las primeras micelas, por lo que, estos surfactantes permiten la interacción entre el medio de dilución y el hidrocarburo, dado que esta sustancia es biodegradable y provoca la formación de una emulsión, es decir, el hidrocarburo se fragmenta en pequeños aglomerados (micelas), cuya propiedad de interés en la biorremediación es su polaridad, la cual permite la miscibilidad del hidrocarburo en el medio de dilución. El surfactante utilizado por Industria y Servicios de Coahuila es el Quantum Clean, mismo que se encuentra dentro de los procesos que fueron autorizados por la ASEA y SEMARNAT. Este producto será adicionado en primera instancia en una proporción de 12ml de solución acuosa/kg suelo, mediante el sistema de aplicación de humedad, esto con la finalidad de que la interacción del emulsificante con el suelo en tratamiento permita lograr una mayor disociación de las cadenas cortas del hidrocarburo y de esta manera propiciar que estas fracciones puedan mejorar la biodegradación, aumentando la solubilidad y la biodisponibilidad del hidrocarburo a los microorganismos degradadores que se encuentran en el suelo de manera nativa. Una vez que se haya realizado su aplicación en el material, se dejará en reposo de 8 hr, esto con la finalidad de que el producto reaccione con el suelo.

Posteriormente, para continuar con la degradación de las cadenas de hidrocarburos más grandes se aplicará este reactivo en una proporción de 8 ml de solución acuosa/kg suelo. Cabe señalar que las cantidades de aplicación dependerán del avance en la remediación del suelo. La aplicación de este surfactante tendrá la mayor intensidad al principio del tratamiento y posteriormente se irán adicionando de acuerdo con los resultados de los muestreos de control realizados al material de la biopila.

12.4.4.3 *Microorganismos(SOLIBAC IP SOIL)*

En los procesos de biorremediación, una de las características más importantes que se debe cuidar en el suelo a tratar es el de las UFC de bacterias heterotróficas, el cual debe permanecer por encima de 1,000 unidades para su correcto funcionamiento. Por lo que, una vez añadidos los nutrientes en el material, para que la biorremediación sea adecuada requiere que estos entren microorganismos soporten la acción de cuando estos entran en contacto con el suelo impregnado y hacer frente a las concentraciones relativamente tóxicas para los microorganismos, por lo que es de suma importancia el lograr que su concentración se mantenga en condiciones óptimas de crecimiento de la población degradadora durante el transcurso de los trabajos de remediación.

Para lograr este fortalecimiento de las bacterias nativas que existen en el suelo afectado, se adicionará la fórmula microbiana de SOLIBAC IP SOIL en varias etapas en las que dura el tratamiento, cabe señalar que esta fórmula es una mezcla sinérgica de microorganismos del género Bacillus y Pseudomonas especialmente seleccionados y adaptados para degradar compuestos orgánicos presentes en el suelo contaminado. Esta fórmula bacteriana debe ser activada previamente a su aplicación 24 horas antes. Dicha activación y dilución de las bacterias específicas se llevará a cabo en tanques en el que se adiciona agua y una cubeta de 10 kg que contienen a los microorganismos liofilizados, a la solución se le incorpora aire, proporcionado por un difusor en el interior del tanque y se mantiene en movimiento, incrementando su oxigenación lo que promueve su reproducción de los microorganismos que serán adicionados al suelo.

Esta solución será adicionada al material por los mismos medios con los que se han aplicado los reactivos y el agua en las Biopilas. Por lo que será una vez que se haya terminado la aplicación con el Quantum Clean (8 hrs después de su aplicación en el material), asegurando que ya pasó la mayor reacción del surfactante con el suelo y que ya se formaron las micelas del hidrocarburo y así los microorganismos puedan utilizar esos fragmentos como su fuente de carbono. En primera instancia se aplicará un primer inóculo de estas bacterias y se dejará interaccionar con el material contaminado con el hidrocarburo por un espacio de 20 días. Posteriormente dependerá de como vaya el avance de la degradación de los hidrocarburos, siendo esto medido durante los muestreos de control internos que serán realizados de manera periódica para un adecuado control de operación de las biopilas.

12.4.4.4 *Nutrientes*

Como todo sistema vivo, los microorganismos empleados para la degradación de hidrocarburos, necesitan encontrar en el medio una fuente de nitrógeno, la cual es vital para el desarrollo del sistema (una relación óptima de los nutrientes orgánicos C :N: P es de alrededor 100:10:1), en el caso que nos ocupa el aditivo que empleamos se denomina TRIPLE 17, el cual incorporará al medio

en solución, la cantidad y concentración que será determinada en su momento según el desarrollo de los microorganismos.

Como ya se ha mencionado la humedad y la relación de nutrientes son dos características que si se pueden manipular con relativa facilidad adicionando agua y nutrientes disueltos al suelo contenido en la biopila. La cantidad de nutrientes y agua que deben adicionarse serán calculados utilizando los resultados del análisis de las muestras, así como la determinación de la humedad contenida en el suelo, antes de su ingreso a la biopila. Los nutrientes son muy solubles en agua por lo que no cuesta mucho trabajo su disolución, por lo que se disolverán 8.35 Kg del fertilizante TRIPLE 17, primero perfectamente en un recipiente pequeño y posteriormente se agregarán a la pipa que se empleará para incorporarlos a la biopila de tratamiento para que se obtenga una mejor mezcla de nutrientes-agua en la pipa donde es más difícil disolver y homogenizar la solución por agitación. La aplicación de TRIPLE 17 se realizará posterior a la aplicación de los microorganismos, esto con el fin garantizar una atmósfera adecuada y evitar la saturación del medio con sales que pudiesen inhibir el crecimiento de los microorganismos. Esta solución será preparada en tambores de 200L en el predio en tratamiento y su manejo no requiere de ningún cuidado en especial. Su aplicación será de la misma manera que los reactivos anteriores, es decir, una vez que se han formado las biopilas, posterior a la adición de los microorganismos, se aplicarán los nutrientes diluidos en agua hacia el material que conforma cada Biopila, mismas que se encuentran en la celda de tratamiento. Dicha aplicación dependerá del avance gradual que presente la degradación de los hidrocarburos presentes en las biopilas.

12.4.4.5 Materia orgánica.

Dado que este material contiene un considerado índice de arcillas, al material en tratamiento se le aplicará una enmienda con materia orgánica en un porcentaje no mayor al 6% del volumen total de la celda de tratamiento, mismo que será dividido entre el número de aplicaciones que se hagan a las Biopilas, esto con la finalidad de incrementar la porosidad y permeabilidad del material en tratamiento, ya que facilita la difusión del oxígeno, permitiendo que prevalezcan las condiciones aeróbicas en el medio y de esta manera incrementar la eficiencia del proceso de desarrollo de los microorganismos que participan en la degradación del hidrocarburo presente en el material. Su aplicación será de manera gradual por capas, en coordinación con la aplicación de los nutrientes, previas a la humectación o aplicación de los microorganismos, para posteriormente realizar su mezclado, asegurando su correcta integración en todo el material.

12.4.4.6 Homogenización mecánica de las Biopilas.

Como se ha mencionado, el movimiento del material contenido en la celda de tratamiento con ayuda de la maquinaria, permitirá realizar la correcta homogenización del material, mediante el cual se

incrementa de manera importante el contacto entre los microorganismos, nutrientes y contaminantes, mejorando la biodegradabilidad este último inmerso en la matriz suelo. Esta actividad de homogenización del suelo también redistribuye los contaminantes, produciendo una adecuada reacción entre los diferentes niveles de contaminación.

Cabe resaltar, que para este proyecto en específico, se tiene contemplado que, una vez que se haya colocado todo el material contaminado que fue extraído de la excavación en la celda de tratamiento y que ya se haya formado la biopila adecuadamente, la homogenización de este material se considerará al movimiento que tuvo el material mediante las acciones de excavación así como de la carga y descarga de los camiones de volteo. Esto con la finalidad de no provocar una mayor dispersión de los hidrocarburos de cadenas cortas que aún se encuentran inmersos en la matriz del suelo. Posteriormente, cuando se haya corroborado de que dicha concentración ha disminuido de manera considerable, se procederá a realizar su homogenización mecánica de manera continua, misma que será de manera intensiva y constante, asegurando que este sea realizado en la totalidad del material contenido en las biopilas de la celda de tratamiento.

La profundidad a la que se va a mezclar el suelo permitirá una mayor difusión del oxígeno atmosférico en las capas inferiores del suelo, el cual se encuentra disminuido a profundidades mayores de 50 cm, es por ello por lo que este trabajo mecánico permitirá su distribución en esta capas inferiores que quedan expuestas durante el volteo del material y así sucesivamente. Otra de las funciones de esta homogenización mecánica, es el que permitirá ayudar en el control de la humedad presente en el material, ya que con ello se logra una homogenización del agua aplicada en la biopila. Por lo que esta acción se realizará cada vez que se realice la humectación o con la presencia de lluvias, en un tiempo no mayor a las 24 hr.

Tabla 17: Las características generales para la operación adecuada de la técnica de biopilas

CARACTERÍSTICA DEL SUELO	VALOR
Bacterias heterotróficas (UFC/gramo)	> 1000
pH	6 - 8
Humedad (% de saturación)	40 – 85 (12 a 30 % peso)
Temperatura (°C)	10 - 45
Nutrientes (C:N:P)	100:10:1
CARACTERÍSTICAS DEL CONTAMINANTE	VALOR
Tipo de contaminante	Destilados ligeros, medios a hidrocarburos pesados
Concentración máxima (ppm)	≤ 50,000

A continuación se muestra el diagrama de la metodología así como de la tabla resumen de los parámetros de operación de la biorremediación del suelo contenido en la celda de tratamiento:

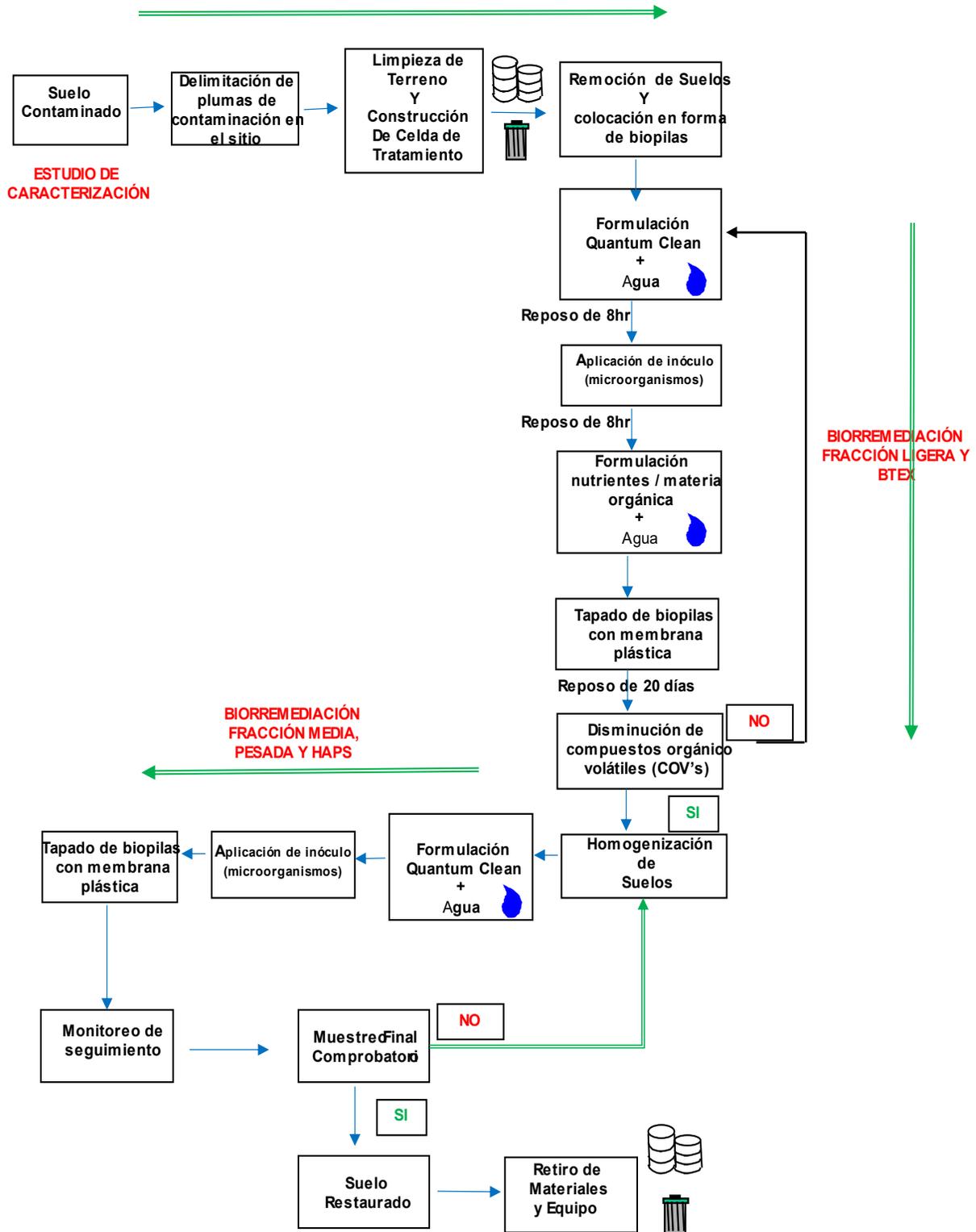


Figura 35. Metodología de la técnica autorizada de Biopilas

12.4.5 Pruebas de tratabilidad.

El éxito en la Restauración de un sitio contaminado, a menudo, se mide mediante el porcentaje de reducción en la concentración del contaminante en el terreno o agua subterránea. Este criterio resulta poco convincente, ya que algunos procesos pueden conseguir altos porcentajes de eliminación y aun así, no alcanzar los objetivos de depuración establecidos. Al mismo tiempo, los contaminantes pueden ser transportados más allá de los límites del terreno o aguas contaminadas, o transformados de manera abiótica a través de otros procesos como volatilización, migración o fotooxidación. En tal caso, los objetivos de la restauración no se cumplirían necesariamente. En la siguiente tabla se muestra una clasificación de las diferentes categorías en las que se puede conducir una prueba de tratabilidad, misma que considera varios aspectos importantes para demostrar la aplicabilidad de una tecnología de restauración específica para un sitio determinado.

Tabla 18: Categoría de pruebas de tratabilidad.

Criterio	Escala Laboratorio	Escala Banco	Escala Piloto
Tipo de datos	cualitativo	cuantitativo	cuantitativo
Parámetros críticos	Varios	Pocos	Pocos
No. de replicas	Simple / duplicado	Duplicado / triplicado	Triplicado ó más
Tamaño del estudio	Pruebas de jarras o estudios en matraces	Algunos pueden ser extensos como en charolas o contenedores	Planta piloto (on site u off site)
Tipo de proceso usual	Lotes	Lotes o continuo	Lotes o continuo
Tiempo requerido	Horas / días	Días / semanas	Semanas / meses

El presente proyecto, además de tener como propósito la estimación del impacto provocado al medio ambiente debido al derrame de hidrocarburo, como otro de sus objetivos tiene el proponer medidas correctivas que le devuelvan al sitio las características de uso de suelo que este presentaba antes del incidente. Por lo anterior, el trabajo contempla el desarrollo de una serie de pruebas de tratabilidad a nivel blanco para la obtención de datos confiables que faciliten considerar las condiciones óptimas de trabajo que serán aplicadas en campo.

En la primera propuesta se realizaron pruebas de tratabilidad siguiendo la tecnología de remediación por landfarming, actualmente y considerando la fracción ligera presente en el suelo contaminado se

ha establecido que la técnica de Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado es más adecuada ya que permite hasta cierto punto un control sobre las emisiones de contaminantes a la atmosfera. La diferencia entre ambas técnicas radica principalmente que las biopilas utilizan una membrana impermeable para el control de operación de la biopila que también sirve para la contención de todo tipo de contaminantes de hidrocarburos. Debido a la similitud en ambas técnicas, se toman de referencia las pruebas de tratabilidad anteriormente realizadas por medio de land farming para tener una aproximación de la efectividad del tratamiento por biopilas, en el entendido de que, al controlar las condiciones de operación de esta técnica se obtendrán mejores resultados de los que se presenten a continuación.

Prueba de tratabilidad anteriormente realizada:

Para poder realizar pruebas con buen asertividad, se realizó la toma de suelo impactado en el sitio de estudio en el Km 304+000, en la misma ubicación donde se obtuvo la muestra de suelo durante la caracterización del sitio, cuyo valor de concentración de contaminante era representativa de toda el área. Este punto seleccionado fue el identificado en el plan de muestreo como PM-7, cuyas coordenadas son: UTM 471740.97 m E y 2696485.71 m N, el cual presentó un resultado analítico de 3,914.94 Kg/mg de fracción pesada a una profundidad de 1.00 m. A este mismo material se le realizó un análisis de hidrocarburos totales de petróleo (HTP's) por medio del analizador portátil PetroFLAG y con ello realizar una comparativa entre ambos métodos analíticos y de esta manera llevar un mejor seguimiento de la degradación del contaminante durante el desarrollo de estas pruebas.

Se procedió a tomar 10 gr de muestra y se le aplicó el procedimiento de extracción y análisis de TPH's, tal como lo señala el manual para el factor de respuesta número seis. Dando como resultado del análisis de PetroFLAG un valor de 5,366 ppm presentes en la muestra de suelo obtenida del punto PM-7.

De este punto seleccionado se recolectó una muestra con un volumen de 10 kg de suelo, misma que fue dividida en dos partes iguales de 5 kilogramos cada una, depositándolas en charolas con una cubierta plástica a forma de membrana impermeable. La primera charola fue utilizada como "testigo" para observar su comportamiento natural procurando mantener condiciones como las que tendría este material si se encontrara aun en el sitio, es decir teniendo variaciones únicamente de humedad y temperatura, las cuales fueron controladas por medio de un aspersor con agua y una temperatura ambiente. Esta muestra nos servirá para comparar la cinética de degradación de hidrocarburos que se presentará en la muestra de la segunda charola.

En esta segunda charola, se llevó a cabo la técnica, cuya metodología señala que se debe iniciar con la homogenización del material de manera manual, una vez teniendo la muestra lista se procedió a

la preparación y aplicación de los aditivos mediante un aspersor manual. iniciando con el Quantum Clean, mismo que adicionado en una solución de 8 mililitros por cada kilogramo de suelo, es decir 40 mililitros del reactivo, el cual fue diluido en 110 mililitros de agua sin cloro, lo que nos da un total de 150 mililitros que se aplicaron mediante el aspersor y con ello tener un mejor control en la aplicación, evitando la saturación del suelo, y así poder dispersar dicha solución en el suelo. Una vez terminada su aplicación se dejó reposar por un espacio de 8 hr, posteriormente se adicionó la solución activada de SOLIBAC IP SOIL, a ellos se le sumó la aplicación de una solución diluida de nutrientes, una vez terminada la aplicación de los diferentes aditivos, dejándolo reposar por un espacio de 8 hr, se realizó el traspaleo, homogenización y mezclado del material y se procedió a dejar en reposo 24 hrs. Para posteriormente realizar nuevamente la aplicación, la cual fue de la siguiente manera: 3 veces por semana, durante las 4 semanas que duró la prueba. Al termino de cada semana se realizó la toma de muestra compuesta de todo el material contenido en la charola, mismo que se realizó la medición de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP's) mediante el analizador PetroFLAG y así estimar el grado de avance en la degradación del hidrocarburo presente en el material de la charola.

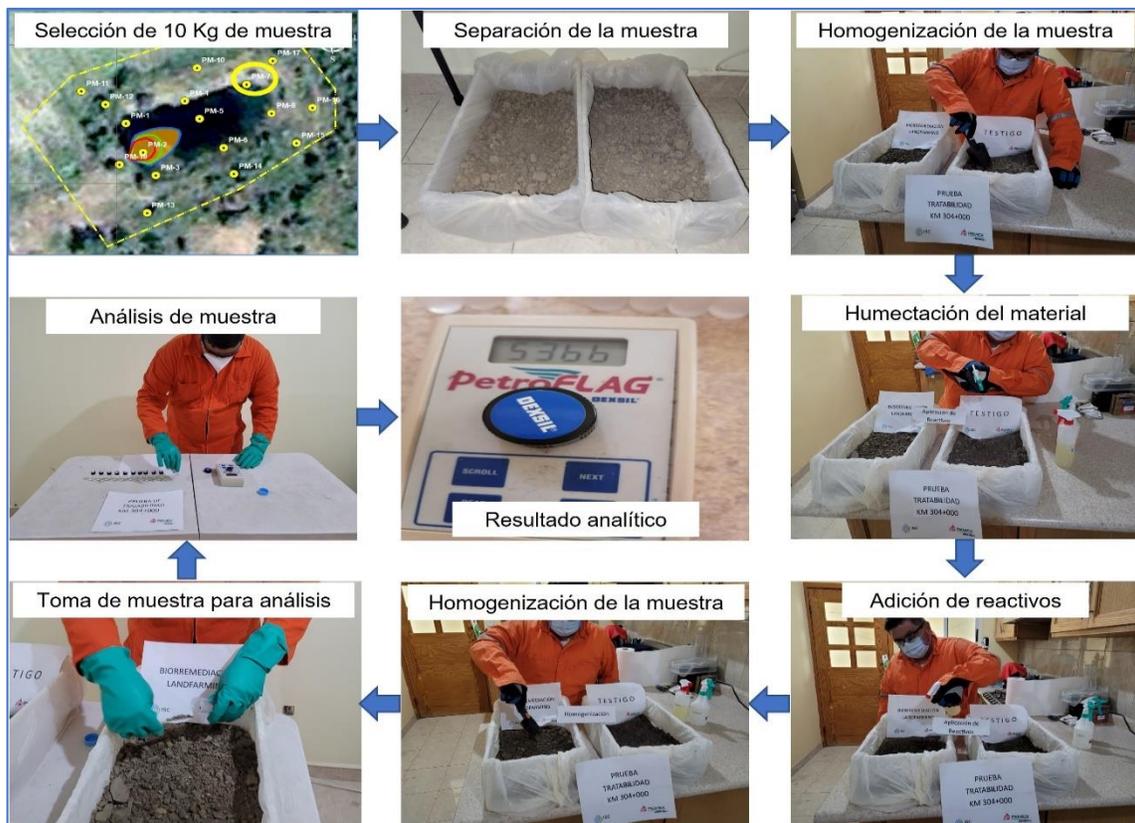


Figura 36. Trabajos de tratabilidad de la muestra realizados con la tecnología por biorremediación.

La cinética de degradación se presentó como sigue:

Tabla 19: Degradación del Contaminante a Través del Tiempo, donde se muestran los valores semanales.

SEMANA	TPH's (ppm)	MEDICIÓN	SEMANA	TPH's (ppm)	MEDICIÓN
0	5,366		3	4,488	
1	4,829		4	4,361	
2	4,561		Medición laboratorio: 3,914.94 mg/Kg Medición PetroFLAG: 5,366 ppm Factor Lab/Petro: 0.7295 Objetivo: 4,112 ppm de TPH's (3,000mg/kg)		

A partir de los resultados del análisis de muestra de suelo tratado por semana, se procedió a realizar un análisis estadístico del mismo y con esto tener una proyección de la disminución de la concentración del hidrocarburo con respecto al tiempo, pudiendo establecer las semanas en las que se obtendrían concentraciones por debajo del límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Como bien se mencionó en un inicio, se seleccionó la zona del punto de muestreo PM-7 y se extrajo el material, el cual, de acuerdo con los resultados del laboratorio acreditado, cuenta con una concentración de 3,914.94 mg/kg de fracción pesada y que su análisis mediante el PetroFLAG nos arrojó una concentración de 5,366 ppm de TPH's. Haciendo una regla de proporcionalidad, se obtiene que el factor para convertir de ppm TPH's a mg/kg de fracción pesada es de 0.7295 para este caso en específico.

De acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, la fracción pesada en un uso de suelo agrícola tiene un límite máximo permisible de 3,000 mg/kg, al cual, aplicando el factor de conversión,

equivale a 4,112 ppm de TPH's que es la concentración a la que se debe llegar para obtener niveles de limpieza adecuados.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en las 4 semanas de análisis más el resultado inicial, se realiza el graficado de las semanas con las concentraciones medidas, aplicando una línea de tendencia exponencial a las concentraciones, debido a que en este tipo de remediaciones donde se estimula y adicionan bacterias, su bioaumentación es amplia y por lo mismo la degradación del hidrocarburo, pero con el tiempo la población bacteriana reduce su crecimiento al encontrarse en densidades altas, por tal motivo la degradación del hidrocarburo se mantiene estable en las últimas semanas. Lo anterior se representa adecuadamente mediante una línea de tendencia exponencial, la cual presenta un ajuste de datos o confianza del $R^2=0.9215$ y para la semana 13 se muestra una línea que ha pasado por debajo de las 4,000 ppm de TPH's, que es nuestro objetivo.

Por lo anterior, se propone un programa de trabajo para la remediación de 13 semanas, sin embargo, es importante considerar muestreos para ajustar dicha tendencia e ir liberando material de manera gradual (aquel presente concentraciones por debajo del límite máximo permisible)

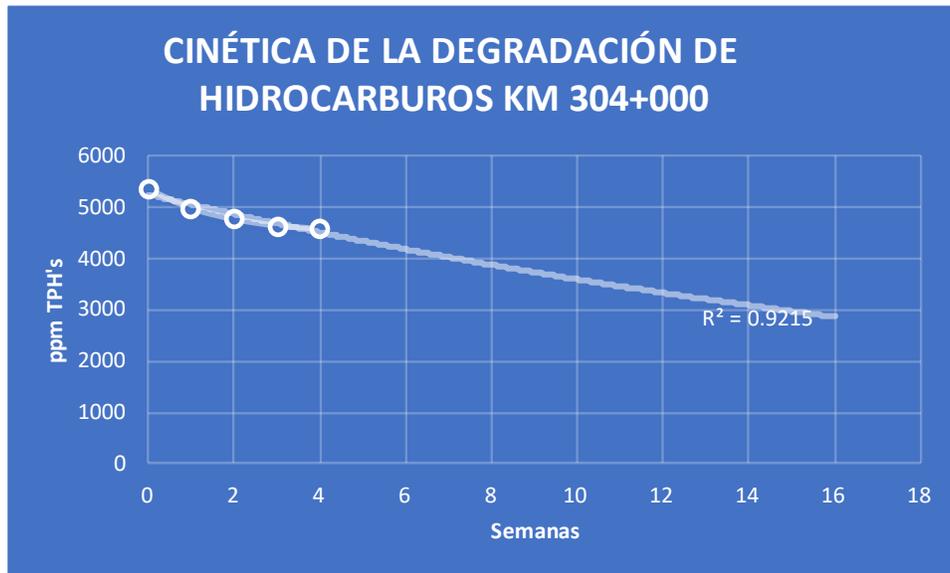


Figura 37. Cinética Gráfica de la Degradación del Contaminante

12.4.6 *Monitoreos.*

Durante la ejecución de los trabajos de Biorremediación se realizarán diversos monitoreos, mismos que permitirán el correcto control y seguimiento de la degradación de los contaminantes, de los niveles de nutrientes y la humedad presente en la biopila, así como de la actividad microbiológica. Además de verificar los niveles de limpieza obtenidos en los trabajos realizados durante la excavación así como del material en tratamiento contenido en la biopila, es importante mencionar que si dentro de los monitoreos se identifican volúmenes parciales de material que han alcanzado niveles de limpieza, deberán ser retirados de la celda de tratamiento para evitar algún tipo de contaminación cruzada. A continuación se describen cada uno de ellos:

12.4.6.1 *Muestreo inicial de suelo.*

Una vez que se han extraído los volúmenes de suelo contaminado y que se han conformado las biopilas en la celda de tratamiento, se deberá asegurar que el material se encuentre lo más homogéneo posible e identificar aquellas zonas donde sea evidente la presencia del contaminante; por cada biopila se establecerá un punto para la toma de 1 de muestra, mismo que será considerado como el muestreo inicial.

En estas muestras además de la concentración del hidrocarburos en todas sus fracciones, los resultados obtenidos deberán contener los valores de los parámetros como humedad, actividad microbiológica (expresada en unidades formadoras de colonias, UFC/gr), pH, las concentraciones de C, N y P. Este muestreo inicial será tomado en cada biopila, considerando la profundidad de 1.50m como la ideal para llevar a cabo los análisis mencionados. Las muestras serán colectadas mediante el uso de hand auger, colocando la muestra en frascos de vidrio, que serán etiquetados y preservados para su posterior análisis en un laboratorio, mismo que cuenta con las autorizaciones y acreditaciones emitidas por las autoridades ambientales.

12.4.6.2 *Monitoreos de control interno para evaluar la degradación de los hidrocarburos (B).*

Una vez optimizado el proceso, este tipo de monitoreos se realizan periódicamente. En esta etapa, el objetivo es observar el avance en la biorremediación del suelo en tratamiento, donde el material únicamente recibe la humectación, aplicación de nutrientes y el laboreo. En estos monitoreos se analizarán las concentraciones de los hidrocarburos que contiene el suelo ya homogenizado y con ello comprobar que el suelo va siendo remediado próximo a los valores de los límites permitidos y con ello programar el muestreo final comprobatorio. El procedimiento de colecta de las muestras de control interno deberá ser similar al muestreo inicial, considerando tomar la muestra en el mismo punto de cada biopila, recordando que estas muestras son de carácter interno y que nos permitirán

conocer la concentración que aún persiste en el material, por lo que los análisis serán realizados por el mismo laboratorio acreditado, cuyos resultados obtenidos contienen la suficiente certidumbre o precisión para tomar la decisión en campo de ajustar con el proceso de remediación.

De igual manera que en el muestreo inicial, se determinarán los mismos parámetros en cada una de las muestras obtenidas en estos muestreos de control siendo: concentración de hidrocarburos en sus tres fracciones, BTEX y HAP's, humedad, actividad microbiológica (expresada en unidades formadoras de colonias, UFC/gr), pH, las concentraciones de C, N y P..

12.4.6.3 Muestreo final comprobatorio (MFC)

El plan del MFC que se presenta a continuación, se elabora con base en los resultados obtenidos en la caracterización del pasivo ambiental, misma que ya fue realizada y con la cual se logró dimensionar a los contaminantes presentes en el pasivo. Los trabajos de remediación del pasivo ambiental aún no se han desarrollado como tal, se encuentra en espera de la aprobación por parte de la autoridad ambiental al Programa de Remediación mediante la técnica “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”

Se propone la realización de un muestreo final comprobatorio para dar por finalizados los trabajos de excavación y extracción del material impactado en el área una vez que se hayan realizado los trabajos, esto con el objetivo de obtener los valores de concentración de hidrocarburos por debajo de los límites máximos permisibles para las fracciones pesada, media y ligera, así como para los BTEX y HAP's.

Para la ubicación de los puntos de muestreo en el área de excavación se toman como referencia los criterios descritos en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”, específicamente en el punto “2.3.1 Criterios para la determinación del número de puntos de muestreo en área de excavación, cuando el suelo fue retirado”, en su inciso c), el cual menciona que:

- Cuando el área de contaminación es de 1000 m² y hasta 5000 m²: FORMA IRREGULAR:
 - Número de muestras y distribución: una muestra por cada 15 – 20 metros lineales en las paredes del perímetro del área excavada y 2 en el fondo según la superficie (áreas hasta 1000 m²) y 4 o 10 muestras para áreas de hasta 5000 m², según sea el caso.

Para el pasivo ambiental aledaño al Km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta, la excavación será de forma irregular, la cual presentará un área de excavación de 1,539.28m² y un perímetro de 155.10. Tomando en cuenta las dimensiones de la zona a excavar y aplicando el criterio

anteriormente mencionado, obtenemos que en el caso de las paredes deberían de ser por lo menos 11 puntos de muestreo (tomando en cuenta la regla de una muestra cada 15ml) y para el fondo serían 4 muestras ya que el criterio indica entre 4 y 10 muestras para áreas menores a 5,000m² en excavaciones irregulares. En este sitio en particular se realizarán 2 niveles de excavación, uno que va de 0.0 a 2.0 m y otro mas que va de 2.01 a 3.5 m, por lo cual se establece 2 zonas de muestreo de paredes y fondos (una para cada nivel de excavación), en ambas se aplica el mismo criterio de muestreo de acuerdo con la guía, con la finalidad de dar una mayor certeza al muestreo, se define que para cada cara de la excavación irregular se tomará una muestra (una muestra entre vértices del corte), por lo cual, para la excavación de 0.0 a 2.0m se tomarán 21 muestras (16 pared y 5 fondo, incluyen 2 duplicados) y para la excavación de 2.01 a 3.5m se tomarán 7 muestras (4 pared y 3 fondo, incluye 1 duplicado). Lo anterior se puede constatar en la Figura 38 y Tabla 20, cumpliendo con el criterio establecido en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”.

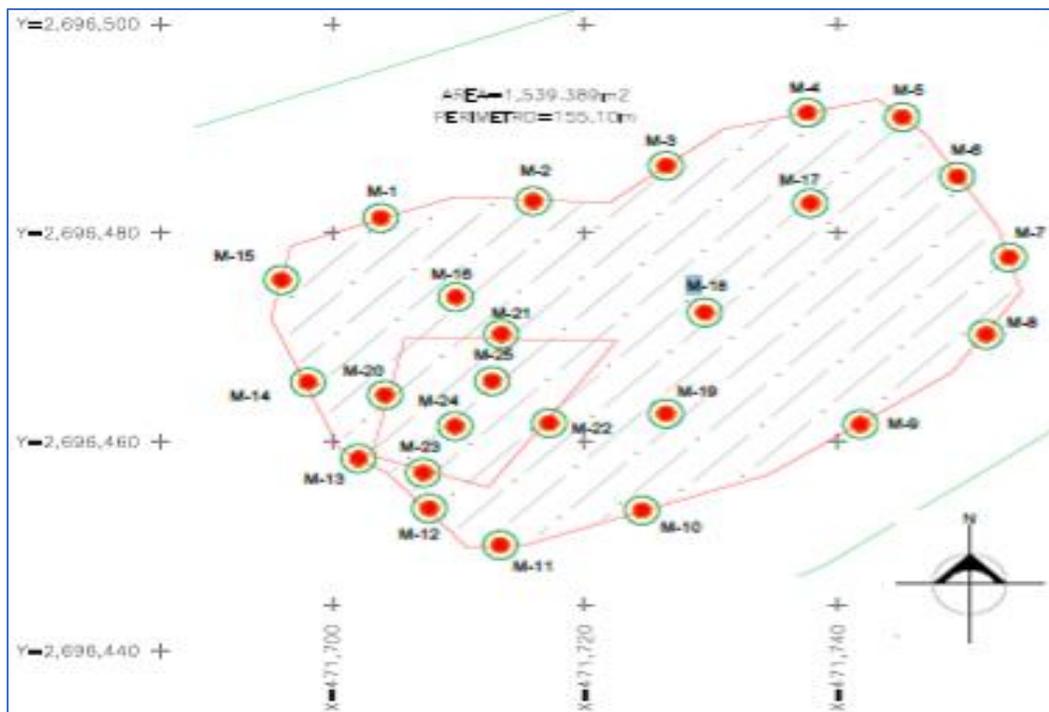


Figura 38. Propuesta de distribución de los puntos de muestreo en paredes y fondos de las excavaciones a realizarse en el pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

Tabla 20. Propuesta de puntos de muestreo final comprobatorio en paredes y fondos del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

NUMERO	ESTE	NORTE	PUNTO DE MUESTREO	UBICACIÓN
PUNTOS DE MUESTREO EN EXCAVACION DE 0.0 A 2.0 M.				
1	471703.84	2696481.40	M-1	PARED
2	471715.89	2696483.05	M-2	PARED

NUMERO	ESTE	NORTE	PUNTO DE MUESTREO	UBICACIÓN
3	471726.43	2696486.40	M-3	PARED
4	471737.60	2696491.44	M-4	PARED
5	471745.11	2696491.01	M-5	PARED
6	471749.54	2696485.37	M-6	PARED
7	471753.61	2696477.66	M-7	PARED
8	471751.71	2696470.24	M-8	PARED
9	471741.84	2696461.70	M-9	PARED
10	471724.50	2696453.40	M-10	PARED
11	471724.50	2696453.40	M-10 DUP	PARED
12	471713.37	2696450.02	M-11	PARED
13	471707.71	2696453.60	M-12	PARED
14	471702.14	2696458.37	M-13	PARED
15	471698.10	2696465.68	M-14	PARED
16	471696.03	2696475.46	M-15	PARED
17	471709.77	2696473.83	M-16	FONDO
18	471737.82	2696482.81	M-17	FONDO
19	471729.46	2696472.38	M-18	FONDO
20	471726.41	2696462.66	M-19	FONDO
21	471726.41	2696462.66	M-19 DUP	FONDO
PUNTOS DE MUESTREO EN EXCAVACION DE 2.01 A 3.5 M.				
22	471706.61	2696468.19	M-20	PARED
23	471720.19	2696469.35	M-21	PARED
24	471714.25	2696458.81	M-22	PARED
25	471704.65	2696458.72	M-23	PARED
26	471710.06	2696460.64	M-24	FONDO
27	471712.69	2696465.83	M-25	FONDO
28	471712.69	2696465.83	M-25 D	FONDO

Ahora bien, en el caso de las biopilas, nos basamos en lo estipulado en el punto “2.3.2 Criterios para la determinación del número de puntos de muestreo en biopilas”, suponiendo que los trabajos de remediación se realizaran como están programados, se proyecta que se instalarán un total de 5 pilas las cuales presentan 3.0m de altura, 4.0 m de base, y 136 m de largo lo cual genera un volumen por cada una de aproximadamente 4,080 m³ de material contaminado abundado (816m³ por biopila)). Tomando en cuenta los criterios del tema 2.3.2 de la Guía donde establece que:

- Por regla general se debe de requerir que se aplique 1 muestra simple por cada 250 – 300 m³, cuando se trate de tratamiento de remediación por biopilas y landfarming con aeración mecánica (con excavadora “mano de chango” o similar, sin cribado industrial previo). La densidad de muestreo de las biopilas puede variar en más o menos 10 – 15 %. La densidad de muestreo de todas las biopilas debe de estar siempre alrededor de 5 - 10 % de la regla general (1 Muestra /250 – 300 m³ ± 5 – 10 %).

Par el caso de las biopilas también se debe considerar el tema “2.3.3 Criterios para la determinación de la localización de puntos de muestreo en biopilas”, el cual indica que una biopila se debe dividir en 4 triángulos de dimensiones semejantes, nombrando cada triangulo con una letra que va de la A

a la D, donde en el caso del triángulo B se considera una profundidad de muestreo a partir de 1.80 m y para los triángulos A, B y C, la profundidad de muestreo es de 0.8m

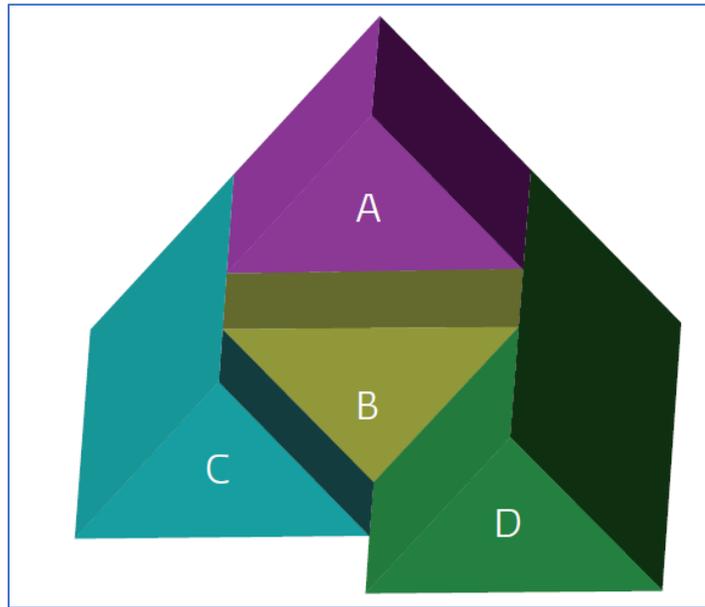


Figura 39. Diagrama de secciones transversales en biopilas para su muestreo de la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestras Finales Comprobatorias”

Tomando en cuenta los criterios anteriores, se estableció que las biopilas serán seccionadas a cada 41.50m, esto con la finalidad de asegurar la condición de 250m³ por muestra, lo que da un resultado de 3.264 muestras por biopila, sin embargo para obtener datos mas confiables de las condiciones de limpieza, se propone realizar el ajuste 4 muestras (más aún porque estas no se pueden fraccionar) por cada biopila. Las muestras estarán distribuidas de acuerdo con el criterio 2.3.3 de la Guía; en total se consideran 22 muestras para las biopilas (incluyen 2 duplicados) la distribución y ubicación de los muestreos se presenta en la Figura 40

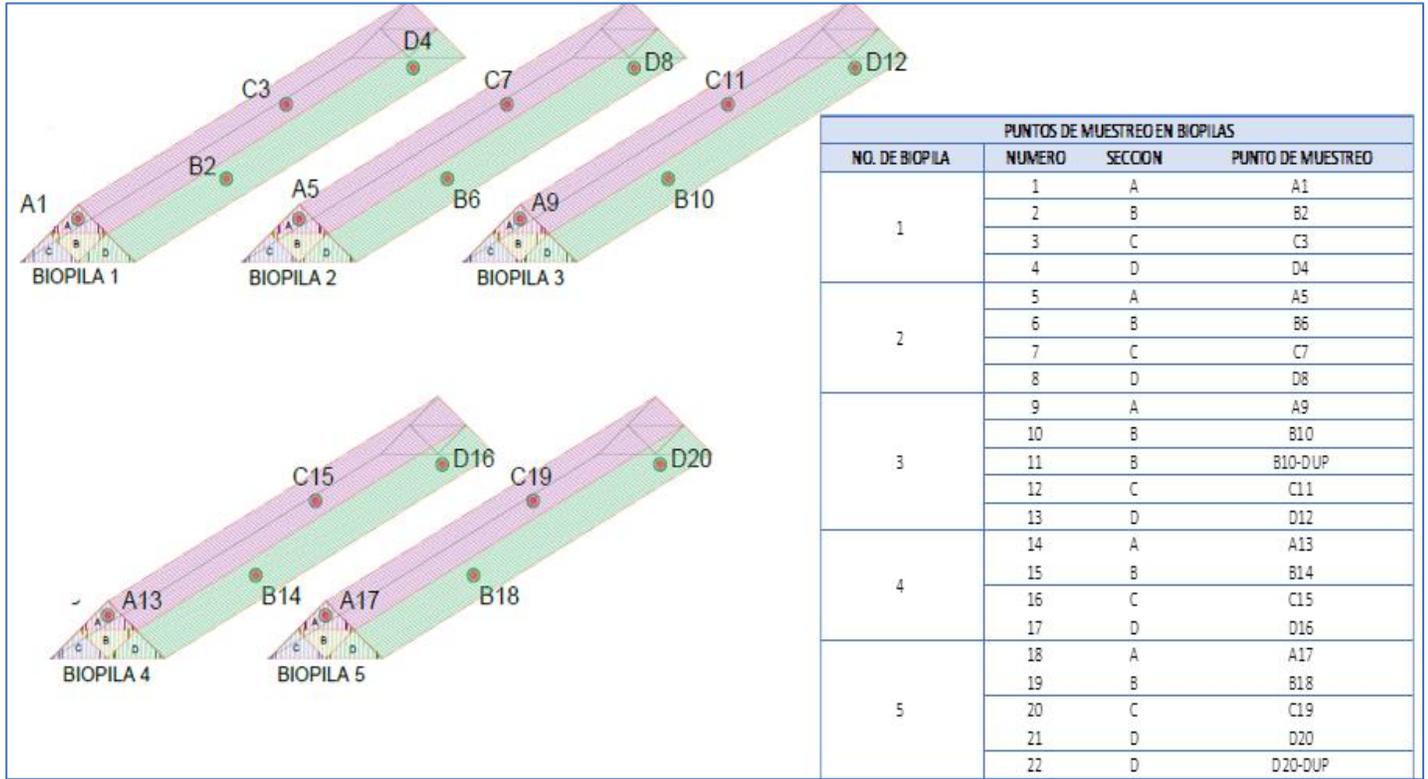


Figura 40. Distribución del Muestreo Final Comprobatorio en biopilas del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

12.4.7 Reacomodo del suelo remediado.

Una vez que se ha verificado que se han alcanzados los niveles de concentración de hidrocarburos propuestos como criterio de limpieza, se procederá a realizar el reacomodo del material ya restaurado fuera de la celda de tratamiento, mediante el uso de maquinaria y camiones, realizando su acomodo en el sitio de donde fue extraído originalmente, procurando no alterar la infraestructura petrolera que ahí existe, reintegrando las condiciones en las que se encontraba el sitio antes de que sucediese la afectación, que eran las de salvaguardar los ductos en operación ahí presentes y que derivado de ello, no pueden realizarse otro tipo de actividad en esta área.

12.4.8 Manejo de residuos generados durante el tratamiento

Los residuos generados antes, durante y después del proceso de extracción y saneamiento durante el desarrollo del proyecto serán recopilados y clasificados de acuerdo con su naturaleza (física, química y/o biológica), donde los subproductos y/o residuos no peligrosos, se colocarán en

contenedores temporales para que cada semana sean dispuestos en el relleno sanitario más próximo al área de trabajo o en el sitio autorizado para esto. Entre estos residuos se encuentran básicamente, envases y embalajes de los materiales empleados en campo.

En el caso de las aguas residuales generadas por los servicios sanitarios móviles que se contrate serán recolectadas y tratadas por el prestador del servicio sanitario contratado.

En este proyecto no se contempla la generación de residuos peligrosos, sin embargo si se diera el caso de contar con residuos que requieran análisis para verificar su grado de peligrosidad, serán nominados y manipulados como “residuos peligrosos”, de manera temporal hasta que los resultados de las pruebas permitan su identificación definitiva para de esta manera ser manejados y dispuestos de acuerdo con la normatividad vigente y aplicable. En todos los casos, el manejo y disposición serán registradas en las bitácoras de campo.

12.4.9 Programa calendarizado de trabajo.

La siguiente tabla contiene el Programa de Actividades que se han de realizar en el sitio para la degradación de los hidrocarburos contenidos en el material, estimando un tiempo de desarrollo de los trabajos de 16 semanas. Dicho programa se muestra a continuación:

Tabla 21. Calendarización de la remediación

Actividad	Semanas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Preparación de la Celda de tratamiento													
Excavación y transporte de material contaminado a la celda													
Biorremediación por BIOPILAS	Surfactante												
	Bacteria												
	Nutrientes												
	Materia orgánica												
Homogenización mecánica del material													
Proceso de tratamiento de suelo													
Monitoreo preliminares	INICIAL				B				B			MFC	
Regreso de suelo remediado al lugar de origen													

Monitoreo preliminar Inicial: Muestreo realizado al inicio de la biorremediación.

Monitoreo preliminar (B): Muestreo de seguimiento de operaciones de biorremediación

Monitoreo Final Comprobatorio (MFC): Muestreo basado en la normatividad ambiental vigente

Industria y Servicios de Coahuila S.A. de C.V.

Muestreo Final Comprobatorio (MFC) para la Atención al
pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de
hidrocarburo en atención a toma clandestina en el OLD 24” Ø
Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000

14 de agosto de 2023

Nombre del documento	Muestreo Final Comprobatorio (MFC) para la Atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo en atención a toma clandestina en el OLD 24" Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000
Responsable técnico de muestreo	Laboratorios y Suministros Ambientales Industriales S. A. de C.V.(LABSA)
Lugar de desarrollo del plan de muestreo	Ejido el Carrizo, en el municipio de Hidalgo, Tamaulipas
Fecha de ejecución	Proyectado para noviembre 2023
Supervisión PEMEX	Ing. Luis Fernando Gallegos Hernández
Responsables de la elaboración del Plan de Muestreo Final Comprobatorio	
NOMBRE DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP	

Contenido

1	Introducción	1
2	Objetivo	2
2.1	Objetivos específicos	2
3	Localización del pasivo ambiental	2
4	Resumen de los trabajos realizados de dimensionamiento de contaminantes	4
4.1	Geología local	4
4.2	Análisis de imágenes satelitales	5
4.3	Recorridos en campo.....	7
4.4	Levantamiento topográfico.	7
4.5	Dimensionamiento de los Compuestos Orgánicos Volátiles mediante la evaluación gasométrica.....	9
4.6	Levantamiento geofísico	11
4.7	Georradar	16
4.8	Plan de Muestreo	19
4.9	Resultados analíticos	23
4.10	Evaluación de la extensión del contaminante en el suelo.....	30
5	Trabajos por realizarse para la remediación del pasivo ambiental	38
5.1	Caminos.....	38
5.2	Celda de tratamiento.....	39
5.3	Cercado Perimetral.....	39
5.4	Desarrollo de la actividad de excavación	40
5.5	Proceso de tratamiento “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado” 41	
6	Diseño del Plan de Muestreo Final Comprobatorio (MFC)	42
6.1	Cantidad y ubicación de puntos de muestreo.....	42
6.2	Muestreo con equipo manual	46
6.3	Llenado y registro de la cadena de custodia	49
6.4	Resultados analíticos	50

7	Conclusiones.....	52
---	-------------------	----

Lista de Tablas

Tabla 1.	Resultados obtenidos de la evaluación gasométrica para el km 304+000	10
Tabla 2.	Geoposicionamiento y longitud de perfiles de tomografía	12
Tabla 3.	Geoposicionamiento y longitud de radargramas.....	17
Tabla 4.	Puntos de muestreo propuestos para la Caracterización de la Atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a toma clandestina en el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000”	20
Tabla 5.	Recipientes para las muestras, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.....	23
Tabla 6.	Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Ligera y BTEX para las muestras de suelo del Km 304+000	24
Tabla 7.	Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Media y HAP’s para las muestras de suelo del Km 304+000	25
Tabla 8.	Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Pesada para las muestras de suelo del Km 304+000.....	27
Tabla 9.	Valores geoestadísticos de las muestras de suelo analizadas para el km 304+000	29
Tabla 10.	Áreas de las capas afectadas por el hidrocarburo	34
Tabla 11.	Volúmenes de suelo contaminado por hidrocarburo.	36
Tabla 12.	Propuesta de puntos de muestreo final comprobatorio en paredes y fondos del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta	44
Tabla 13.	Recipientes para las muestras, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.....	48
Tabla 14.	Métodos analíticos para hidrocarburos	52
Tabla 15.	Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo	52
Tabla 16.	Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo	52

Lista de Figuras

Figura 1.	Ubicación del área de estudio.	3
Figura 2.	Afloramiento de lutita fuertemente foliada con cristalización de calcita.....	4
Figura 3.	Foliación diagonal en lutitas como resultado de esfuerzos de cizalla	4
Figura 4.	Cristalización de calcita en espacios sigmoidales que resultan del esfuerzo de cizalla en las lutitas de la formación Méndez.....	5

Figura 5. Afloramiento de lutitas en la porción occidental dentro de la presa	5
Figura 6. Seguimiento al análisis de imágenes satelitales del sitio, del año 2001 al 2021	6
Figura 7. Recorridos de inspección en la zona afectada.....	7
Figura 8. topografía del área de estudio.	8
Figura 9. Trabajos de evaluación gasométrica.....	9
Figura 10. Dispersión obtenida de la evaluación gasométrica en el KM 304+000.....	11
Figura 11. Instalación y lectura de perfiles de tomografías.....	12
Figura 12. Distribución de las líneas de tomografía en el km 304+000.....	13
Figura 13. TER-5 del km 304+000.....	14
Figura 14. TER-1 del km 304+000.....	15
Figura 15. TER-2 del km 304+000.....	15
Figura 16. TER-3 del km 304+000.....	16
Figura 17. Levantamiento con georradar	16
Figura 18. Distribución de radargramas en el área del pasivo ambiental del km 304+000	17
Figura 19. Radargrama 1 del km 304+000.....	18
Figura 20. Radargrama 2 km 304+000.	19
Figura 21. Radargrama 3 km 304+000.	19
Figura 22. Distribución de puntos de muestreo con base en los resultados de los estudios indirectos del km 304+000.....	21
Figura 23. Secuencia de muestreo para el km 304+000	22
Figura 24. Cadenas de custodia para la toma de muestra del km 304+000.....	23
Figura 25. Dispersión de contaminantes a 1m de profundidad en el km 304+000.....	32
Figura 26. Dispersión de contaminantes a 3.5m de profundidad en el km 304+000.....	33
Figura 27. Stack Maps de la pluma contaminante en el km 304+000.....	37
Figura 28. Croquis ilustrativo de la futura ubicación del camino de acceso	38
Figura 29. Celda de tratamiento.....	39
Figura 30. Propuesta de cerco perimetral.....	40
Figura 31. Propuesta de distribución de los puntos de muestreo en paredes y fondos de las excavaciones a realizarse en el pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta	43
Figura 32. Diagrama de secciones transversales en biopilas para su muestreo de la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”	45
Figura 33. Distribución del Muestreo Final Comprobatorio en biopilas del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta.....	46

1 Introducción

El Muestreo Final Confirmatorio (MFC) es aquel que se realiza al término del proceso de remediación y tiene como finalidad el determinar si se han alcanzado las concentraciones, niveles, límites o parámetros señalados en las normas oficiales mexicanas, que para este caso en específico se aplica la “Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación”, ya que se generó una contaminación de hidrocarburos en suelo. Es por ello que el Muestreo Final Comprobatorio (MFC) es un muestreo que se realiza con la finalidad de determinar si el material ha quedado “limpio”, o no.

Dentro del procedimiento general de la remediación de un sitio, descrito en el Reglamento de la LGPGIR, el Muestreo Final Comprobatorio (MFC) funciona como un “control de salida o de terminación” de la responsabilidad y está asociado al denominado Aviso de Conclusión del Programa de Remediación del Sitio.

Es con base en los resultados del Muestreo Final Comprobatorio (MFC) que se determina por parte de la autoridad competente en la materia, si pueden darse por concluidas las acciones de remediación o no. El criterio que se aplica en ello es la comparación de los resultados de los análisis químicos practicados a las muestras del material en remediación contra los límites máximos permisibles que están establecidos en la “TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo” y la “TABLA 3.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo” de la Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Para llegar a la toma de decisión de si un sitio ha alcanzado los niveles de remediación establecidos previamente se deben establecer los siguientes elementos:

1. Objetivos de cumplimiento.
2. Plan de muestreo y análisis.
3. Toma de muestras y análisis en laboratorio.
4. Análisis estadístico de los datos colectados.
5. Toma de decisión.

2 Objetivo

Mediante la ejecución en campo del Muestreo Final Comprobatorio se confirmará que se ha extraído todo el suelo contaminado dentro de la presa El Carrizo construida en el año de 1996 como parte de la infraestructura petrolera temporal de PEMEX, realizada únicamente para contener parte del producto residual proveniente del ducto por acción de la operación denominada “corrida de diablos” en ese mismo año; de igual manera mediante este MFC se corroborará que se hayan alcanzado los niveles de limpieza del material tratado. Este pasivo se relaciona con el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000, dicha confirmación se realizará con base en los límites máximos permisibles para todas las fracciones de hidrocarburo establecidas en Tabla 2 y Tabla 3 de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

2.1 Objetivos específicos

- Establecer la cantidad y ubicación de los puntos de muestreo en la zona de excavación, así como en la celda de tratamiento tomando como referencia para la selección de la cantidad de puntos la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”.
- Establecer la metodología empleada para toma de muestra, preservación de la misma y llenado de cadena de custodia, para su posterior análisis en un laboratorio Acreditado por la EMA y aprobado por PROFEPA.
- Liberar el sitio de la atención de la emergencia (excavación) para su posterior relleno, teniendo la certidumbre de haber realizado un muestreo estadísticamente confiable

3 Localización del pasivo ambiental

El sitio de estudio corresponde al área aledaña situada en el Km 304+000 del oleoducto de 24" Ø Nuevo Teapa-Cadereyta, tramo Victoria II – Linares. Específicamente en la instalación identificada como Presa el Carrizo I, la cual está situada a una distancia aproximada de 1.00 km al sur del poblado de Estación Carrizos, correspondiente al municipio de Hidalgo, estado de Tamaulipas. Para acceder a este sitio, se localiza a 22.1 km en dirección sureste de la localidad de Estación Santa Engracia, la cual tiene la mayor población dentro del municipio. Y con respecto a Hidalgo, que es la capital del municipio, localizada a 42.4 km en dirección sur. Pertenece a la subregión Victoria No. 4 del Estado de Tamaulipas, a una altitud de 400 metros sobre el nivel del mar. El Municipio cuenta con extensión

territorial de 2,142.43 kilómetros cuadrados, lo que representa el 2.33 por ciento del total de la entidad. Colinda al Norte con el Municipio de Villagrán; al Sur con el de Güémez; y al Este con los de San Carlos y Padilla y al Oeste con el Estado de Nuevo León; está integrado por 128 localidades de las cuales las más importantes son: Hidalgo, Guillermo Zúñiga, Oyama, Independencia, San José de Santa Engracia, Ejido Hidalgo, El Sauz, Cruz y Cruz, Cruz y Carmen, Estación Cruz, Estación Santa Engracia y El Tomaseño.

Este sitio es una presa que contiene hidrocarburo, la cual cuenta con un área aproximada de 864.73 m², esta presa se encuentra aledaña al kilómetro 304+000 del oleoducto de 24” Ø Madero – Cadereyta, tramo Victoria II - Linares. Esta infraestructura petrolera se encuentra ubicada en la porción nororiental del país, en el municipio de Hidalgo, en el estado de Tamaulipas, con las coordenadas siguientes: 2,696,474.18 N y 471,731.84 E. La presa del carrizo (lugar donde se ubica el pasivo ambiental) fue construida en el año de 1996 como parte de la infraestructura petrolera temporal de PEMEX, únicamente para contener parte del producto residual proveniente del ducto por acción de la operación denominada “corrida de diablos” en ese mismo año. Lo anterior con base en la investigación histórica realizada por medio de consultas al personal de mantenimiento de PEMEX Logística, Sector Ductos Victoria.



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

4 Resumen de los trabajos realizados de dimensionamiento de contaminantes

4.1 Geología local

Las rocas aflorantes en el sitio están constituidas por lutitas pertenecientes a la Formación Méndez (Cretácico Superior, Campaniano - Maestrichtiano). Estas rocas presentan una coloración amarillo verdoso que al intemperizarse se tornan en color amarillo claro. Presentan una fuerte foliación (Figura 2) cuya orientación coincide con el rumbo tectónico de la Sierra Madre Oriental, esto es con rumbo NNW-SSE, por lo que se consideran resultado de los esfuerzos tectónicos ocurridos durante la Orogenia Laramide (aprox. hace 70 millones de años).

Adicionalmente a la foliación principal, se han desarrollado esfuerzos de cizalla con orientación diagonal que dan como resultado la disgregación de la roca en fragmentos con formas romboidales (Figura 3). Derivado de los esfuerzos anteriormente mencionados también se han generado los espacios donde ha ocurrido la cristalización de calcita (CaCO_3) formando cuerpos sigmoidales (Figura 4), con tonalidades amarillas debido a la presencia de óxidos de hierro (limonita). El mejor afloramiento del sitio se ubica dentro de la presa, formando una pequeña protuberancia en su porción occidental y cubre escasos 15 m^2 aproximadamente (Figura 5). Desde el punto de vista hidráulico, esta roca es de baja permeabilidad debido a su composición altamente arcillosa, ya que las fracturas tienden a cerrarse hacia la profundidad. Sobre yaciendo parcialmente a las lutitas se han desarrollado suelos arcillosos de color café claro. El espesor promedio de la cubierta edáfica es de 1.6 m.



Figura 2. Afloramiento de lutita fuertemente foliada con cristalización de calcita



Figura 3. Foliación diagonal en lutitas como resultado de esfuerzos de cizalla

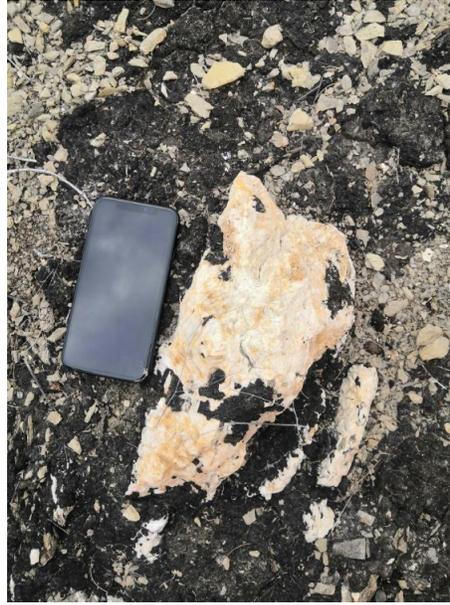


Figura 4. Cristalización de calcita en espacios sigmoidales que resultan del esfuerzo de cizalla en las lutitas de la formación Méndez



Figura 5. Afloramiento de lutitas en la porción occidental dentro de la presa

4.2 Análisis de imágenes satelitales

Ante cualquier emergencia ambiental por derrame de hidrocarburo, Industrias y Servicios de Coahuila S.A. de C.V. (ISC) cuenta con una secuencia planeada y organizada de actividades para llevar a cabo la evaluación del sitio, con el objetivo de determinar la naturaleza y distribución de contaminantes sobre y debajo de la superficie. La primera fase de los trabajos consiste en el análisis de la información documental e histórica disponible, en donde se analiza a través de fotografías

satelitales la historia del terreno, actividades desarrolladas en el sitio, poblaciones cercanas, información hidrogeológica; así como los recorridos en campo para conocer la topografía del terreno, condiciones físicas y búsqueda de indicios de contaminantes (manchas superficiales, olores, vapores, vegetación quemada, etc.). Con esta información, es posible estimar el área posiblemente impactada sobre la cual se aplicará metodología de evaluación indirecta (geofísica), para obtener una visión más definida de la distribución del contaminante.



Figura 6. Seguimiento al análisis de imágenes satelitales del sitio, del año 2001 al 2021

Derivado del análisis de imágenes satelitales obtenidas del software GoogleEarth Pro, se seleccionaron las imágenes de los años 2001, 2014, 2016 y 2021 que son consideradas las de mayor relevancia (Figura 6), donde se logra apreciar claramente la zona del pasivo ambiental que en su momento fue utilizada como una presa de desfogue de producto proveniente de la T.R.D.E. Carrizos que se encuentra aproximadamente a 54.00 m al este del pasivo. En la imagen del 2001 se aprecia que la zona aledaña a la presa se empleaba como zona de cultivo y con el paso de tiempo se dejó de realizar la actividad en el terreno, donde posteriormente se fue cubriendo de vegetación secundaria, sin mostrar algún otro cambio significativo en la comparativa de las imágenes. Al norte del pasivo se aprecia un arroyo de temporada bien definido, el cual está cubierto por una densa capa arbórea, característica de este tipo de cuerpos de agua, dicho arroyo no presenta algún indicio de impacto por hidrocarburo, en el momento del recorrido se encontraba sin agua. Al parecer el pasivo se ha mantenido contenido en esta estructura (presa), sin que se tenga mayor contacto con las personas o animales.

4.3 Recorridos en campo

Una vez tomado en cuenta el análisis de las imágenes satelitales, se procedió a realizar una inspección visual en el sitio. Una vez en el punto se identificaron los rasgos naturales y antropogénicos aledaños al sitio para considerar durante la ejecución de los trabajos. Asimismo, se establecieron los puntos idóneos para la colocación de los dispositivos de prospección geofísica para cuantificar de manera indirecta la presencia de contaminantes en el subsuelo. En el caso de las aguas superficiales, tal como se identificó mediante el análisis de las imágenes satelitales, durante el camino se pudieron apreciar varios sitios denominados "vados" por donde fluye de manera temporal el agua proveniente de las lluvias acaecidas en la región, uno de ellos se localiza aproximadamente a unos 50m del punto, sin embargo, no entra en contacto con el material contenido en la presa, dado que está rodeada de bordos que impiden dicho contacto.

Derivado de la inspección en el sitio, se determinó un área de trabajo de limpieza y despalme de 5,000 m², esto en base en la afectación superficial al suelo en el sitio ya que el hidrocarburo provocó un "embarramiento" dentro de la presa, sin embargo, se considera unos metros más allá del límite de esta.



Figura 7. Recorridos de inspección en la zona afectada.

4.4 Levantamiento topográfico.

Para el levantamiento que se realizó en este sitio se utilizó el equipo GPS Topográfico Marca CHCNAV Modelo X91 Receptor Base y Receptor Rover con accesorios y Cables de conexión, con sus soportes (tripie) y bastón del Rover

Los trabajos de control terrestre se llevan a cabo desarrollando las actividades siguientes:

- Reconocimiento del sitio de los trabajos: Se realizaron recorridos por toda el área de trabajo con el fin de conocer a detalle el sitio y las zonas donde se requiriera una mayor precisión en el levantamiento.
- Ubicación de puntos de control: Estos se instalaron dentro del área de trabajo, previo al reconocimiento del sitio de los trabajos eligiendo la zona en donde se colocará dicho punto. Con este punto de control nos permitió georreferenciar correctamente y ubicar en el mismo sistema de coordenadas los datos que se obtengan durante el levantamiento topográfico así como lo son los métodos indirectos.
- Instalación de equipo y levantamiento de condiciones estructurales y curva de niveles en área de influencia
- Levantamiento de puntos el cual consistió en identificar los rasgos antropogénicos y naturales de la zona de

Posteriormente, los datos obtenidos en campo se procesaron mediante diversos programas de cómputo, entre los cuales se encuentran: SurvCE, bloc de notas de Microsoft, Civil Cad (Modulo instalado en AutoCAD 2014), AutoCAD 2015. El polígono de estudio abarcó un área aproximada de 0.5 Ha.

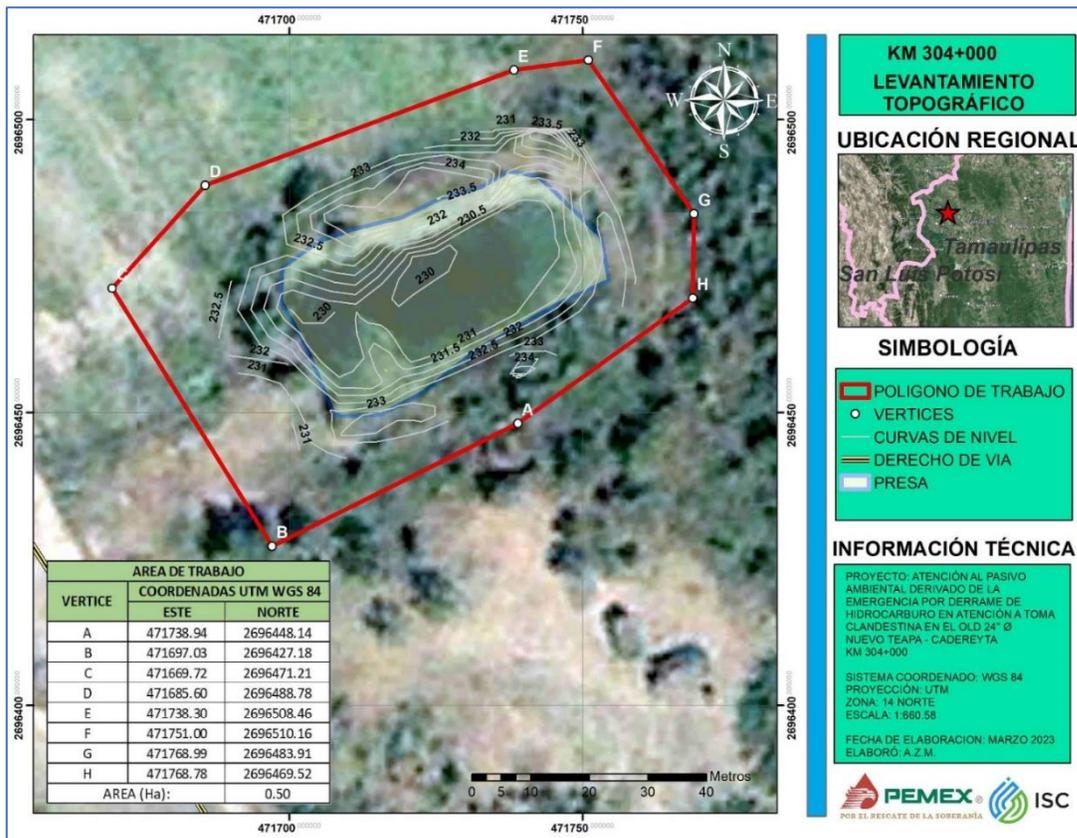


Figura 8. topografía del área de estudio.

4.5 Dimensionamiento de los Compuestos Orgánicos Volátiles mediante la evaluación gasométrica.

Otra de las etapas de las evaluaciones primordiales para determinar la extensión del contaminante, fue mediante la determinación de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) a través de Gasometrías, el cual es un método adecuado para determinar de forma rápida la extensión de un derrame de hidrocarburos líquidos volátiles y semi volátiles en el suelo y subsuelo. Se realizaron un total de 50 gasometrías distribuidas de manera uniforme sobre el área de trabajo. Para ello, se realizó la perforación de pozos en el suelo mediante una perforadora Power Probe 9780D hasta una profundidad de 1.00 m, colocando dentro la perforación un tubo de PVC de 2" de diámetro, el cual fue hincado para asegurar su preservación, posteriormente fue tapado en su parte superior (a nivel del suelo), sellando el espacio entre las paredes del pozo y el tubo de PVC con la finalidad de evitar toda pérdida de estos vapores, siendo el objetivo de esta instalación captar en el transcurso de 24 horas todos aquellos Compuestos Orgánicos Volátiles provenientes de la degradación natural de materia orgánica, así como aquellos COV's provenientes de la degradación de agentes externos al medio natural, que en este caso son los hidrocarburos derramados en el suelo que afectan las concentraciones naturales de estos compuestos. Para las mediciones de las concentraciones de COV's capturados en los tubos hincados se utilizó el equipo MiniRAE 3000.

FOTOGRAFIA DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP



Figura 9. Trabajos de evaluación gasométrica

Tabla 1. Resultados obtenidos de la evaluación gasométrica para el km 304+000

GASOMETRIA	X	Y	COV's (ppm)	GASOMETRIA	X	Y	COV's (ppm)
GS-1	471684.95	2696476.32	187	GS-26	471722.71	2696482.26	319
GS-2	471688.76	2696466.24	169	GS-27	471727.62	2696484.72	303
GS-3	471693.50	2696455.83	140	GS-28	471731.26	2696486.66	337
GS-4	471697.22	2696446.60	235	GS-29	471736.68	2696488.44	338
GS-5	471704.34	2696439.74	209	GS-30	471744.13	2696490.73	372
GS-6	471719.49	2696442.70	152	GS-31	471750.40	2696485.39	497
GS-7	471728.30	2696448.12	136	GS-32	471742.86	2696481.84	462
GS-8	471737.86	2696452.53	163	GS-33	471736.09	2696479.21	458
GS-9	471750.31	2696460.23	101	GS-34	471732.70	2696477.35	538
GS-10	471759.54	2696469.54	212	GS-35	471727.54	2696474.47	671
GS-11	471764.53	2696477.16	102	GS-36	471721.69	2696472.19	745
GS-12	471758.95	2696485.63	251	GS-37	471714.92	2696469.31	772
GS-13	471753.61	2696492.91	159	GS-38	471709.33	2696466.68	767
GS-14	471746.84	2696497.65	135	GS-39	471705.69	2696464.14	518
GS-15	471742.18	2696501.56	221	GS-40	471701.12	2696461.60	369
GS-16	471733.97	2696497.67	174	GS-41	471704.59	2696454.07	421
GS-17	471722.03	2696492.59	182	GS-42	471711.19	2696456.69	632
GS-18	471708.91	2696488.44	157	GS-43	471716.27	2696459.91	660
GS-19	471697.99	2696484.21	258	GS-44	471721.86	2696461.86	571
GS-20	471690.45	2696481.16	125	GS-45	471727.87	2696464.23	539
GS-21	471697.31	2696469.48	305	GS-46	471732.95	2696467.44	429
GS-22	471701.46	2696471.68	581	GS-47	471738.03	2696470.32	551
GS-23	471705.52	2696474.13	481	GS-48	471743.96	2696473.29	480
GS-24	471711.03	2696476.76	710	GS-49	471749.29	2696476.33	436
GS-25	471717.97	2696479.72	364	GS-50	471755.48	2696478.87	453

Los resultados muestran que los valores naturales del suelo se asocian a las gasometrías que van de la GS-1 a la GS-20 donde no se muestran valores por encima de los 260 ppm de COV's, por lo que todo valor por encima de los 300 ppm COV's es considerado como zona de impacto, recordando que este es un método indirecto el cual solo confirma la presencia o ausencia de los hidrocarburos, no pudiendo estimar de manera directa la concentración de estos en el suelo. El valor máximo reportado es de 772 ppm de COV's ubicándose en la parte oeste de la presa, cercana a la tubería de desfogue de los hidrocarburos provenientes de la estación de PEMEX T.R.E.D. Carrizos. Es importante mencionar que la edad del pasivo y los tipos de contaminantes presentes, generan que las lecturas de Compuestos Orgánicos Volátiles no sean altas, por encima de 1,000 ppm, como en algunos otros sitios donde hemos desarrollado este tipo de metodologías indirectas, ya que con el tiempo y el intemperismo los mismos vapores que puede emitir un hidrocarburo absorbido por el suelo, van disminuyendo. El valor promedio de las lecturas gasométricas está en 370.94 ppm de COV's y el valor más bajo en las gasometrías es de 101 ppm de COV's. Según la dispersión obtenida de los Compuestos Orgánicos Volátiles para el km 304+000, pareciera indicar que el hidrocarburo en su mayoría se encuentra contenido en la misma presa de desfogue hasta el límite con los taludes de esta.

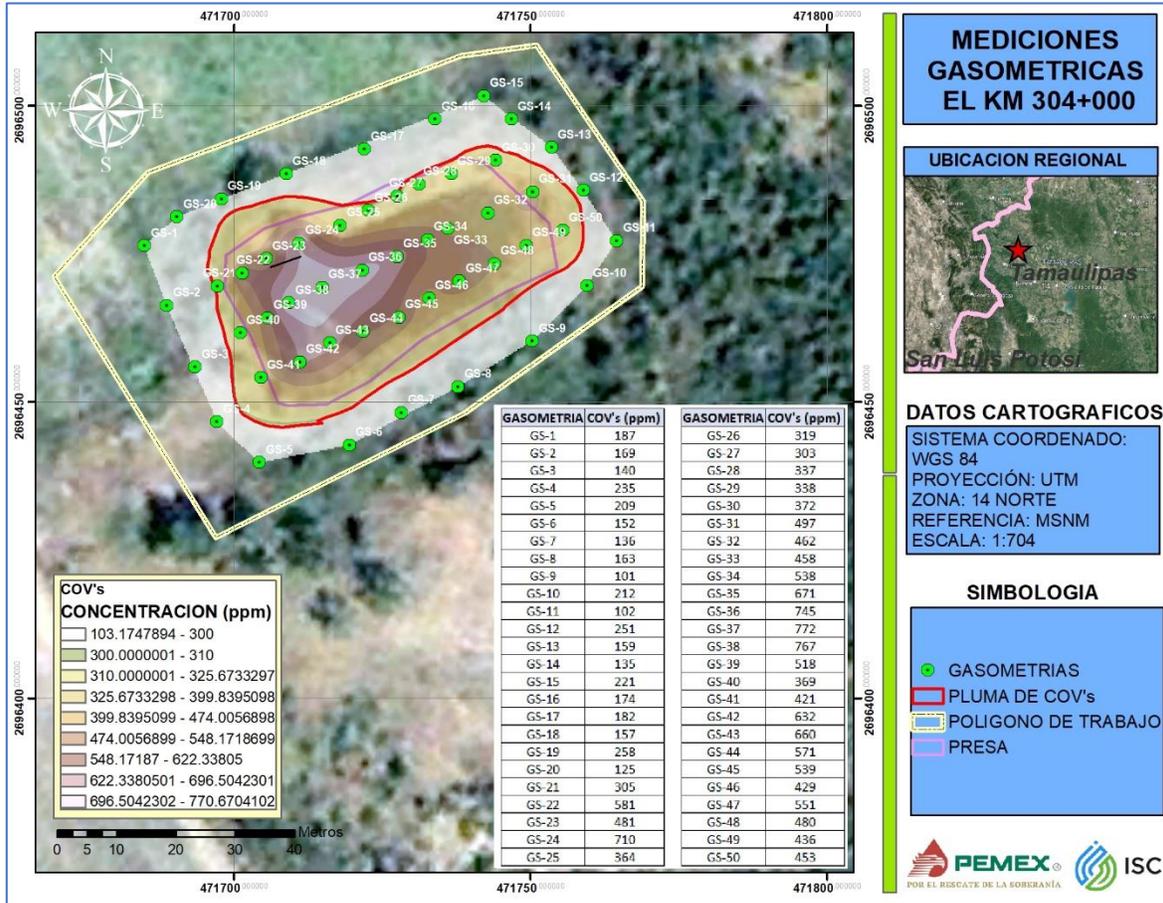


Figura 10. Dispersión obtenida de la evaluación gasométrica en el KM 304+000

4.6 Levantamiento geofísico

La tomografía tiene por objetivo específico, determinar la distribución de la resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de exploración. En el caso de los trabajos realizados en campo se utilizó un arreglo Dipolo-Dipolo, en el cual se forman dos dipolos, uno denominado “de corriente” por el cual se inyecta la energía al terreno y el otro llamado “de potencial” a través del cual se miden las diferencias de potencial a varias distancias. El equipo que se utilizó fue el Resistivímetro Syscal Pro-Switch 24, con un procesamiento de datos con el programa RES2DINV el cual usa la técnica de inversión de los mínimos cuadrados con restricción de alisado para producir el modelo 2D del subsuelo con solamente los datos de resistividad aparente.



Figura 11. Instalación y lectura de perfiles de tomografías

Se ejecutaron en total 7 tomografías cumpliendo un volumen de trabajo de 414.00 metros lineales en total, estas líneas de estudio fueron dispuestas de la siguiente manera; TER-1 (69.00 m), TER-3 (69.00 m), TER-4 (69.00 m) y TER-5 (69.00 m) de Noreste – Suroeste, la TER-2 (46.00 m) Sureste – Noroeste, TER-6 (46.00 m) y TER-7 (46.00 m) Noroeste - Sureste.

Tabla 2. Geoposicionamiento y longitud de perfiles de tomografía

TOMOGRAFIA EN KM 304+000					
LINEA	COORDENADAS UTM WGS84				LONGITUD
	INICIO		FIN		
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	
TER-1	471747.11	2696488.50	471693.86	2696452.04	69.00
TER-2	471738.90	2696455.73	471714.06	2696489.93	46.00
TER-3	471751.95	2696495.62	471689.79	2696465.48	69.00
TER-4	471764.86	2696478.88	471702.91	2696448.44	69.00
TER-5	471743.01	2696499.82	471680.18	2696471.06	69.00
TER-6	471697.26	2696482.49	471718.34	2696441.50	46.00
TER-7	471731.36	2696498.59	471758.88	2696461.69	46.00
				TOTAL (ML):	414.00

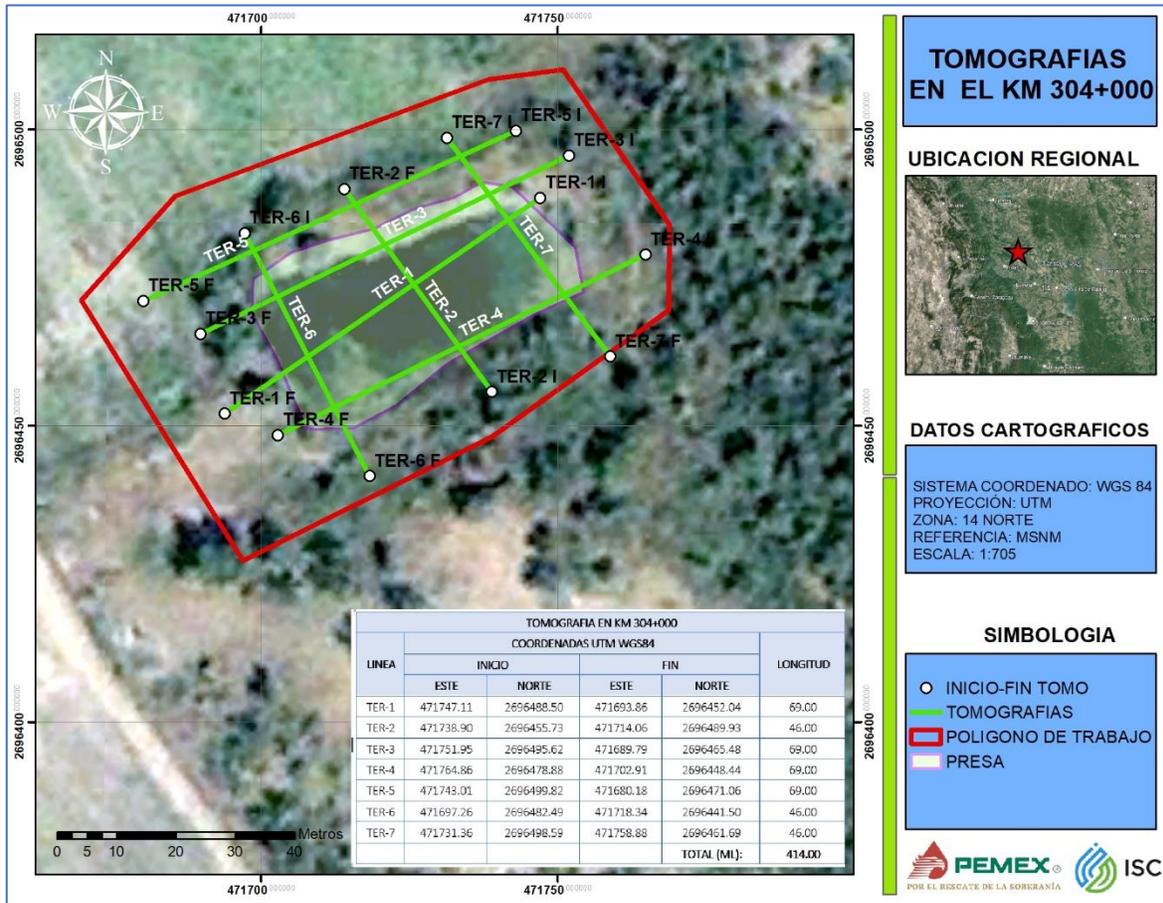


Figura 12. Distribución de las líneas de tomografía en el km 304+000

Para obtener una buena calidad de datos en los métodos indirectos es importante considerar los sitios “limpios” o alejados de la zona de contaminación, con la finalidad de determinar la resistividad real de suelo y de esta manera identificar con mayor certeza las zonas anómalas que pudieran relacionarse con la presencia de contaminante. Para determinar la resistividad natural del suelo se ejecutó la tomografía TER-5 (Figura 13), misma que nos sirve como calibración en este sitio. Esta línea tiene una longitud de 69.00 metros y una profundidad aproximada de investigación de 11.90 metros, registrando un rango resistivo de 13.1 hasta 204 Ohm*m relacionándolo con la presencia de materiales como arcilla y limo, los cuales se encuentran únicamente en los primeros 0.75 metros de profundidad en promedio, teniendo un rango de resistividad que va de los 13 a los 40 Ohm*m aproximadamente, por otro lado también se registran valores que se asocian a la presencia de lutitas, mismas que se encuentran por debajo de la capa de limos y arcillas, cabe mencionar que en algunas zonas es posible apreciar el afloramiento de las mismas, registrando un rango de resistividad que va de los 40 a los 204 Ohm*m según la escala de resistividades de la TER-5.

Cabe mencionar que el rango resistivo registrado en toda la zona de estudio va de los 13.00 a los 583.00 Ohm*m. Las resistividades más bajas se registran en la zona somera, también las lutitas registran valores relativamente bajos (40 Ohm*m) ya que es muy probable que se encuentren con presencia de humedad.

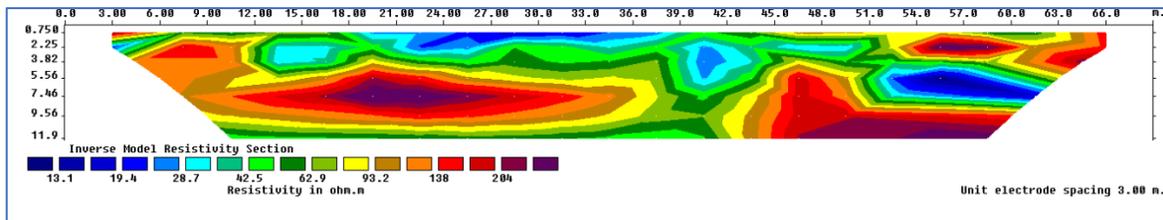


Figura 13. TER-5 del km 304+000

Como resultado del análisis de la información geoelectrica obtenida se registró un rango de resistividad donde podemos determinar la presencia de suelo impactado con hidrocarburo, mismo que se identificó en campo por medio de análisis organoléptico (observación en cambios de coloración en roca y suelo, olor en la zona de estudio y acumulaciones de hidrocarburo en el sitio en general, mismo que se encuentra bien delimitado).

De acuerdo con lo anterior es posible decir que el registro de resistividad del suelo contaminado se encuentra en un rango que va de los 18.00 hasta los 50.00 Ohm*m, esto se puede decir ya que las resistividades de los suelos son modificadas al tener contacto con algún otro material, que en este caso es un hidrocarburo, mismo que actúa alterando la resistividad tanto del suelo como de la roca, por tal situación es que el rango resistivo de los materiales impactados tiene valores tanto de arcillas y limos como de la propia roca, para identificar el suelo que se encuentra posiblemente impactado, podemos verlo en las imágenes de tomografía dentro de la escala de colores en tonos azules y verde, este comportamiento resistivo se observa en la parte central de las imágenes de tomografía, mismas que se ejecutaron dentro de la presa.

En el caso de la TER-1 se registró el rango resistivo en el cual se determina pertenece al suelo impactado (19.00 a 50.00 Ohm*m), mismo que se encuentra entre los 10.50 y 58.50 metros de acuerdo con la escala horizontal de la imagen, es posible relacionar esto basado en los resultados, así como en las observaciones realizadas en campo, ya que el contaminante es visible en toda la zona y que de acuerdo con la imagen estos valores “anómalos” llegan a una profundidad aproximada de 3.82 metros en promedio, sin embargo, podemos observar que en la zona Suroeste de la presa se registran valores similares a los de la zona impactada, aunque por otro lado podría tratarse un

estrato saturado con agua, por lo cual se propone realizar 4 puntos de muestreo con base a estos resultados y con la finalidad de definir si se trata de contaminante o bien otro tipo de material, así como una profundidad máxima de muestreo de 10.00 metros, ya que dichos valores se logran observar hasta los 9.54 metros de profundidad.

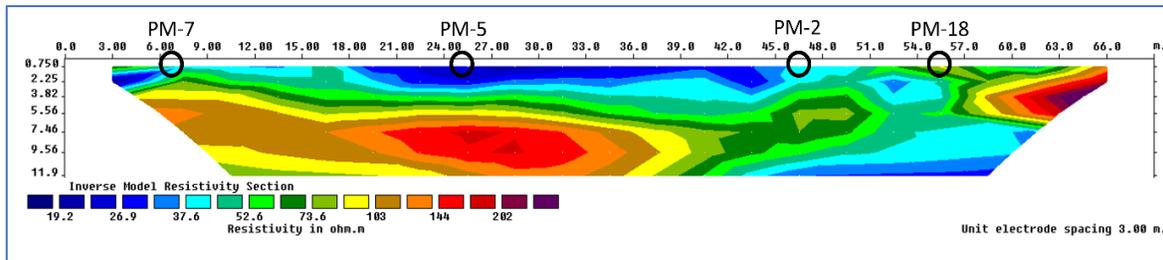


Figura 14. TER-1 del km 304+000

Para el caso de la TER-2 se observa una gran similitud con la TER-1, ya que se registró una primera capa la cual guarda una resistividad que indica la posible presencia de contaminante, aunque en este caso el rango resistivo se encuentra en la escala colorimétrica que va desde el azul hasta el color verde claro, esta misma zona se correlaciona directamente con la línea anterior ya que como se mencionó se cruzan en el centro, cabe mencionar que de igual manera se identifica una zona posiblemente saturada, la cual se encuentra fuera del área de la presa, encontrándola a partir de los 33.00 metros y a una profundidad inicial de 3.70 y con limite a los 6.37 metros, se propone realizar perforaciones en los metros 9.00 y 30.00 ubicados de acuerdo con la escala horizontal.

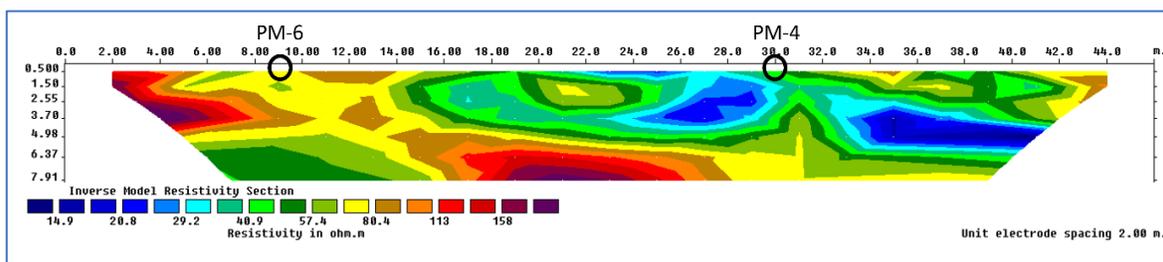


Figura 15. TER-2 del km 304+000

Por ultimo en la TER-3 se registraron valores de resistividad que de igual manera se asocian a la presencia de contaminantes, estos valores se encuentran desde la capa superficial y se registro en un rango de resistividad que va de los 18.00 a los 48.00 Ohm*m donde se propone realizar 3 puntos de muestreo, el primer punto se propone a los 3.00, el segundo a 34.50 y el tercero a 54.50 esto

basado en la escala horizontal de la tomografía, proponiendo realizar la toma de muestra hasta una profundidad máxima de 10.00 metros ya que como se mencionó anteriormente el contaminante tiende a modificar las propiedades resistivas de los materiales y es importante identificar las zonas que presentan valores que pudieran estar asociados a la presencia de materiales contaminados.

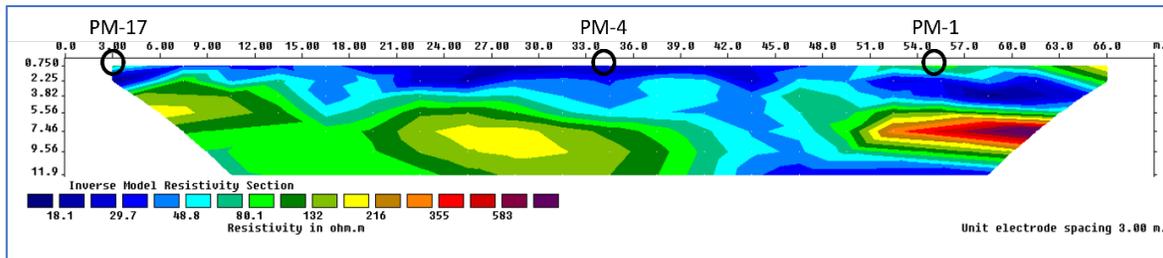


Figura 16. TER-3 del km 304+000

4.7 Georradar

Se trata de una técnica no destructiva que proporciona una imagen del subsuelo midiendo las diferencias en las propiedades electromagnéticas de los materiales, basado en la emisión de ondas de corta duración y en la reflexión de dichas ondas en el medio. El equipo empleado es un Georradar Quantum Imager Triple Frequency Stepped Pulse System Radar Inc.

Con la finalidad de reforzar la información obtenida por medio de las tomografías de resistividad eléctrica, se llevaron a cabo estudios electromagnéticos por medio del georradar, se realizaron un total de 13 recorridos, generando un volumen de trabajo de 405.55 metros lineales y siendo estos ejecutados principalmente con orientación de Norte a Sur y de Oeste a Este, los recorridos con georradar fueron ubicados de manera estratégica con la finalidad de cubrir la mayor área posible.



Figura 17. Levantamiento con georradar

Tabla 3. Geoposicionamiento y longitud de radargramas

GEORRADAR EN KM 304+000					
LINEA	COORDENADAS UTM WGS84				LONGITUD
	INICIO		FIN		
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	
RD-1	471743.27	2696485.22	471720.46	2696474.10	25.38
RD-2	471744.97	2696479.49	471717.09	2696465.22	31.33
RD-3	471747.74	2696474.75	471719.63	2696460.29	31.61
RD-4	471740.24	2696485.57	471745.51	2696470.22	16.23
RD-5	471732.09	2696481.70	471737.24	2696466.38	16.17
RD-6	471725.12	2696477.13	471730.20	2696463.09	14.93
RD-7	471720.89	2696476.52	471723.66	2696459.47	17.26
RD-8	471738.58	2696485.78	471701.77	2696470.72	39.78
RD-9	471699.87	2696471.72	471711.85	2696449.51	25.23
RD-10	471684.22	2696472.71	471703.44	2696438.77	39.01
RD-11	471761.36	2696471.83	471705.95	2696441.34	63.25
RD-12	471739.80	2696503.29	471687.04	2696475.93	60.69
RD-13	471749.36	2696496.29	471761.59	2696475.81	24.69
				TOTAL (ML):	405.55

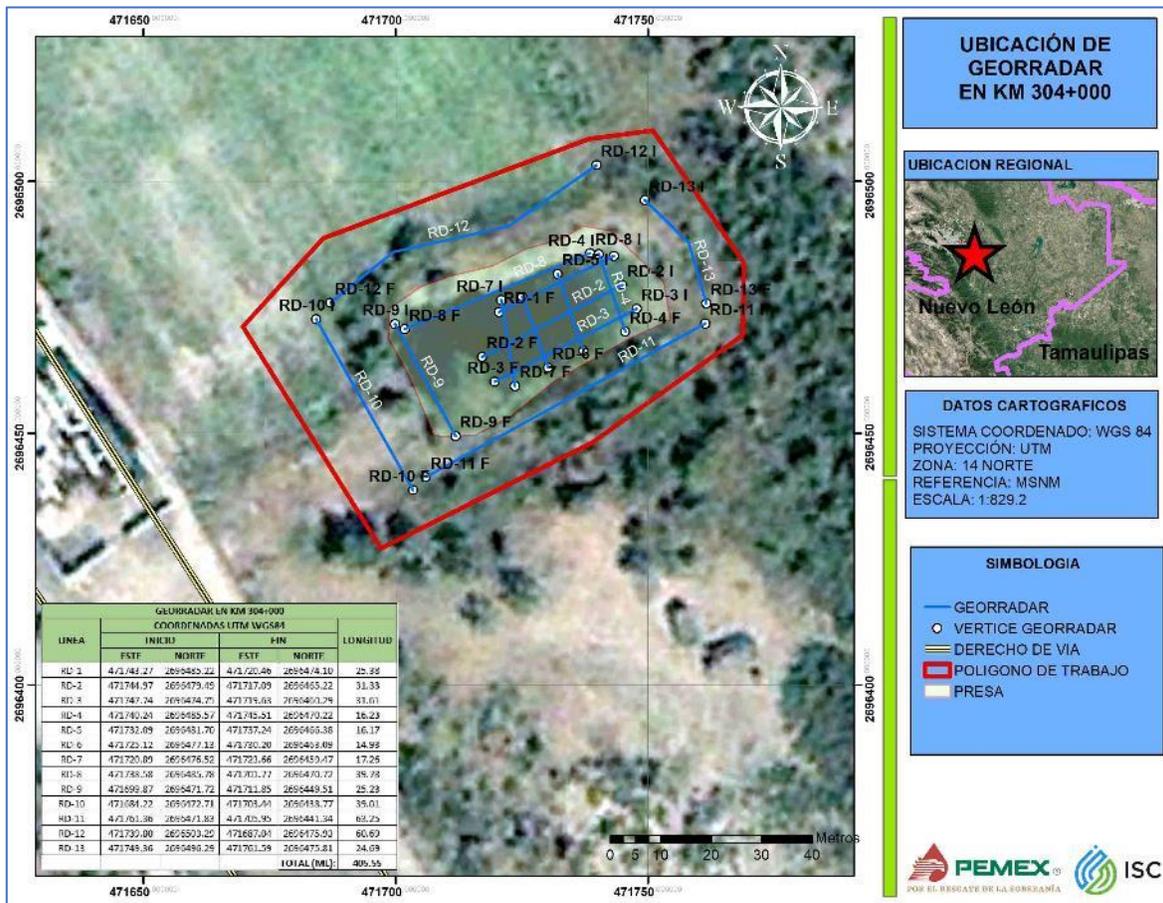


Figura 18. Distribución de radargramas en el área del pasivo ambiental del km 304+000

En general se logró identificar en los radargramas la zona con presencia de humedad preferentemente a partir de los 1.80 m de profundidad, en la zona Oeste de la presa donde se observan reflejos de onda representativos de presencia de humedad, de igual manera en los radargramas se logró identificar la primera capa de lutitas impactadas, las cuales están directamente asociadas a las características del sitio.

Cabe mencionar que las anomalías registradas en las tomografías llegan hasta los 6.00 m aproximadamente, sin embargo, en el caso de los radargramas no es posible definir con exactitud alguna anomalía, por otro lado, si se logra definir un límite somero de contaminación en las lutitas el cual preferentemente llega hasta los 0.80 m aproximadamente.

En el caso del RD-1 podemos observar lo que se mencionó anteriormente sobre las lutitas, así como la capa de contaminación superficial únicamente que en este caso se observa aproximadamente un espesor de 0.50 m, en este radargrama no se logra detectar la presencia de la zona saturada. Es importante comentar que para el caso de la contaminación por debajo de la capa superficial, profundidades mayores al 0.50 m, no es posible lograr su detección con esta técnica indirecta, ya que las concentraciones del hidrocarburo disminuyen conforme aumenta la profundidad, llegando a ser adherido a las partículas del subsuelo e integrándose como parte de este.

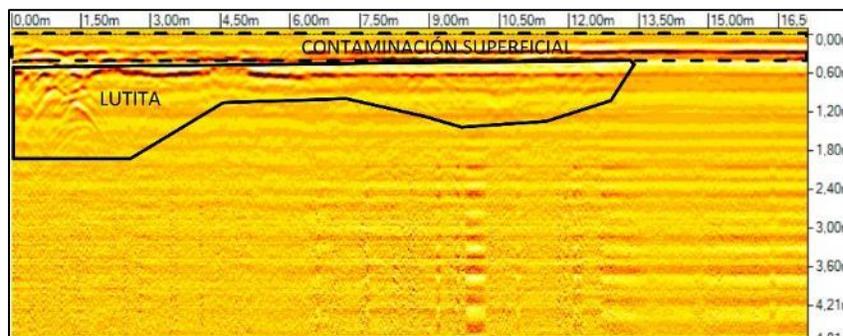


Figura 19. Radargrama 1 del km 304+000.

A diferencia con en el RD-1, en el caso del RD-2 podemos observar la zona con presencia de humedad a partir de los 1.80 metros de profundidad, comenzando en los 20.00 m de longitud del radargrama hasta el final del registro, sin embargo no es constante, no son acumulaciones de agua y no representan un sistema geohidrológico considerable. Al igual que en el RD-1 se logra observar la anomalía generada por la lutita con presencia de hidrocarburo. La mayor concentración de contaminación se encuentra en la parte superficial, llegando hasta una profundidad aproximada 0.80

metros esto de acuerdo con el registro, esto tratándose principalmente del hidrocarburo en su fracción pesada que es lo que se logra observar en superficie.

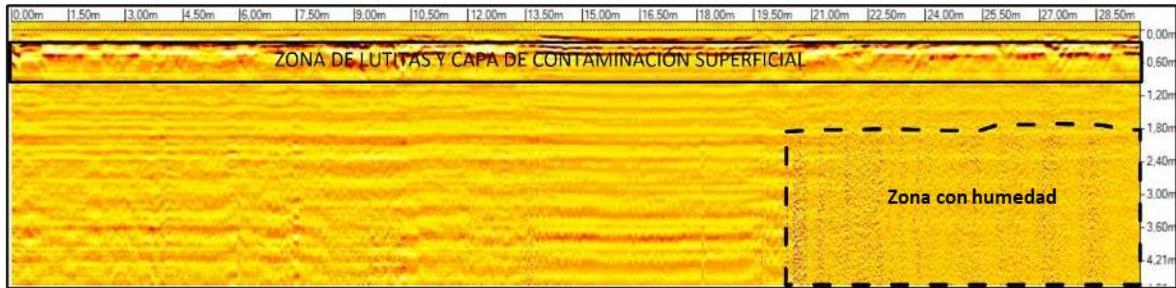


Figura 20. Radargrama 2 km 304+000.

En el RD-3 se logran observar únicamente rasgos de la zona de lutitas y de la capa de contaminación que se ha mencionado anteriormente.



Figura 21. Radargrama 3 km 304+000.

4.8 Plan de Muestreo

Con base en los resultados anteriormente presentados y con la finalidad de dar cumplimiento a la norma “NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.”, se propuso y ejecutó un muestreo dirigido, el cual con base en el numeral 4.11 de la presente norma lo define como el muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados cuando se cuenta con información previa del sitio o es evidente la extensión de la afectación, que para este

caso se cumplen los dos puntos ya que se cuenta con una primera aproximación por los resultados de los métodos geofísicos, además de que era evidente la afectación generada.

Bajo esta información se estableció que los parámetros a analizar de las muestras durante la ejecución del plan de muestreo fueron las Fracciones Pesada, Media y Ligera, así como los Hidrocarburos Específicos BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos) y HAP’s (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), esta definición se da con base a lo establecido en la “*Tabla 1. Hidrocarburos que deberán analizarse en función de producto contaminante*” de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (*Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y especificaciones para la remediación*).

De acuerdo con la “Tabla4. Número mínimo de puntos de muestreo de acuerdo con el área contaminada” establecida en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, tomando en cuenta que el área superficial establecida fue de 0.5 ha, indica que la cantidad de puntos a muestrear es de 15, sin embargo, para este caso en particular se perforaron 18 puntos de muestreo obteniendo con esto 81 muestras de suelo las cuales incluyen sus duplicados a cada 10 muestras.

Tabla 4. Puntos de muestreo propuestos para la Caracterización de la Atención al pasivo ambiental derivado de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a toma clandestina en el OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000”

PUNTO	COORDENADAS UTM WGS84		PROFUNDIDADES DE MUESTREO				
	ESTE	NORTE	1.0M	3.5M	6.5M	8.5M	10.0M
PM-1	471702.83	2696471.67					
PM-2	471708.25	2696461.14					
PM-3	471712.18	2696452.99					
PM-4	471721.41	2696479.81					
PM-5	471726.12	2696473.32					
PM-6	471733.68	2696462.91					
PM-7	471740.97	2696485.71					
PM-8	471748.73	2696475.30					
PM-9	471747.42	2696505.08					
PM-10	471725.28	2696491.70					
PM-11	471688.69	2696483.33					
PM-12	471696.34	2696478.46					
PM-13	471709.49	2696439.40					
PM-14	471736.92	2696453.44					
PM-15	471756.69	2696464.62					
PM-16	471761.67	2696477.31					
PM-17	471749.15	2696494.27					
PM-18	471700.79	2696456.79					

El muestreo se realizó con equipo mecánico Power Probe 9780D, mediante el método de empuje directo, donde se utiliza el hincado de barrenos de doble pared que tiene un diámetro exterior de 2 3/8” y un tubo interior desechable de PVC (liner) de 1 1/2” de diámetro y una longitud de 0.6096m. Además cuenta con un martillo hidráulico de 350p/l de potencia y de alta frecuencia, el cual permite obtener muestras de suelo inalterado cumpliendo con los fines para la recopilación de la muestra para su envío al análisis de laboratorio. Paralelo con los trabajos de perforación, se realizó un registro en tiempo real de cada contacto litológico encontrado a profundidad el cual consiste en una breve descripción del material de la muestra, textura, color, contenido de materia orgánica, etc., así como indicios de contaminación.

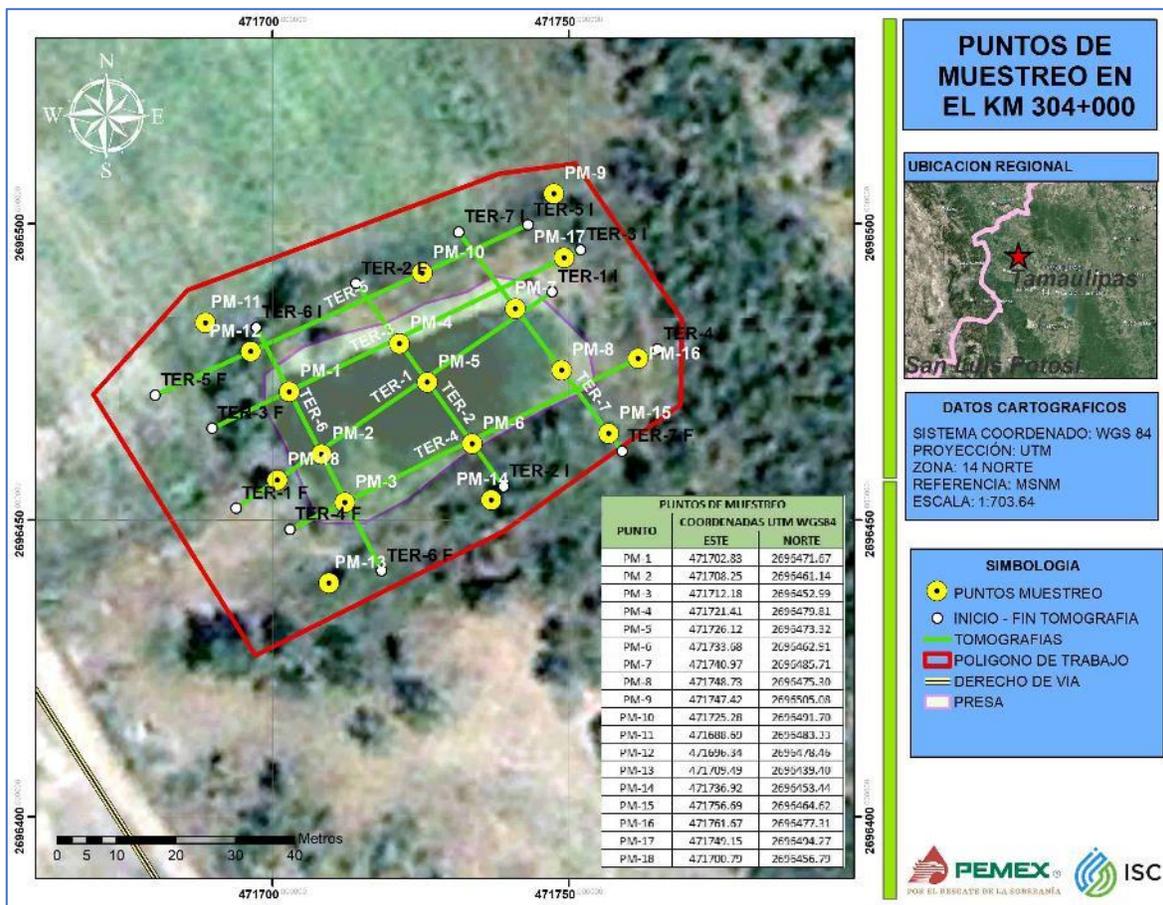


Figura 22. Distribución de puntos de muestreo con base en los resultados de los estudios indirectos del km 304+000.

Esta metodología de muestreo es la más eficiente usada para este tipo de trabajos, ya que mediante este método se reduce al máximo el riesgo de contaminación cruzada, dando como resultado la obtención de muestras, de manera inalteradas y más representativas de las condiciones del sitio de estudio. Como lo establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 en el punto 7.2.7, evitando el uso

de fluidos de perforación y la utilización de equipos y recipientes que ocasionen la pérdida de hidrocarburos volátiles y la contaminación cruzada.



Figura 23. Secuencia de muestreo para el km 304+000

FOTOGRAFIA DE LA PERSONA FÍSICA, ART. 116 PÁRRAFO PRIMERO DE LA LGTAIP Y 113 FRACCIÓN I DE LA LFTAIP

Una vez recuperada la muestra, se entregó al signatario por parte del laboratorio, tanto el signatario y el laboratorio se encontraban acreditados por la EMA y aprobados por ASEA. El signatario fue el encargado de la preservación de la muestra hasta las instalaciones de laboratorio para su posterior análisis, en este caso el medio de preservación fue mantenerlas a una temperatura de 4 °C en hielo las cuales fueron analizadas antes de cumplir el tiempo máximo de conservación (14 días), como lo establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Tabla 5. Recipientes para las muestras, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	TEMPERATURA DE PRESERVACIÓN (°C)	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN (DÍAS)
Hidrocarburos Fracción Ligera	Cartucho con contratapa o sello de PTFE, que se asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4	14
BTEX		4	14
Hidrocarburos Fracción Media	Frasco de vidrio con boca ancha, con contratapa o sello de PTFE, o cartucho con sello que asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4	14
Hidrocarburos Fracción Pesada		4	14
HAP		4	14

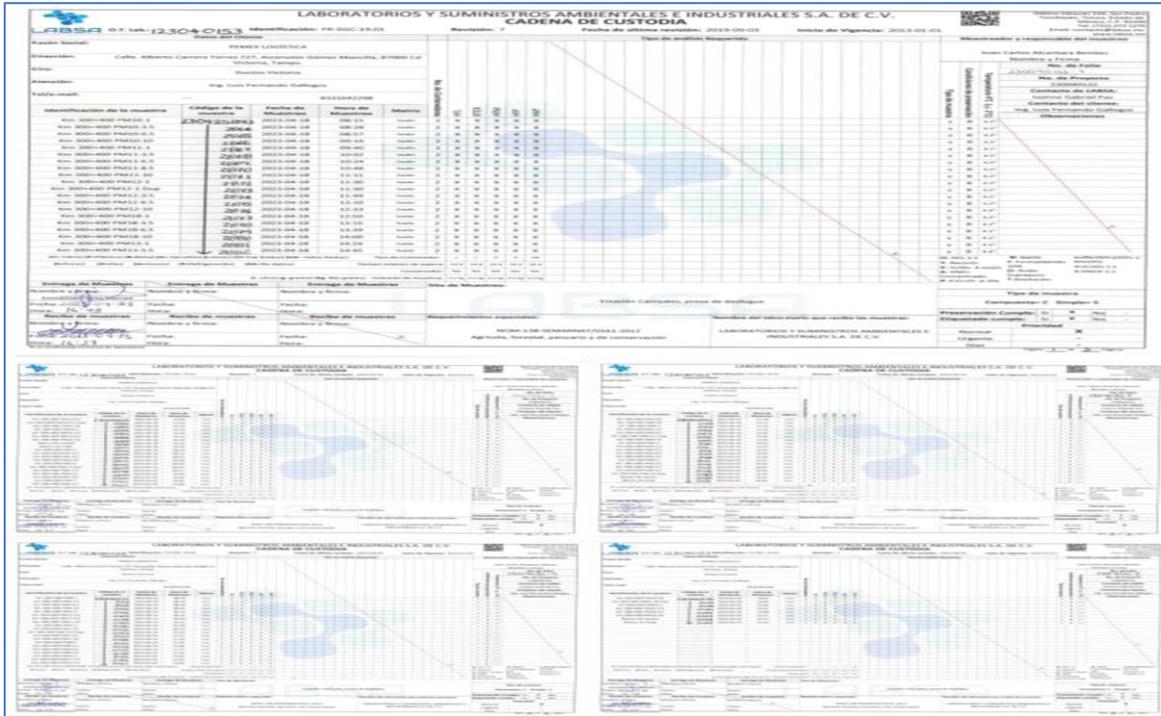


Figura 24. Cadenas de custodia para la toma de muestra del km 304+000

4.9 Resultados analíticos

El propósito del análisis de suelo es determinar la distribución horizontal y vertical de los potenciales contaminantes en área de estudio. El diseño del muestreo fue basado en los resultados de la exploración

geofísica dentro y fuera del área estudiada, fue recomendado para definir con precisión zonas críticas y de esa manera garantizar y cubrir en su totalidad el área afectada, la cual brinda mayor exactitud a las estimaciones de volumetría del suelo impactado. Como se ha mencionado, las muestras colectadas en la ejecución de los planes de muestreo fueron enviadas al laboratorio LABSA S.A. de C.V. el cual cuenta con la acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) así como la aprobación por parte de la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA). Se establecen como objetivos, la cuantificación de las fracciones: Ligera, Media, Pesada, BTEX y HAP's dando un total de 81 análisis.

A continuación, se presentan las tablas de resultados agrupados de acuerdo con el tipo de contaminante, señalando con un color amarillo aquellos resultados que exceden los límites máximos permisibles.

Tabla 6. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Ligera y BTEX para las muestras de suelo del Km 304+000

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Ligera (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)
Km 304+000 PM10-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1Dup	1.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-1	1.00	1,338.03	10.37	33.93	17.87	49.78
Km 304+000 PM1-3.5	3.50	88.49	0.51	7.88	2.42	4.05
Km 304+000 PM1-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-1	1.00	636.29	6.85	32.91	11.10	52.93
Km 304+000 PM2-1.00 Dup	1.00 Dup	1,346.99	11.56	46.76	17.40	47.83
Km 304+000 PM2-3.5	3.50	496.59	4.56	24.80	2.42	13.62
Km 304+000 PM2-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-1	1.00	279.48	10.18	33.40	11.01	44.23
Km 304+000 PM3-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Ligera (mg/kg)	Benceno (mg/kg)	Tolueno (mg/kg)	Etilbenceno (mg/kg)	Xilenos (mg/kg)
Km 304+000 PM3-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-1	1.00	266.74	6.96	49.74	16.71	50.02
Km 304+000 PM4-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.50 Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-1	1.00	554.02	7.07	45.21	12.18	31.33
Km 304+000 PM5-3.5	3.50	188.54	3.25	12.94	6.32	36.25
Km 304+000 PM5-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-1	1.00	444.08	5.19	56.45	16.00	58.06
Km 304+000 PM6-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10 Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-1	1.00	473.24	8.23	30.25	14.01	43.68
Km 304+000 PM7-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-3.50 Dup	3.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-1	1.00	361.40	5.17	59.12	9.99	58.71
Km 304+000 PM8-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10 Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND

Tabla 7. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Media y HAP's para las muestras de suelo del Km 304+000

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Media (mg/kg)	Benzo [a] pireno (mg/kg)	Dibenzo [a,h] antraceno (mg/kg)	Benzo [a] antraceno (mg/kg)	Benzo [b] fluoranteno (mg/kg)	Benzo [k] fluoranteno (mg/kg)	Indeno (1,2,3-cd) pireno (mg/kg)
Km 304+000 PM10-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM10-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM11-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Media (mg/kg)	Benzo [a] pireno (mg/kg)	Dibenzo [a,h] antraceno (mg/kg)	Benzo [a] antraceno (mg/kg)	Benzo [b] fluoranteno (mg/kg)	Benzo [k] fluoranteno (mg/kg)	Indeno (1,2,3-cd) pireno (mg/kg)
Km 304+000 PM11-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-1Dup	1.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM12-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM18-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-6.5Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM13-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM14-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-1	1.00	2,619.69	1.88	3.91	3.04	5.74	7.49	3.14
Km 304+000 PM1-3.5	3.50	489.17	0.70	0.99	0.31	1.50	2.09	1.16
Km 304+000 PM1-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM1-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-1	1.00	2,055.63	2.77	3.44	3.90	3.37	12.16	2.80
Km 304+000 PM2-1Dup	1.00 Dup	1,955.21	4.33	4.43	3.13	4.66	14.65	2.14
Km 304+000 PM2-3.5	3.50	1,103.96	1.29	1.85	2.33	2.64	2.05	1.21
Km 304+000 PM2-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM2-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-1	1.00	1,333.04	1.85	4.84	5.63	3.32	10.15	4.59
Km 304+000 PM3-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM3-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-1	1.00	1,271.20	4.28	4.71	6.00	3.90	14.65	3.91
Km 304+000 PM4-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-6.5Dup	6.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM4-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-1	1.00	1,876.92	5.04	2.03	2.35	4.37	15.02	2.84
Km 304+000 PM5-3.5	3.50	85.25	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-8.5	8.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM5-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-1	1.00	1,254.70	5.61	2.58	1.85	5.71	13.73	4.78
Km 304+000 PM6-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM6-10Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM9-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM17-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-1	1.00	1,206.13	5.98	5.34	2.53	3.03	12.60	5.61
Km 304+000 PM7-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Media (mg/kg)	Benzo [a] pireno (mg/kg)	Dibenzo [a,h] antraceno (mg/kg)	Benzo [a] antraceno (mg/kg)	Benzo [b] fluoranteno (mg/kg)	Benzo [k] fluoranteno (mg/kg)	Indeno (1,2,3-cd) pireno (mg/kg)
Km 304+000 PM7-3.5Dup	3.50 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM7-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-1	1.00	1,255.06	2.98	4.76	1.95	1.98	11.67	5.74
Km 304+000 PM8-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM8-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM15-10Dup	10.00 Dup	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-1	1.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-3.5	3.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-6.5	6.50	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Km 304+000 PM16-10	10.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tabla 8. Resultados analíticos de las concentraciones de Fracción Pesada para las muestras de suelo del Km 304+000

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)	PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)
Km 304+000 PM10-1	1.00	ND	Km 304+000 PM4-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM10-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM4-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM10-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM4-6.50 Dup	6.50 Dup	ND
Km 304+000 PM10-10	10.00	ND	Km 304+000 PM4-10	10.00	ND
Km 304+000 PM11-1	1.00	ND	Km 304+000 PM5-1	1.00	4,969.94
Km 304+000 PM11-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM5-3.5	3.50	2,869.14
Km 304+000 PM11-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM5-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM11-8.5	8.50	ND	Km 304+000 PM5-8.5	8.50	ND
Km 304+000 PM11-10	10.00	ND	Km 304+000 PM5-10	10.00	ND
Km 304+000 PM12-1	1.00	ND	Km 304+000 PM6-1	1.00	3,202.78
Km 304+000 PM12-1.00 Dup	1.00 Dup	ND	Km 304+000 PM6-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM12-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM6-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM12-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM6-10	10.00	ND
Km 304+000 PM12-10	10.00	ND	Km 304+000 PM6-10.00 Dup	10.00 Dup	ND
Km 304+000 PM18-1	1.00	ND	Km 304+000 PM9-1	1.00	ND
Km 304+000 PM18-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM9-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM18-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM9-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM18-10	10.00	ND	Km 304+000 PM9-10	10.00	ND
Km 304+000 PM13-1	1.00	ND	Km 304+000 PM17-1	1.00	ND
Km 304+000 PM13-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM17-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM13-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM17-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM13-6.50 Dup	6.50 Dup	ND	Km 304+000 PM17-10	10.00	ND
Km 304+000 PM13-10	10.00	ND	Km 304+000 PM7-1	1.00	3,914.94
Km 304+000 PM14-1	1.00	ND	Km 304+000 PM7-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM14-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM7-3.50 Dup	3.50 Dup	ND
Km 304+000 PM14-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM7-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM14-10	10.00	ND	Km 304+000 PM7-10	10.00	ND
Km 304+000 PM1-1	1.00	3,254.85	Km 304+000 PM8-1	1.00	3,272.30
Km 304+000 PM1-3.5	3.50	1,549.14	Km 304+000 PM8-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM1-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM8-6.5	6.50	ND

PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)	PUNTO DE MUESTREO	PROFUNDIDAD (m)	Fracción Pesada (mg/kg)
Km 304+000 PM1-10	10.00	ND	Km 304+000 PM8-10	10.00	ND
Km 304+000 PM2-1	1.00	5,845.02	Km 304+000 PM15-1	1.00	ND
Km 304+000 PM2-1.00 Dup	1.00 Dup	5,189.49	Km 304+000 PM15-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM2-3.5	3.50	3,455.44	Km 304+000 PM15-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM2-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM15-10	10.00	ND
Km 304+000 PM2-10	10.00	ND	Km 304+000 PM15-10.00 Dup	10.00 Dup	ND
Km 304+000 PM3-1	1.00	3,359.11	Km 304+000 PM16-1	1.00	ND
Km 304+000 PM3-3.5	3.50	ND	Km 304+000 PM16-3.5	3.50	ND
Km 304+000 PM3-6.5	6.50	ND	Km 304+000 PM16-6.5	6.50	ND
Km 304+000 PM3-10	10.00	ND	Km 304+000 PM16-10	10.00	ND
Km 304+000 PM4-1	1.00	3,434.03			

Una vez conformadas las tablas se les realizó un análisis geoestadístico (Tabla 9) a las concentraciones resultantes, para este análisis únicamente se consideraron aquellas muestras que presentaron algún grado de concentración de hidrocarburos, no importando si este excedía el límite máximo permisible estipulado en la norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. Los análisis estadísticos indican:

- Fracción ligera:** La concentración más alta reportada es de 1,346.99 mg/kg y en el caso de la concentración más baja es de 88.49mg/kg. Del total de las 81 muestras obtenidas (incluyen duplicados) en el muestreo dirigido, el 14.81% de éstas presentan alguna concentración de hidrocarburos y el 12.34% mostraron concentraciones que exceden el límite máximo permisible para usos de suelo de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación que es de 200 mg/kg de acuerdo con la TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. La media o valor promedio de las muestras que presentan concentraciones es de 539.49mg/kg con una desviación estándar de 334.56 mg/kg, lo que se traduce en que la mayoría de las concentraciones obtenidas se encuentran entre los 204.93mg/kg y los 874.05mg/kg, es decir la mayor parte de las muestras exceden el límite máximo permisible. En este caso no existen concentraciones “moda” es decir, no se cuenta con 2 o más concentraciones con el mismo valor; en cuanto a la mediana se obtiene en 458.66mg/kg, que es el valor medio en la columna de concentraciones.
- Fracción media:** La concentración más alta reportada es de 2,619.69mg/kg y en el caso de la concentración más baja es de 85.25 mg/kg. Del total de las 81 muestras obtenidas (incluyen duplicados) en el muestreo dirigido, el 14.81% de éstas presentan alguna

concentración de hidrocarburos y el 10.09% mostraron concentraciones que exceden el límite máximo permisible para usos de suelo de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación que es de 1,200 mg/kg de acuerdo con la TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. La media o valor promedio de las muestras que presentan concentraciones es de 1,375.50 mg/kg con una desviación estándar de 591.93 mg/kg, lo que se traduce en que la mayoría de las concentraciones obtenidas se encuentran entre los 783.56 mg/kg y los 1,967.43 mg/kg. En este caso no existen concentraciones “moda” es decir, no se cuenta con 2 o más concentraciones con el mismo valor; en cuanto a la mediana se obtiene en 1,263.13 mg/kg, que es el valor medio en la columna de concentraciones, lo cual indica en este caso que las concentraciones son cercanas al límite máximo permisible, más aún cuando la desviación estándar es baja.

- Fracción pesada:** La concentración más alta reportada es de 5,845.02 mg/kg y en el caso de la concentración más baja es de 1,549.14 mg/kg. Del total de las 81 muestras obtenidas (incluyen duplicados) en el muestreo dirigido, el 14.81% de éstas presentan alguna concentración de hidrocarburos y el 12.34% mostraron concentraciones que exceden el límite máximo permisible para usos de suelo de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación que es de 3,000 mg/kg de acuerdo con la TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo de la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. La media o valor promedio de las muestras que presentan concentraciones es de 3,693.02 mg/kg con una desviación estándar de 1202.51 mg/kg, lo que se traduce en que la mayoría de las concentraciones obtenidas se encuentran entre los 2,490.51 mg/kg y los 4,895.52 mg/kg. En este caso no existen concentraciones “moda” es decir, no se cuenta con 2 o más concentraciones con el mismo valor; en cuanto a la mediana se obtiene en 3,396.57 mg/kg, que es el valor medio en la columna de concentraciones.

Tabla 9. Valores geoestadísticos de las muestras de suelo analizadas para el km 304+000

Medida	Fracción Ligera	Fracción Media	Fracción Pesada
Concentración alta	1,346.99	2,619.69	5,845.02
Concentración menor	88.49	85.25	1,549.14
Porcentaje de muestras con concentración	14.81%		
Porcentaje de muestras contaminadas	12.34%	10.09%	12.34%

Medida	Fracción Ligera	Fracción Media	Fracción Pesada
Media	539.49	1,375.50	3,693.02
Moda	#N/D	#N/D	#N/D
Mediana	458.66	1,263.13	3,396.57
Rango	1258.5	2534.44	4295.88
Varianza	164,992.45	472,054.29	1,333,604.44
Desviación estándar	334.556822	591.933381	1202.506

En general de este análisis estadístico podemos ver que para este sitio en particular la mayor parte de las concentraciones se encuentran en un rango cercano a los límites máximos permisibles de las tres fracciones, situación que facilitará las acciones de remediación de suelos mediante la técnica que se designe con base en la distribución de este.

4.10 Evaluación de la extensión del contaminante en el suelo

Continuando con el análisis de los resultados de laboratorio del muestreo exploratorio, se llevó a cabo el procesamiento de la información mediante el Software ArcMap 10.3, con el objetivo de representar de una manera gráfica en un mapa georreferenciado, la presencia del contaminante en el área afectada. El método de interpolación que fue utilizado es el de “Natural Neighbor” el cual, al igual que todos los métodos de interpolación, parte del principio de obtener información o datos donde haya una ausencia de estos, generados a partir del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.

Como resultado de la modelación del contaminante se obtuvieron 2 planos georreferenciados, uno de ellos (Figura 25) representa la dispersión de las fracciones ligera, media y pesada a 1m de profundidad y el otro a 3.5m (Figura 26). De acuerdo con las modelaciones de las dispersiones de las 3 fracciones identificadas mediante los resultados analíticos de las muestras obtenidas en el sitio del pasivo ambiental del km 304+000, podemos observar que tanto para la profundidad de 1.0m como para la de 3.5m la fracción ligera que es representada en color azul, es la que mayor área de contaminación presenta, englobando en su mayoría a las otras dos fracciones (pesada y media). En ambos casos, las dispersiones se pueden ver contenidas dentro de los límites de la presa de desfogue, sin presentar concentraciones en aquellos muestreos que se encuentran por afuera de la presa e inclusive sobre aquellos cercanos a los taludes.

De manera superficial la pluma contaminante de la fracción pesada que se presenta en color rojo es similar a la de la fracción ligera en cuanto su distribución, la zona donde difieren dichas plumas es en la parte este-noreste donde la fracción ligera se extiende aún más que la pesada. Para el caso de

la media es la de menor distribución a 1 m de profundidad, quedando dentro de las otras dos plumas. Para el caso de las dispersiones a 3.5m de profundidad la distribución de la pluma de fracción pesada es la de menor superficie, limitándose a solo la parte oeste-suroeste de la presa, recordando que la fracción pesada presenta una menor movilidad en las capas del subsuelo, ya que presenta una viscosidad que le limita el movimiento.

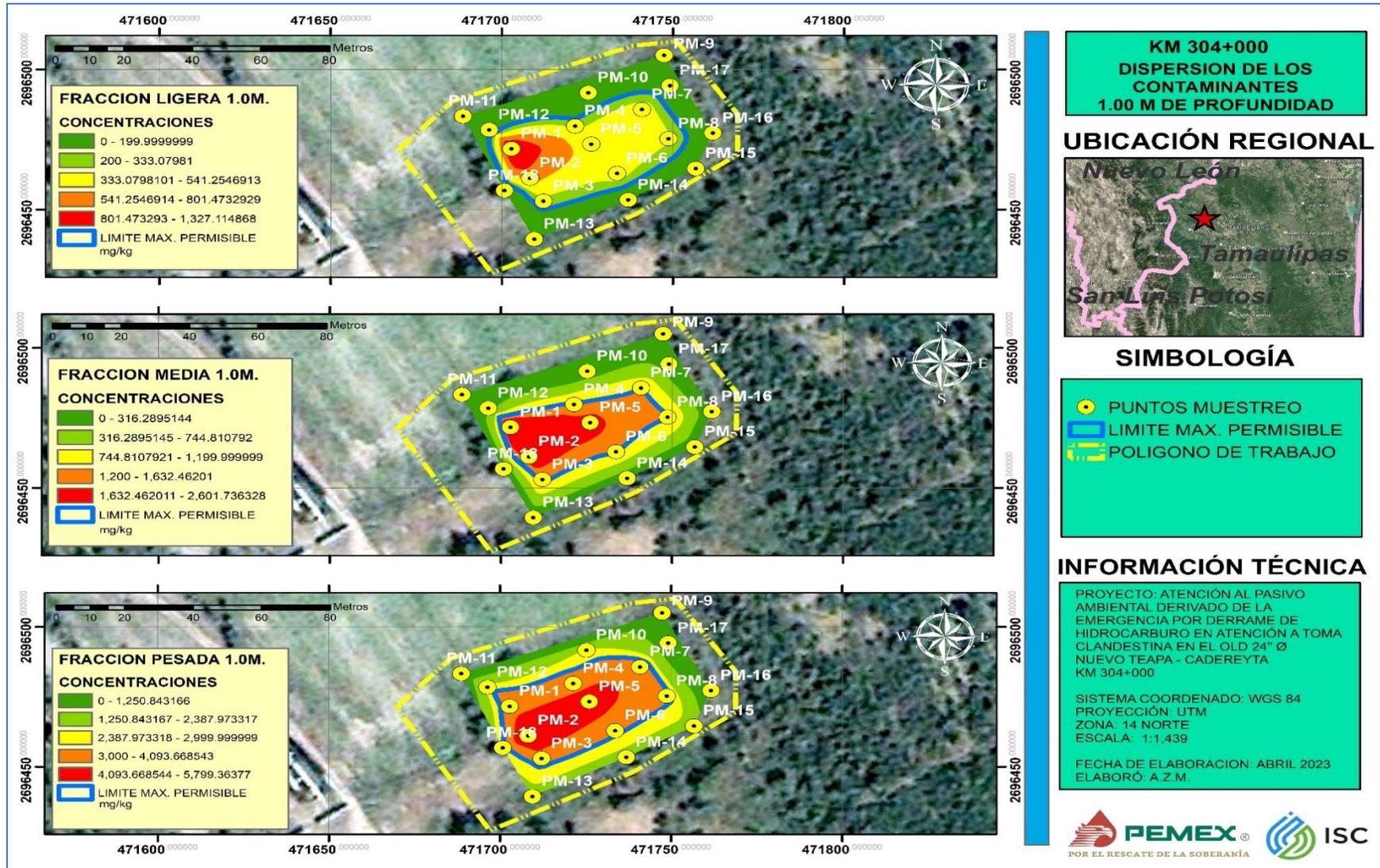


Figura 25. Dispersión de contaminantes a 1m de profundidad en el km 304+000

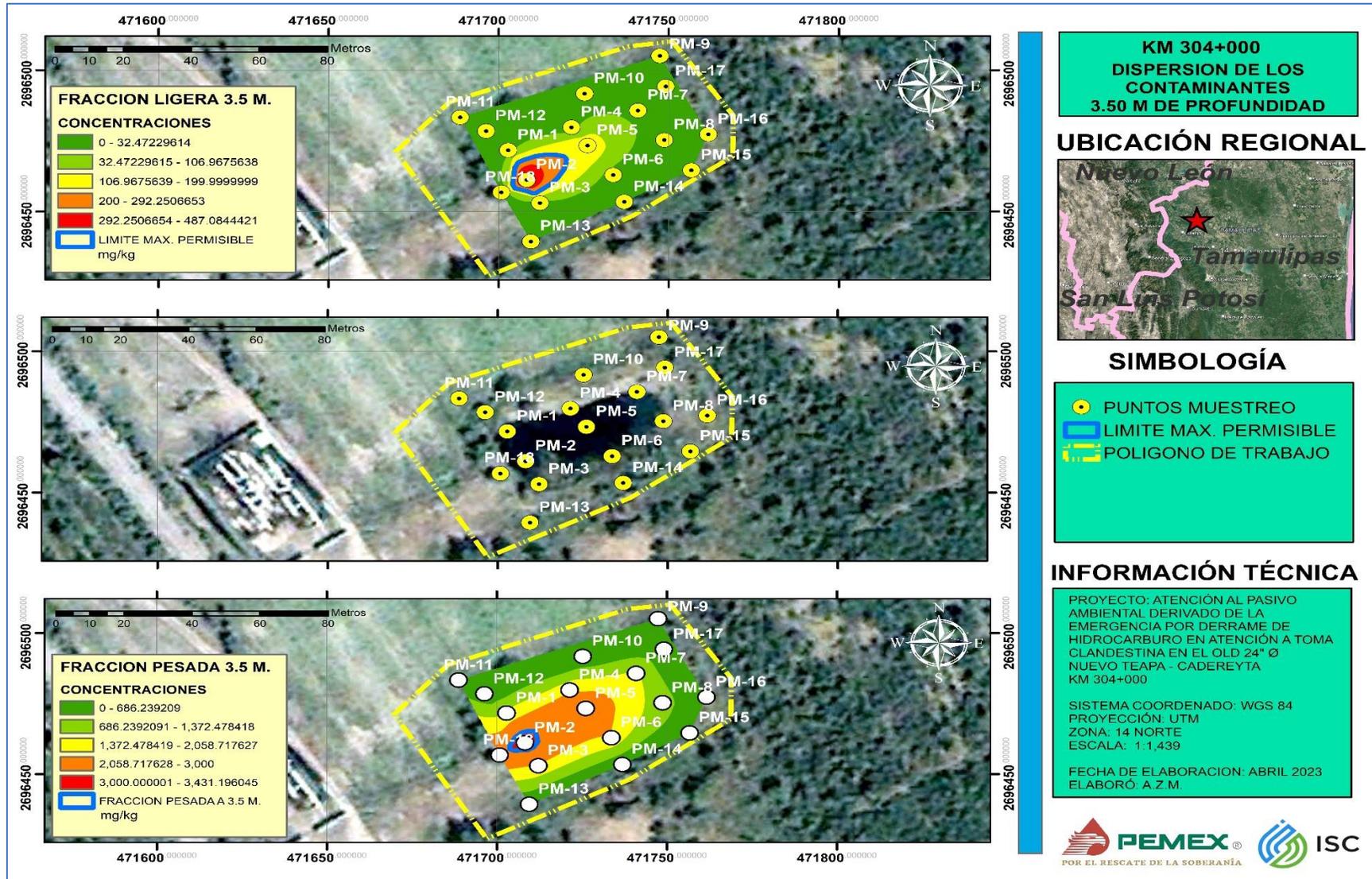


Figura 26. Dispersión de contaminantes a 3.5m de profundidad en el km 304+000

Al encontrar distribuciones diferentes para cada pluma contaminante de hidrocarburos en sus 3 fracciones, se procedió a realizar una operación de álgebra de mapas con la finalidad de obtener una mancha única de contaminación; para esto fue necesario realizar una operación de álgebra de mapas mediante el software ArcMap 10.3, empleando la herramienta "unión de shapes" con campos previamente asignados para la suma de estos y al resultado se le aplicó la "Dissolve" para así obtener un polígono único de contaminantes, que en los planos es representado de color naranja y que toma en cuenta el área de las 3 fracciones como una sola, recordando que el contaminante de mayor distribución es la fracción ligera.

Posteriormente, obtenidas las plumas de dispersión del contaminante, mediante el uso del ArcMap 10.3 y con el uso de la herramienta "Calculate Geometry", se procede a calcular el área de afectación de los contaminantes mediante el software. De igual manera se realizó un cálculo de dispersión de contaminante a los 2m de profundidad para obtener una pluma de contaminante idealizada que nos sirvió para acotar el cálculo del volumen de suelo contaminado. Posteriormente de haber obtenido la dispersión de hidrocarburos a los 2m de profundidad, se realiza el cálculo del área como se mencionó anteriormente para cada polígono generado a una profundidad establecida. Con el conjunto de polígonos a diferentes profundidades fue posible realizar de manera manual el cálculo del volumen aproximado de suelo impactado mediante las siguientes operaciones:

$$V_1 = \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) * h$$

Dónde:

V_1 = Volumen inicial de suelo contaminado

α = Área de la capa superior

β = Área de la capa inferior

h = espesor entre la capa superior y capa inferior

Para el caso del material que se encuentra contaminado por hidrocarburos (principalmente fracción ligera), las dispersiones generadas en el software nos dan como resultado las siguientes áreas:

Tabla 10. Áreas de las capas afectadas por el hidrocarburo

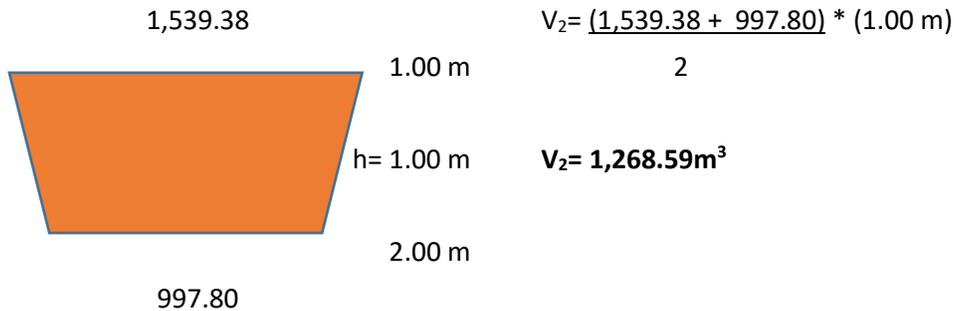
PROFUNDIDAD (M)	ÁREA (m2)
1.00	1,539.38
2.00	997.80
3.50	155.50

- Volumen de 1.00m a 2.00m de profundidad

α = área de la capa superior 1.00m de profundidad = 1,539.38m²

β = Área de la capa inferior 2.00m de profundidad = 997.80 m²

Aplicando la formula mencionada obtenemos que:

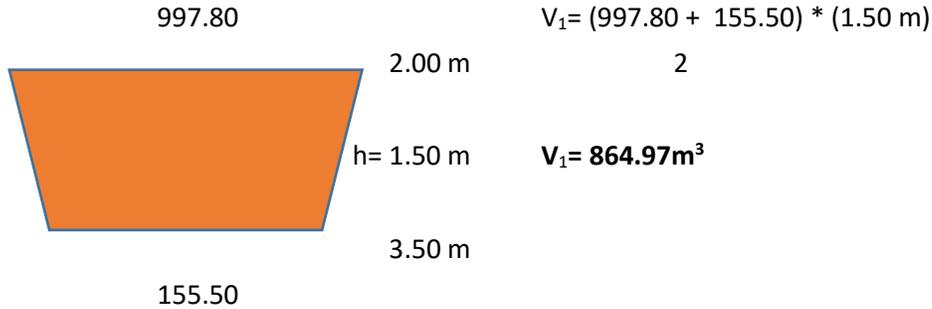


- Volumen de 2.00m a 3.50m de profundidad

α = área de la capa superior 2.00m de profundidad = 997.80m²

β = Área de la capa inferior 3.50m de profundidad = 155.50m²

Aplicando la formula mencionada obtenemos que:



Realizando esta operación estrato por estrato dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 11. Volúmenes de suelo contaminado por hidrocarburo.

Profundidad (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
1.00	1,539.38	1,539.38
2.00	997.8	1,268.59
3.50	155.5	864.98
Volumen total:		3,672.95

El volumen de suelo contaminado con hidrocarburo es de aproximadamente 3,672.95 m³, los cuales se encuentran en su totalidad por afuera del derecho de vía de los ductos de PEMEX. Como lo hemos mencionado, esta contaminación se encuentra contenida en una presa de desfogue que recibía los residuos de las maniobras que aplicaban en la estación de PEMEX T.R.E.D. Carrizos. Donde el contaminante de mayor distribución es la fracción ligera, siendo la capa superficial (1.0m) la que presenta mayor área y volumen de suelo contaminado por hidrocarburos, llegando hasta una profundidad de 3.50m representando el 23.55% del volumen de suelo contaminado a extraer para realizar su remediación.

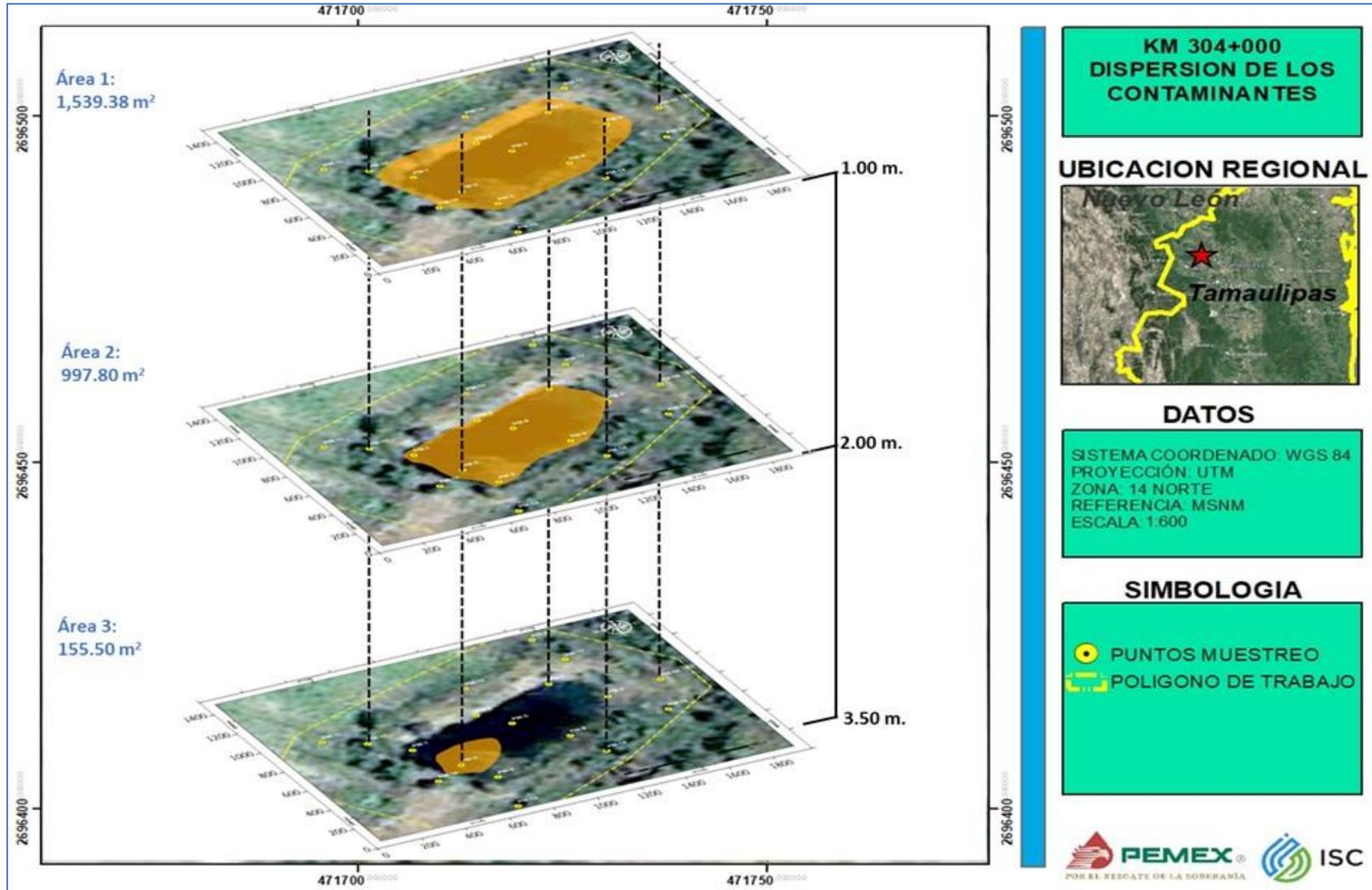


Figura 27. Stack Maps de la pluma contaminante en el km 304+000

5 Trabajos por realizarse para la remediación del pasivo ambiental

Una vez generados los planos de dispersión de las zonas contaminadas y ya que la autoridad ambiental (ASEA) apruebe el programa de remediación propuesto, mediante el GPS topográfico, se procederá a ubicar mediante georreferenciación en campo el polígono para señalar las zonas de excavación. De acuerdo con los alcances del proyecto el material contaminado será enviado a una celda de tratamiento donde se le aplicará la técnica de “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”. Para lograr el objetivo de llevar a cabo la remediación del pasivo ambiental, será necesario llevar a cabo los siguientes trabajos:

5.1 Caminos

La primera adecuación será la construcción de un camino de transferencia que comunique el sitio a excavar con la celda de tratamiento, por el cual se tiene pensado que circule el camión de volteo de 14m³ que estará encargado de acarrear el material contaminado a la celda de tratamiento. Dicho camino se tiene planteado cuente con una longitud de 44.50 m, para lo cual será necesario llevar a cabo la limpieza del terreno con un ancho de 4 m para el libre tránsito del camión. El camino estará ubicado en la parte suroeste central de la zona a excavar y conectará con la parte sureste de la celda de tratamiento.



Figura 28. Croquis ilustrativo de la futura ubicación del camino de acceso

5.2 Celda de tratamiento

Otra de las instalaciones necesarias para los objetivos del proyecto, será la construcción de la Celda de tratamiento, en la cual será depositado el material contaminado producto de la excavación, dicha celda será ubicada de manera estratégica al oeste de la zona a excavar de manera aledaña a esta. La primera actividad para su elaboración será la nivelación del terreno, esto con la finalidad de evitar una volcadura con las unidades de transporte y sobre todo evitar una migración del contaminante debido a la temporada de lluvias, evitando pendientes, escalones o cualquier desnivel considerable en la celda; posterior a la nivelación se construirán los bordos perimetrales que tendrán una altura no mayor a 1.50 m, los cuales serán construidos con el mismo material producto de la nivelación; una vez construidos dichos bordos se realizará la construcción del cárcamo de recuperación que cumplirá la función de contener posibles lixiviados que puedan surgir del proceso de tratamiento de las biopilas. Posteriormente se colocará una geomembrana de alta densidad (Liner) sobre toda el área de la celda incluyendo los bordos, por último, se realizará el conformado del terraplén encima del liner como medida de protección para este, evitando con esto rupturas por efecto de la maquinaria a emplearse.

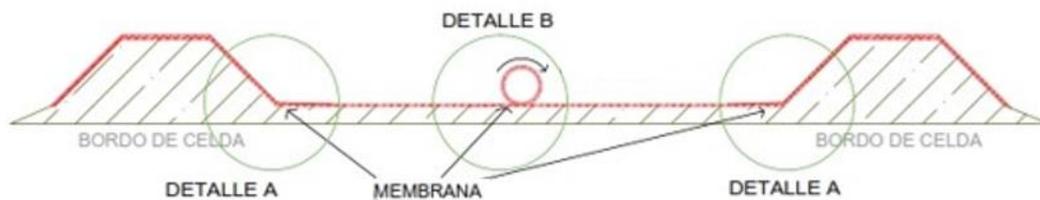


Figura 29. Celda de tratamiento

5.3 Cercado Perimetral

Con la finalidad de dar cumplimiento al anexo SSPA en cuanto al procedimiento crítico de Barricadas, las cuales nos servirán para restringir el acceso a la celda de tratamiento, evitando posibles accidentes. El cerco perimetral estará compuesto por 4 hilos, con postes de madera a cada 2.0 m de separación con una altura de 1.5m

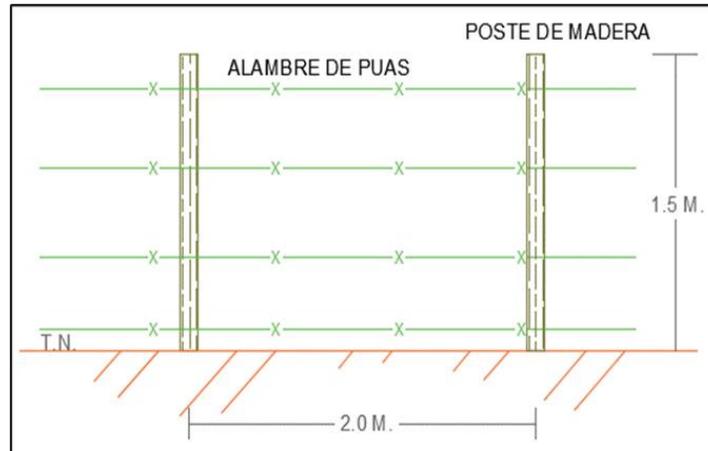


Figura 30. Propuesta de cerco perimetral

5.4 Desarrollo de la actividad de excavación

Una vez que se concluya la construcción de la celda de tratamiento, se dará inicio con los trabajos de excavación con maquinaria atacando la zona de trabajo en sentido este a oeste, recordando que en la zona oeste se encuentra la zona con mayor profundidad de excavación. Se considera un retroexcavadora con un camión de 14 m³, el cual irá cubierta su caja con una membrana impermeable para minimizar posibles intercambios de contaminante con la atmosfera. La cantidad de maquinaria se ha calculado considerando que entre la celda y el área excavar existen máximo 50 m de distancia. En este sitio no se considera la excavación manual. Previo al inicio de la excavación se tendrá que delimitar la pluma contaminante mediante la georreferenciación en campo de esta. Una vez excavado el material y cargado en el camión de 14m³, se procederá a acarrearlo hasta la celda de tratamiento, donde será depositado formando pilas, las cuales serán cubiertas con una membrana impermeable para minimizar el intercambio de contaminantes con la atmósfera. Durante la actividad de excavación se realizará el seguimiento y control de la excavación por medio de análisis de PetroFlag, esto con la finalidad de dar una mayor certeza de la remoción del material contaminado. Las tomas de muestra se realizarán en fondos y paredes una vez llegados a los límites establecidos en la dispersión del contaminante, en caso de obtener valores altos de TPH's se deberá continuar con la excavación hasta que no se presenten valores.

5.5 Proceso de tratamiento “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”

Una vez extraído el material contaminado, se construirán las pilas con una base no mayor a los 4.0m y una altura máxima de 3.0m con un ángulo de reposo de 45°. Terminada la pila se llevará a cabo la adición de humedad con el insumo Quantum Clean y se dejará reposar por un lapso de 8hrs cubierto por la geomembrana, posterior a este tiempo se aplicarán los microorganismos activados SOLIBAC IP SOIL junto con los nutrientes (Triple 17). Una vez aplicados estos componentes la biopila será cubierta por la membrana impermeable, dicha acción tendrá una duración aproximada de 20 días, en los cuales no se realizará movimiento alguno sobre la pila, de igual manera durante este periodo se llevará a cabo mediciones de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) para cerciorarse de la disminución de los COV's y con esto minimizar el intercambio de los compuestos con la atmosfera.

Disminuidas las concentraciones de COV's, se procederá a realizar la homogenización mecánica de cada biopila, en la cual se volverán a agregar los insumos anteriormente mencionados bajo el mismo orden. A lo largo de esta etapa del tratamiento se realizarán monitoreos de control interno, los cuales nos permitirán conocer el avance de la degradación de los hidrocarburos de cadenas mas pesadas, siendo a través de estos hidrocarburos con los cuales se podrá tomar la decisión para programar el Muestreo Final Comprobatorio.

6 Diseño del Plan de Muestreo Final Comprobatorio (MFC)

El plan del MFC que se presenta a continuación, se elabora con base en los resultados obtenidos en la caracterización del pasivo ambiental, misma que ya fue realizada y con la cual se logró dimensionar a los contaminantes presentes en el pasivo (4 Resumen de los trabajos realizados de dimensionamiento de contaminantes). Los trabajos de remediación del pasivo ambiental aún no se han desarrollado como tal, se encuentra en espera de la aprobación por parte de la autoridad ambiental al Programa de Remediación mediante la técnica “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”, sin embargo, con la finalidad de presentar un Plan de Muestreo Final Comprobatorio, se muestra de manera resumida los trabajos a realizarse para dicha técnica (5 Trabajos por realizarse para la remediación del pasivo ambiental) en el presente documento, con los cuales se pueden establecer la cantidad de puntos de muestreo con base en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”.

Se propone la realización de un muestreo final comprobatorio para dar por finalizados los trabajos de excavación y extracción del material impactado en el área una vez que se hayan realizado los trabajos, esto con el objetivo de obtener los valores de concentración de hidrocarburos por debajo de los límites máximos permisibles para las fracciones pesada, media y ligera, así como para los BTEX y HAP's.

6.1 Cantidad y ubicación de puntos de muestreo

Para la ubicación de los puntos de muestreo en el área de excavación se toman como referencia los criterios descritos en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”, específicamente en el punto “2.3.1 Criterios para la determinación del número de puntos de muestreo en área de excavación, cuando el suelo fue retirado”, en su inciso c), el cual menciona que:

- Cuando el área de contaminación es de 1000 m² y hasta 5000 m²: FORMA IRREGULAR:
 - Número de muestras y distribución: una muestra por cada 15 – 20 metros lineales en las paredes del perímetro del área excavada y 2 en el fondo según la superficie (áreas hasta 1000 m²) y 4 o 10 muestras para áreas de hasta 5000 m², según sea el caso.

Para el pasivo ambiental aledaño al Km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta, la excavación será de forma irregular, la cual presentará un área de excavación de 1,539.28m² y un perímetro de 155.10. Tomando en cuenta las dimensiones de la zona a excavar y aplicando el criterio

anteriormente mencionado, obtenemos que en el caso de las paredes deberían de ser por lo menos 11 puntos de muestreo (tomando en cuenta la regla de una muestra cada 15m) y para el fondo serían 4 muestras ya que el criterio indica entre 4 y 10 muestras para áreas menores a 5,000m² en excavaciones irregulares. En este sitio en particular se realizarán 2 niveles de excavación, uno que va de 0.0 a 2.0 m y otro mas que va de 2.01 a 3.5 m, por lo cual se establece 2 zonas de muestreo de paredes y fondos (una para cada nivel de excavación), en ambas se aplica el mismo criterio de muestreo de acuerdo con la guía, con la finalidad de dar una mayor certeza al muestreo, se define que para cada cara de la excavación irregular se tomará una muestra (una muestra entre vértices del corte), por lo cual, para la excavación de 0.0 a 2.0m se tomarán 21 muestras (16 pared y 5 fondo, incluyen 2 duplicados) y para la excavación de 2.01 a 3.5m se tomarán 7 muestras (4 pared y 3 fondo, incluye 1 duplicado). Lo anterior se puede constatar en la Figura 31 y Tabla 12, cumpliendo con el criterio establecido en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”.

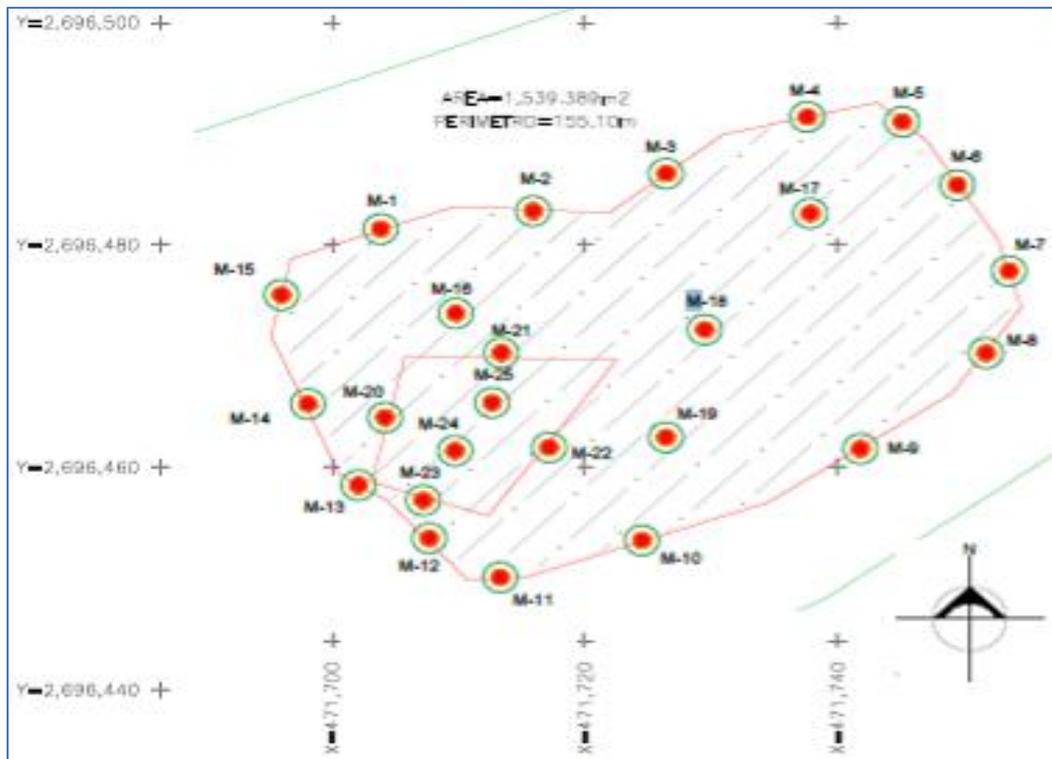


Figura 31. Propuesta de distribución de los puntos de muestreo en paredes y fondos de las excavaciones a realizarse en el pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

Tabla 12. Propuesta de puntos de muestreo final comprobatorio en paredes y fondos del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

NUMERO	ESTE	NORTE	PUNTO DE MUESTREO	UBICACIÓN
PUNTOS DE MUESTREO EN EXCAVACION DE 0.0 A 2.0 M.				
1	471703.84	2696481.40	M-1	PARED
2	471715.89	2696483.05	M-2	PARED
3	471726.43	2696486.40	M-3	PARED
4	471737.60	2696491.44	M-4	PARED
5	471745.11	2696491.01	M-5	PARED
6	471749.54	2696485.37	M-6	PARED
7	471753.61	2696477.66	M-7	PARED
8	471751.71	2696470.24	M-8	PARED
9	471741.84	2696461.70	M-9	PARED
10	471724.50	2696453.40	M-10	PARED
11	471724.50	2696453.40	M-10 DUP	PARED
12	471713.37	2696450.02	M-11	PARED
13	471707.71	2696453.60	M-12	PARED
14	471702.14	2696458.37	M-13	PARED
15	471698.10	2696465.68	M-14	PARED
16	471696.03	2696475.46	M-15	PARED
17	471709.77	2696473.83	M-16	FONDO
18	471737.82	2696482.81	M-17	FONDO
19	471729.46	2696472.38	M-18	FONDO
20	471726.41	2696462.66	M-19	FONDO
21	471726.41	2696462.66	M-19 DUP	FONDO
PUNTOS DE MUESTREO EN EXCAVACION DE 2.01 A 3.5 M.				
22	471706.61	2696468.19	M-20	PARED
23	471720.19	2696469.35	M-21	PARED
24	471714.25	2696458.81	M-22	PARED
25	471704.65	2696458.72	M-23	PARED
26	471710.06	2696460.64	M-24	FONDO
27	471712.69	2696465.83	M-25	FONDO
28	471712.69	2696465.83	M-25 D	FONDO

Ahora bien, en el caso de las biopilas, nos basamos en lo estipulado en el punto “2.3.2 Criterios para la determinación del número de puntos de muestreo en biopilas”, suponiendo que los trabajos de remediación se realizaran como están programados, se proyecta que se instalarán un total de 5 pilas las cuales presentan 3.0m de altura, 4.0 m de base, y 136 m de largo lo cual genera un volumen total de aproximadamente 4,080 m³ de material contaminado abundado (816m³ por biopila). Tomando en cuenta los criterios del tema 2.3.2 de la Guía donde establece que:

- Por regla general se debe de requerir que se aplique 1 muestra simple por cada 250 – 300 m³, cuando se trate de tratamiento de remediación por biopilas y landfarming con aeración mecánica (con excavadora “mano de chango” o similar, sin cribado industrial previo). La densidad de muestreo de las biopilas puede variar en más o menos 10 – 15 %. La densidad

de muestreo de todas las biopilas debe de estar siempre alrededor de 5 - 10 % de la regla general (1 Muestra /250 – 300 m³ ± 5 – 10 %).

Par el caso de las biopilas también se debe considerar el tema “2.3.3 Criterios para la determinación de la localización de puntos de muestreo en biopilas”, el cual indica que una biopila se debe dividir en 4 triángulos de dimensiones semejantes, nombrando cada triángulo con una letra que va de la A a la D, donde en el caso del triángulo B se considera una profundidad de muestreo a partir de 1.80 m y para los triángulos A, B y C, la profundidad de muestreo es de 0.8m

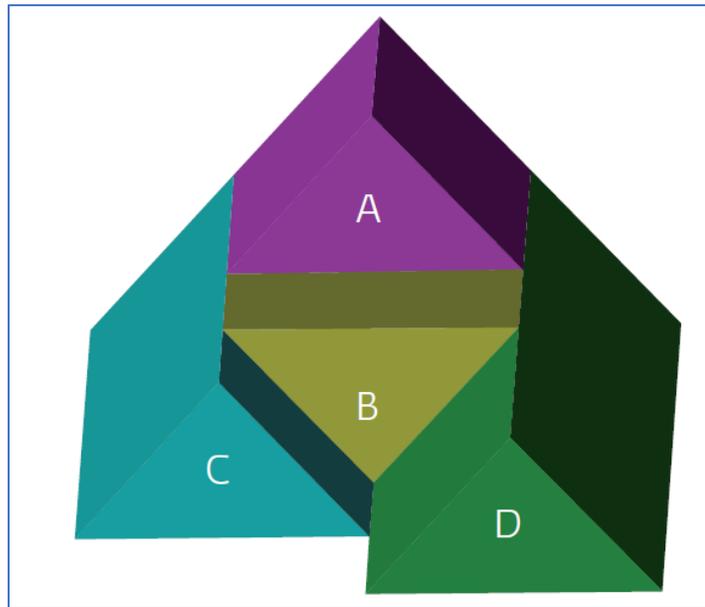


Figura 32. Diagrama de secciones transversales en biopilas para su muestreo de la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”

Tomando en cuenta los criterios anteriores, se estableció que las biopilas serán seccionadas a cada 41.50m, esto con la finalidad de asegurar la condición de 250m³ por muestra, lo que da un resultado de 3.264 muestras por biopila, sin embargo para obtener datos mas confiables de las condiciones de limpieza, se propone realizar el ajuste 4 muestras (más aún porque estas no se pueden fraccionar) por cada biopila. Las muestras estarán distribuidas de acuerdo con el criterio 2.3.3 de la Guía; en total se consideran 22 muestras para las biopilas (incluyen 2 duplicados) la distribución y ubicación de los muestreos se presenta en la Figura 33

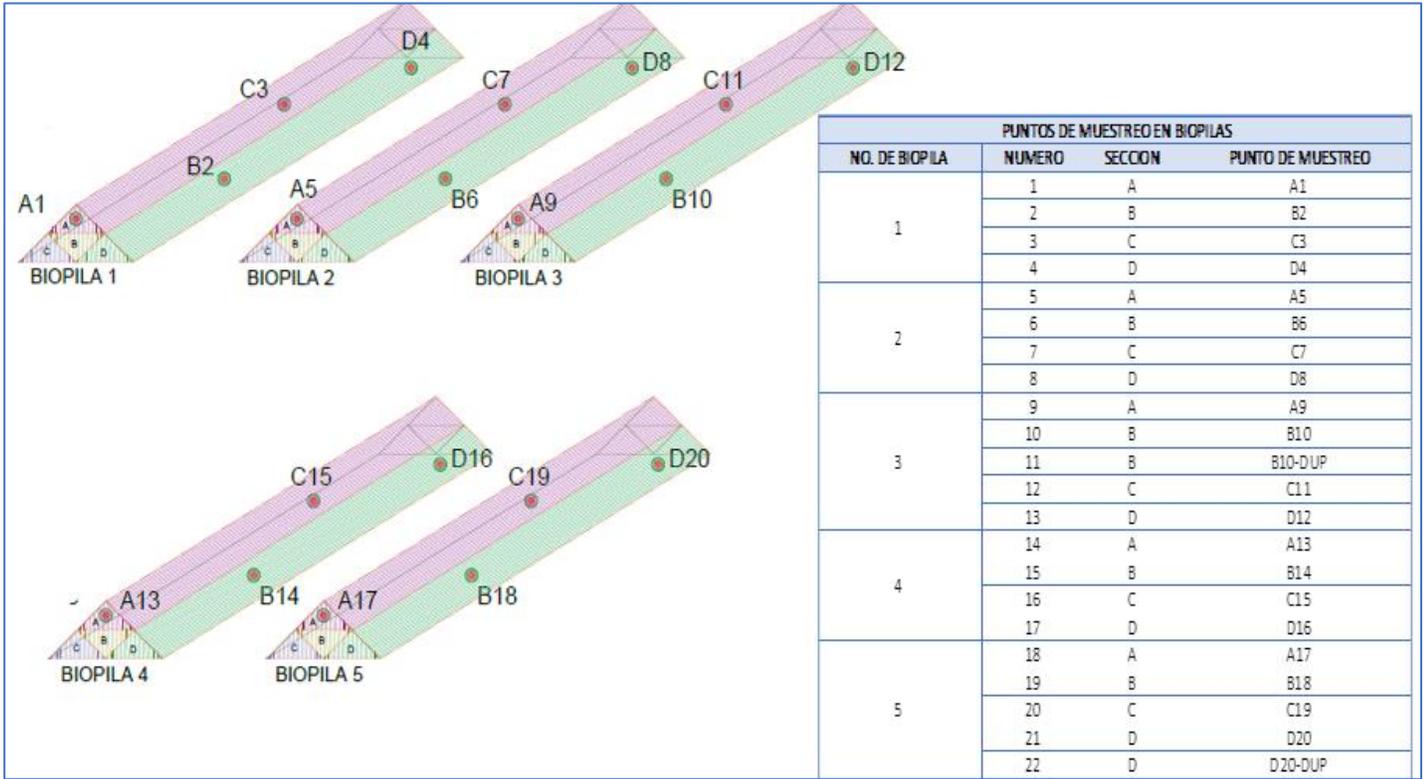


Figura 33. Distribución del Muestreo Final Comprobatorio en biopilas del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

6.2 Muestreo con equipo manual

Para la ejecución del muestreo se contará con equipo de perforación manual Hand Auger, el cual consta de punta de perforación o broca de aproximadamente 0.40 m. (40.00 cms.) con un diámetro de perforación de 3in., la cual hay de dos tipos: para arcillas y para arenas, diferenciadas por la apertura de las cuchillas de corte para perforación, presentando más amplias las cuchillas para arcillas, siendo ésta la adecuada para la ejecución de estos trabajos, ya que el material que más prevalece en el área son arcillas, éstas brocas tienen un tornillo en su parte superior para el ensamblaje de las extensiones. Estas extensiones tienen una longitud de 1.50 m. cada una (4 en su totalidad), éstas se van agregando o separando de la punta del Hand Auger de manera de cumplir con las necesidades de profundidad de la perforación que se requieren en el plan de muestreo; finalmente se coloca en la parte superior del Hand Auger un maneral de giro, perpendicular al juego de extensiones, para el apropiado manejo del equipo de perforación manual, sobre este se realizará un esfuerzo vertical y un movimiento rotatorio para que las cuchillas que se encuentran en la broca corten e impulsen el material por su interior conforme se avanza al momento de la perforación para realizar la toma de muestra.

Para el caso de la extracción de la muestra una vez alcanzada la profundidad deseada de acuerdo a las características del suelo y lo propuesto en el plan de muestreo, se utilizará un muestreador de percusión, el cual consta de una punta en la cual se encuentra un tubo bipartido enroscado a una base que conecta con las extensiones de 1.50 m., dentro de éste se coloca el liner de 0.30 m. en el cual se capturará el material deseado para la muestra, en la parte superior de las extensiones conectadas a la punta de muestreo, se coloca un martillo de lingote, con el cual se realizarán una serie de golpes o percusiones de manera que la punta de muestreo se hincó en su totalidad en el material a la profundidad alcanzada llenándolo de la muestra deseada.

La muestra de suelo a analizar será tomada por el personal de laboratorio, así como su etiquetado y manejo de esta. La secuencia para la toma de muestras hasta una profundidad de 3.0m en biopilas, será la siguiente:

1. Ubicación de puntos de acuerdo con el plan de muestreo, utilizando un equipo de Estación Topográfica.
2. Se colocará una punta (broca) a una extensión de 1.5 m., misma que le será colocado previamente un maneral de giro.
3. Se iniciará la perforación manual aplicando el esfuerzo vertical y el movimiento rotatorio necesario, y aproximadamente a cada 0.20m o 0.30m se extraerá la broca y se retirará el material almacenado en ella, realizando golpes con mazo suave.
4. De acuerdo con la profundidad deseada se incorporarán al equipo extensiones, un ejemplo es, si se planea que la muestra se extraiga a los 3.00m se conectarán en su totalidad dos extensiones de 1.50m y la punta de perforación para alcanzar esa profundidad.
5. Una vez que se llegue a la profundidad señalada en el plan de muestreo, se procederá a extraer el equipo Hand Auger para introducir en el punto de sondeo el martillo de lingote con extensiones de 1.50m que sean necesario para cubrir la profundidad deseada, instalando en su punta el tubo bipartido con el liner.
6. Se realizarán golpes o percusiones con el martillo de lingote hasta que la punta de muestreo llegue a su saturación por el material que se encuentra a la profundidad perforada, cumplido esto se procederá a extraer el muestreador realizando golpes o percusiones de manera opuesta a la inicial.
7. Se extraerá el liner del tubo bipartido con el material deseado para su presentación como muestra, siendo el signatario el encargado del manejo de la muestra en la totalidad de su

existencia, abarcando el punto desde la extracción, y etiquetado, así como su sellado y almacenamiento.

Una vez recuperada la muestra, se entrega al signatario por parte del laboratorio, tanto el signatario y el laboratorio son entes acreditados por la EMA y aprobados por ASEA. El signatario es el encargado de la preservación de la muestra hasta que esta llegue a las instalaciones de laboratorio para su posterior análisis, en este caso el medio de preservación fue mantenerlas a una temperatura de 4° C en hielo las cuales deberán ser analizadas antes de cumplir el tiempo máximo de conservación (14 días), como lo establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Tabla 13. Recipientes para las muestras, temperatura de preservación y tiempo máximo de conservación por tipo de parámetro.

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	TEMPERATURA DE PRESERVACIÓN (°C)	TIEMPO MÁXIMO DE CONSERVACIÓN (DÍAS)
Hidrocarburos Fracción Ligera	Cartucho con contratapa o sello de PTFE, que se asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4	14
BTEX		4	14
Hidrocarburos Fracción Media	Frasco de vidrio con boca ancha, con contratapa o sello de PTFE, o cartucho con sello que asegure la integridad de las muestras hasta su análisis.	4	14
Hidrocarburos Fracción Pesada		4	14
HAP		4	14

Los recipientes con muestras son sellados y etiquetados inmediatamente después de haber sido tomada la muestra y como lo menciona la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, en el punto 7.3.4 se entregan para su análisis a un laboratorio de pruebas acreditado y aprobado en los términos de lo establecido en el Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, que en este caso será el Laboratorio LABSA.

Al término de este procedimiento se desconectarán las extensiones del equipo manual (hand auger) y el equipo bipartido para la toma de muestra para poder llevar a cabo la limpieza de este con una brocha o cepillo, en caso de que la limpieza no sea suficiente, será necesario lavar con agua, entre muestra y muestra. Cuando se utilicen detergentes, éstos deben estar libres de fosfatos como lo marca la norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 en el punto 7.1.16 para su reutilización.

6.3 Llenado y registro de la cadena de custodia

Para documentar formalmente la transportación y movimientos de las muestras desde el momento de su recolección hasta su ingreso al laboratorio, se completará un registro de cadena de custodia, mismo que acompañe a cada muestra. Se anexarán tres juegos de copias de cadena de custodia de los cuales, una copia corresponde al paquete de traslado de las muestras y las otras dos copias se entregarán al signatario y encargado del sitio. A continuación, se describen los puntos que se deben completar en la cadena de custodia en referencia a la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012:

1. Número de la orden de trabajo: se expedirá un documento escrito en el cual se describen las características de los trabajos a realizar con un folio.
2. Cliente: nombre de la empresa
3. Giro de la empresa: petrolera
4. Muestreado por: nombre del signatario quien se encargará de etiquetar y preservar la muestra.
5. Fecha y hora: fecha y hora en que se toma la muestra sellada.
6. Matriz: componentes a analizar (suelo, agua, etc.)
7. Muestra: es un número consecutivo que se le asigna una vez ingresado al laboratorio.
8. Identificación de la muestra: se proporcionará un nombre a cada muestra para mayor identificación señalando las profundidades en la que fue tomada.
9. Número de contenedores: dependerá al tipo de análisis a realizar y su procedimiento por norma.
10. Análisis solicitado: tipo de análisis a realizar.
11. Observaciones: se definirán las normas que aplicarán en dicho muestreo.
12. Nombre y firma: nombre y firma del encargado del sitio por parte de la empresa y en cargo del sitio.
13. Tiempo de espera: dependerá al tipo de análisis a realizar ejemplo para hidrocarburos nos dice la norma 138 que son 14 días.
14. Conservador: tipo de conservador que se utilizara para preservar la muestra.
15. Identificación del sitio de muestreo: nombre del sitio.
16. Entregado por: firma del signatario encargado.
17. Hora y fecha: hora en que se termina el muestreo, llenado de cadena de custodia y fecha conclusión del muestreo.
18. Recibido por: nombre de quien recibe las muestras una vez ya enviadas del sitio donde se extrajeron.

19. Fecha y hora: fecha y hora en que llegan las muestras al laboratorio.
20. Laboratorio que recibe la muestra: nombre del laboratorio donde se realizara su análisis.
21. Temperatura de recepción de muestra: la temperatura en que llega la muestra al laboratorio una vez enviada del sitio donde se extrajo
22. Página: el número de páginas a entregar.

6.4 Resultados analíticos

El propósito del análisis de suelo es determinar si se concluyó con éxito el proceso de remediación de suelo y se llevaron las concentraciones de los contaminantes por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012. El Plan del Muestreo Final Comprobatorio puede sufrir algunas modificaciones dependiendo de la accesibilidad de los puntos a ser muestreados o bajo consideraciones a juicio del personal experto en su ejecución. Como se ha mencionado, las muestras colectadas en la ejecución de los planes de muestreo serán enviadas al laboratorio LABSA S.A. de C.V. el cual cuenta con la acreditación ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) así como la aprobación por parte de la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA). Se establecen como objetivos, la cuantificación de las fracciones: Ligera, Media, Pesada, así como de los BTEX y HAP's.

Método EPA usado, de acuerdo a la normatividad aplicable para hidrocarburos NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012:

- Hidrocarburos fracción ligera. Se analizan con forme a la NMX-AA-105-SCFI-2014 Para realizar este método se deben utilizar las siguientes técnicas de introducción de muestra, acopladas al sistema de Cromatografía de Gases con Detector de Ionización de Flama (CG/DIF) o al sistema de Cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de Masas. El análisis de Hidrocarburos Fracción Ligera cubre el intervalo de átomos de carbono de C5 a C10, en su mayoría compuestos volátiles. La determinación cuantitativa se realiza por CG/DIF o CG/EM, obteniendo como resultado un perfil de picos cuya separación está en función de los pesos moleculares de los hidrocarburos presentes. Se realiza una extracción de la muestra mediante la técnica de purga y trampa (PyT) utilizando cualquiera de los sistemas de introducción (sistema abierto o sistema cerrado), los cuales tienen como objetivo principal evitar la pérdida de los hidrocarburos por volatilización. Cualquiera de los sistemas de introducción va acoplado al cromatógrafo, con la finalidad de introducir los hidrocarburos directamente a la columna de separación inmediatamente después de haber sido extraídos del suelo.

- Hidrocarburos fracción media. Se analizan conforme a la NMX-AA-145-SCFI-2008 Este método describe el análisis de Hidrocarburos Fracción Media por Cromatografía de Gases con Detector de Ionización de Flama (DIF). Esta Norma Mexicana describe el método para determinar Hidrocarburos Fracción Media en Suelos. Los compuestos a determinar son los siguientes: Hidrocarburos Fracción Media cuyas moléculas cubran el intervalo de número de átomos de carbono de C10 a C28. El método para determinar Hidrocarburos Fracción Media en suelos se aplica en el intervalo de concentraciones de 120 a 10 000 mg/kg.
- Hidrocarburos fracción pesada. Se analizan conforme a la NMX-AA-134-SCFI-2006 Describir el método para determinar por extracción y gravimetría hidrocarburos de fracción pesada en muestras de suelo. Este método no es aplicable para medir materiales que volatilizan a temperaturas por debajo de 125°C. Una porción representativa de muestra es secada con sulfato de sodio. Después de secado, el material es extraído mediante cualquiera de las técnicas que se enlistan a continuación: Soxhlet - Sonicación. Se concentra, seca y pesa; para posteriormente ser tratado con sílica gel estandarizada para su purificación y determinación gravimétrica. Se evalúa una porción de muestra por separado para calcular el porcentaje de sólidos y el peso de la fracción seca es utilizado para calcular la concentración de HFP en peso seco.
- HAP's. Se analizan conforme a la NMX-AA-146-SCFI-2008. Este método analítico se usa para determinar la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en extractos preparados a partir de muestras de suelo. Para el análisis es necesario extraer previamente los HAP que están presentes en la muestra de suelo homogeneizada y cribada mediante cualquiera de las siguientes técnicas de extracción: Sonicación (disruptor ultrasónico o baño ultrasónico), Soxhlet o Extracción Acelerada con Disolventes.
- BTEX. Se analizan conforme a la NMX-AA-141-SCFI-2014. Este método describe los procesos para la introducción de muestra utilizando los sistemas de purga y trampa para el análisis de BTEX en concentraciones bajas y altas. Para el análisis, los compuestos BTEX se introducen en el cromatógrafo de gases mediante el método de purga y trampa directamente a la columna capilar. La temperatura de la columna se programa para separar a los analíticos, los cuales son detectados con un espectrómetro de masas y/o un detector de fotoionización.

La siguiente tabla, muestra las metodologías de análisis a utilizar, en el caso de los Hidrocarburos, estos métodos están referidos en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Tabla 14. Métodos analíticos para hidrocarburos

PRUEBA	NORMATIVIDAD	TECNICA	RESUMEN DEL METODO
Hidrocarburos fracción ligera	NMX-AA-105-SCFI-2014	ESPECTOMETRIA MASAS	El análisis de Hidrocarburos Fracción Ligera cubre el intervalo de átomos de carbono de C5 a C10, en su mayoría compuestos volátiles
Hidrocarburos fracción media	NMX-AA-145-SCFI-2008	CROMATOGRAFIA GASES (FID)	Hidrocarburos Fracción Media cuyas moléculas cubran el intervalo de número de átomos de carbono de C10 a C28.
Hidrocarburos fracción pesada	NMX-AA-134-SCFI-2006	GRAVIMETRIA	Se evalúa una porción de muestra por separado para calcular el porcentaje de sólidos y el peso de la fracción seca es utilizado para calcular la concentración de HFP en peso seco.
HAPS	NMX-AA-146-SCFI-2008	ESPECTOMETRIA MASAS	El método describe el análisis para determinar concentración de hidrocarburos Aromático policíclicos (HAP) en extractos preparados a partir de muestras de suelo
BTEX	NMX-AA-141-SCFI-2014	ESPECTOMETRIA MASAS	El método de concentraciones bajas de BTEX en suelos es aplicable al intervalo de 0,5 µg/kg a 200 µg/kg.

7 Conclusiones

Una vez emitidos los resultados por parte del laboratorio acreditado, se llevará a cabo el análisis comparativo entre las concentraciones obtenidas y los límites máximos permisibles establecidos en la “TABLA 2.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo” y la “TABLA 3.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo” presentes en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, con la finalidad de clasificar adecuadamente los resultados de las concentraciones analizadas de las muestras de suelo, tomando en cuenta que el uso de suelo para este pasivo en particular es de tipo Agrícola, forestal, pecuario y de conservación.

Tabla 15. Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO	
	Agrícola, pecuario y conservación	forestal, y de	Residencial y recreativo		Industrial y comercial
Ligera	200		200	500	NMX-AA-105-SCFI-2008
Media	1 200		1 200	5 000	NMX-AA-145-SCFI-2008
Pesada	3 000		3 000	6 000	NMX-AA-134-SCFI-2006

Tabla 16. Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE (mg/kg BASE SECA)			MÉTODO ANALÍTICO
	Agrícola, forestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial	
Benceno	6	6	15	NMX-AA-141-SCFI-2007
Tolueno	40	40	100	NMX-AA-141-SCFI-2007
Etilbenceno	10	10	25	NMX-AA-141-SCFI-2007
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	NMX-AA-141-SCFI-2007
Benzo[a]pireno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Dibenzo[a,h]antraceno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[a]antraceno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[b]fluoranteno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008
Benzo[k]fluoranteno	8	8	80	NMX-AA-146-SCFI-2008
Indeno (1,2,3-cd)pireno	2	2	10	NMX-AA-146-SCFI-2008

Una vez recibidos los informes de resultados de los análisis de las muestras colectadas, se procederá a generar una tabla con el concentrado de los resultados emitidos por el laboratorio LABSA S.A. de C.V., en los informes emitidos por el laboratorio se clasificarán las concentraciones obtenidas con base en los límites máximos permisibles de las tablas anteriores, clasificando con la leyenda de “cumple” cuando el resultado de la concentración de hidrocarburos en el suelo está por debajo del límite máximo permisible, en caso de que la concentración de la muestra exceda el límite se le clasifica como “no cumple”. Ante cualquier resultado que exceda los límites establecidos, se tendrá que continuar con el tratamiento específico de esa zona o biopila hasta llegar a obtener resultados que cumplan con la normatividad.

Industria y Servicios de Coahuila S.A. de C.V.

Actualización del Plan de Restauración de Suelos
Contaminados para la atención al pasivo ambiental derivado
de la emergencia por derrame de hidrocarburo con atención a
toma clandestina en el OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km
304+000”

14 de agosto de 2023

Contenido

1	Introducción	1
2	Objetivo	3
2.1	Objetivos específicos	3
3	Características del sitio de restauración.....	3
4	Tecnologías de Remediación autorizadas para Industria y Servicio de Coahuila, S A. de C.V.	5
5	Biorremediación por el método de Biopilas a un lado del sitio contaminado (PILA-LS)	7
5.1	Habilitación del área de la celda de tratamiento.	8
5.2	Construcción de celda de tratamiento.....	9
5.3	Excavaciones del material contaminado y su control:.....	10
5.4	Condiciones de operación en la celda para el tratamiento del suelo por la técnica de Biopilas.	11
5.4.1	Control de la humedad.....	12
5.4.2	Surfactantes.....	13
5.4.3	Microorganismos(SOLIBAC IP SOIL).....	14
5.4.4	Nutrientes.....	14
5.4.5	Materia orgánica.	15
5.4.6	Homogenización mecánica de las Biopilas.	16
5.5	Pruebas de tratabilidad.	18
5.6	Monitoreos.....	23
5.6.1	Muestreo inicial de suelo.....	23
5.6.2	Monitoreos de control interno para evaluar la degradación de los hidrocarburos (B). 23	
5.6.3	Muestreo final comprobatorio (MFC)	24
5.7	Reacomodo del suelo remediado.....	28
5.8	Manejo de residuos generados durante el tratamiento	29
5.9	Programa calendarizado de trabajo.	29

Lista de Tablas

<i>Tabla 1: Autorizaciones para el tratamiento de suelos contaminados.....</i>	6
<i>Tabla 2: Métodos de Restauración.</i>	6
<i>Tabla 3: Las características generales para la operación adecuada de la técnica de biopilas.....</i>	16
<i>Tabla 4: Categoría de pruebas de tratabilidad.</i>	18
<i>Tabla 5: Degradación del Contaminante a Través del Tiempo, donde se muestran los valores semanales.....</i>	21
<i>Tabla 6. Propuesta de puntos de muestreo final comprobatorio en paredes y fondos del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta</i>	26
<i>Tabla 7. Calendarización de la remediación</i>	29

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Plano de plumas de contaminación en el sitio y volúmenes de suelo contaminado.</i>	5
<i>Figura 2. Vista de planta de un sistema de Biopilas.</i>	8
<i>Figura 3. Proyección de celda de tratamiento para el pasivo ambiental aledaño al km 304+000....</i>	10
<i>Figura 4. Metodología de la técnica autorizada de Biopilas.....</i>	17
<i>Figura 5. Trabajos de tratabilidad de la muestra realizados con la tecnología por biorremediación.</i>	20
<i>Figura 6. Cinética Gráfica de la Degradación del Contamínate</i>	22
<i>Figura 7. Propuesta de distribución de los puntos de muestreo en paredes y fondos de las excavaciones a realizarse en el pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta.....</i>	25
<i>Figura 8. Diagrama de secciones transversales en biopilas para su muestreo de la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”</i>	27
<i>Figura 9. Distribución del Muestreo Final Comprobatorio en biopilas del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta.....</i>	28

1 Introducción

El continuo deterioro del ambiente en nuestro país a consecuencia de la mala gestión de la industria del petróleo ha generado impactos económicos sociales y ecológicos, cuyo costo han sido los riesgos y beneficios del impacto económico muy discutidos en los últimos años. La investigación tecnológica y la asimilación de experiencias a través de los años sobre derrames de hidrocarburos proveen en la actualidad de un conjunto de medidas de prevención y control de la contaminación para cada una de las actividades que se efectúan en la industria del petrolero.

En lo que respecta a la restauración de suelos a mediano y largo plazos, ya sea por derrames accidentales o por la actividad cotidiana de la industria petrolera, han generado una cultura hacia la búsqueda de métodos que permitan un resarcimiento del daño, sin que ello implique una mayor afectación que la causada por el mismo vertimiento de los contaminantes en el medio ambiente.

La magnitud del daño depende del tipo de hidrocarburo y del tipo de suelo, de las condiciones en que éste se encuentre, y de factores climáticos, como lluvias, viento e insolación. En general, el petróleo ligero causa un efecto dramático por un corto tiempo, mientras que el petróleo pesado produce un efecto menos dramático, pero que persiste durante más tiempo. Los procedimientos iniciales de la restauración de este sitio se encaminan a remover los contaminantes del suelo a través de métodos físicos, químicos y biológicos, orientados a proporcionar las condiciones adecuadas para el uso requerido del suelo. Considerando en gran medida la factibilidad de su aplicación, de acuerdo con las condiciones fisicoquímicas del suelo que se encuentra en el sitio, el tipo de contaminante (o contaminantes), las concentraciones de este que están inmersas en el suelo, entre otros.

El petróleo interfiere con las propiedades físicas del suelo, alterando el régimen de humedad. También afecta el estado de oxidación de diferentes minerales y compuestos orgánicos. Inhibe la nitrificación y provoca la salinización, principalmente en suelos de textura ligera en regiones climáticas secas y semisecas y en suelos mal drenados. Por otra parte, la presencia de hidrocarburos incrementa el porcentaje de carbón en el suelo, modificando la relación C/N.

Como parte inicial, se desarrolló el estudio de caracterización del sitio para identificar el grado de contaminación por hidrocarburo en el área colindante al OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta Km 304+000". Dicho estudio concluyó que el volumen de suelo impactado por hidrocarburos cuyas

concentraciones superan los valores permisibles establecidos por normatividad ambiental vigente en nuestro país (en este caso es la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, proyectando un volumen aproximado de 3,672.95 m³ de suelo contaminado).

La relativa simplicidad estructural de los microorganismos motiva su extraordinaria capacidad de adaptación a los múltiples microambientes en los distintos hábitats, una propiedad utilizada a lo largo del tiempo por el hombre para gestionar residuos biodegradables y tratar aguas de uso doméstico e industrial. En este sentido la biorremediación se puede definir como una tecnología que utiliza el potencial metabólico de los microorganismos, específicamente su capacidad para biodegradar total o parcialmente una amplia gama de compuestos, con el objetivo de limpiar terrenos o aguas contaminadas.

El fundamento bioquímico de la biorremediación se basa en que, en la cadena respiratoria, o transportadora de electrones de las células, se van a producir una serie de reacciones de óxido-reducción cuyo fin es la obtención de energía. La cadena la inicia un sustrato orgánico (en este caso los contaminantes son hidrocarburos) que es externo a la célula y que actúa como dador de electrones, de modo que la actividad metabólica de la célula acaba degradando y consumiendo dicha sustancia. Los aceptores más comúnmente utilizados por los microorganismos son el oxígeno, los nitratos, el hierro (III), los sulfatos y el dióxido de carbono. Cuando el oxígeno es utilizado como aceptor de electrones la respiración microbiana se produce en condiciones aerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo aerobio; sin embargo, si utiliza los sulfatos o el dióxido de carbono se produce en condiciones reductoras o anaerobias, y los procesos de biodegradación serán de tipo anaerobio.

De toda la amplia gama de técnicas dirigidas a la limpieza de emplazamientos contaminados, la biorremediación por su interés potencial y carácter multidisciplinario ha recibido una atención preferente en los últimos años por parte de profesionales de muy diversos campos. La complejidad intrínseca de esta tecnología hace necesaria una aproximación con enfoques diferentes y complementarios, en donde microbiólogos, químicos e ingenieros tienen un papel relevante y necesitan beneficiarse de los conocimientos y experiencia de cada uno de los integrantes del equipo. En lo que respecta a la microbiología del proceso, uno de los resultados más evidentes del esfuerzo investigador en los últimos años, ha sido la descripción de las rutas biodegradativas microbianas, aeróbicas y anaeróbicas, de una amplia variedad de compuestos relevantes desde el punto de vista medioambiental.

En la Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos en celda se tiene que planear cuidadosamente los tiempos y movimientos de tierra para asegurar la relación costo efectividad de la tecnología. A lo largo del proceso de remediación, se tienen que monitorear los niveles de contaminantes y los niveles de emisiones para ir optimizando las condiciones de operación del

sistema de restauración. El proceso de restauración continúa hasta que se obtengan por debajo de los límites máximos permisibles estipulados en la norma NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para el uso de suelo del sitio contaminado. Finalmente, para poder dar por concluida la remediación del sitio, para posteriormente realizar el reacomodo del material del lugar donde fue extraído.

2 Objetivo

Desarrollar el programa de remediación que permita disminuir las concentraciones de hidrocarburos en el suelo contaminado, hasta llegar por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la Tabla 2 y Tabla 3 de la NOM-138-SEMARNAT/SSA-2012 para uso de suelo agrícola.

2.1 Objetivos específicos

- Establecer la técnica de remediación adecuada para un volumen de suelo contaminado por hidrocarburos de 3,672.95 m³ en el área aledaña al Km. Km. 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta
- Establecer el programa de obra para el desarrollo de la remediación del suelo contaminado.

3 Características del sitio de restauración.

El sitio de estudio corresponde al área aledaña situada en el Km 304+000 del oleoducto de 24" Ø Nuevo Teapa-Cadereyta, tramo Victoria II – Linares. Específicamente en la instalación identificada como Presa el Carrizo I, la cual está situada a una distancia aproximada de 1.00 km al sur del pueblo de Estación Carrizos, correspondiente al municipio de Hidalgo, estado de Tamaulipas.

La presa del carrizo (lugar donde se ubica el pasivo ambiental) fue construida en el año de 1996 como parte de su infraestructura petrolera temporal, únicamente para contener parte del producto residual proveniente del ducto por acción de la operación denominada “corrida de diablos” en ese mismo año.

Lo anterior con base en la investigación histórica realizada por medio de consultas al personal de mantenimiento de PEMEX Logística anteriormente PEMEX Refinación, Sector Ductos Victoria.

Posteriormente en septiembre de 1997 se realiza una auditoría ambiental al sistema de transportación de hidrocarburos por ducto, donde se define que la presa el Carrizo presenta deficiencias dentro del rubro de suelo y subsuelo. En el 2003 se realizó la licitación para el estudio

de “CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y EVALUACIÓN DEL GRADO DE AFECTACIÓN POR DERRAME DE HIDROCARBURO EN PRESA EL CARRIZO I UBICADA EN EL KM 304+000 DEL OLEODUCTO DE 24” MADERO-CADEREYTA, TRAMO VICTORIA II – LINARES”, mismo que fue presentado junto con la Propuesta de Restauración Ambiental ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) quién en esa época era la autoridad quien vigilaba y atendía este tipo de situaciones de carácter ambiental.

Derivado del análisis del estudio, la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, adjunta a la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, bajo la Dirección de Restauración de Sitios Contaminados emitieron en febrero de 2004 la autorización con oficio No. DGGIMAR.710/000238 para realizar los trabajos de restauración del pasivo ambiental.

Hasta el 2022 no se habían realizado acciones en el sitio por situaciones de falta de asignación de presupuesto, así como de los diferentes cambios que se han dado dentro de la estructura de PEMEX (actualmente Logística).

En un análisis de imágenes satelitales del 2001 a la fecha, se puede observar que la presa continua con su labor de contener el material residual ahí depositado, ya que se han desarrollado actividades agropecuarias a su alrededor sin presentar alguna queja o daño por parte de los propietarios, además el crecimiento de vegetación es continuo sin presentar afectaciones a las comunidades forestales como el mezquite.

En el estudio de caracterización realizado en el sitio se definieron las características del sitio, conociendo a detalle las condiciones que imperan en el sitio, mismos que fue corroborado tanto de manera bibliográfica así como con los estudios de geofísica, topografía. Resultado de ello, fue que se pudo establecer un plan de muestreo representativo del sitio y que, mediante el análisis de las muestras obtenidas, permitió conocer el grado de contaminación que alberga el suelo que se encuentra en el sitio.

Con los resultados de los análisis químicos obtenidos se configuraron las plumas de contaminación y se calcularon las áreas y volúmenes a remediar, mismos que fueron plasmados en planos con coordenadas, para poder ubicar en campo dichas plumas y así realizar su tratamiento más adecuado.

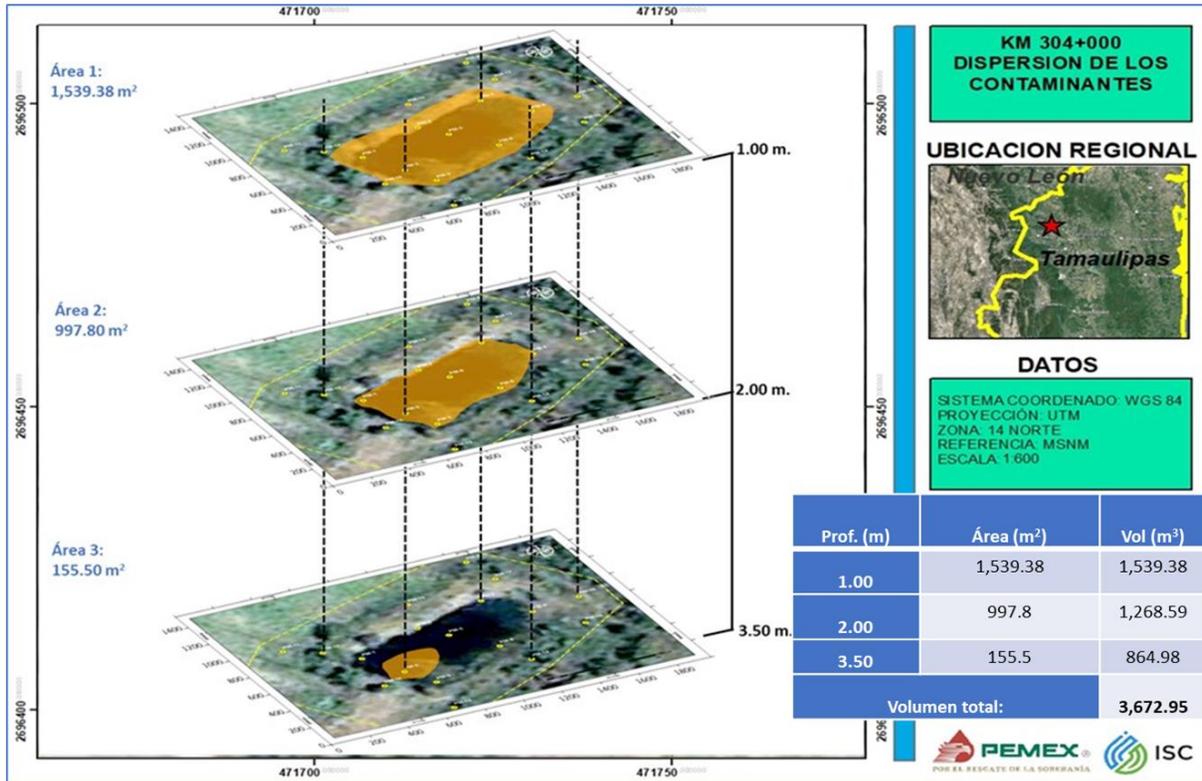


Figura 1. Plano de plumas de contaminación en el sitio y volúmenes de suelo contaminado.

En el caso del sitio que se caracterizó, el tipo de suelo se consideró como agrícola. Así, cualquier tecnología de remediación deberá considerar alcanzar los niveles de restauración para este tipo de suelo para la fracción media, pesada y ligera, así como para BTEX y HAP's. Este plan de remediación considera como meta el lograr que los niveles de todas las fracciones de hidrocarburo contengan concentraciones por debajo de los límites establecidos por la normatividad ambiental vigente (en este caso es la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 que establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio, y procedimientos para la restauración).

4 Tecnologías de Remediación autorizadas para Industria y Servicio de Coahuila, S.A. de C.V.

Industrias y Servicios de Coahuila, S.A. de C.V. cuenta con los permisos y autorizaciones vigentes para desarrollar distintas tecnologías de tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, emitidos por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) así como de la Agencia Seguridad Energía y Ambiente (ASEA), mismos que se muestran a continuación:

Tabla 1: Autorizaciones para el tratamiento de suelos contaminados

DEPENDENCIA	AUTORIZACIÓN No.	VIGENCIA
SEMARNAT	19-V-49-22	10 AÑOS
ASEA	ASEA-ATT -SCH-0095-2022	10 AÑOS

Con la finalidad de determinar la mejor tecnología para la remediación del sitio se realiza un análisis principalmente de los procesos y restricciones de cada uno de los métodos, en la Tabla 16 se presenta el resumen de las tecnologías de remediación de las cuales la empresa cuenta con autorización para su ejecución en condiciones similares a las que nos ocupa en el sitio aledaño al Km 485+763.10, en dicha tabla se presentan los trabajos a desarrollar, sus limitantes y la opinión que se da para la aplicación de dicho método:

Tabla 2: Métodos de Restauración.

MÉTODO	PROCESO	RESTRICCIONES PRÁCTICAS	OPINIÓN
Biodegradación por Landfarming en el sitio contaminado	Excavar, agregar nutrientes, realizar el laboreo del material para homogenizar y airear el material, lo cual favorece la degradación de los hidrocarburos.	Cadenas muy largas de hidrocarburo son difíciles de degradar, por lo que requieren del apoyo de adición de compuestos oxidantes y/o surfactantes, mismos que permitan la disgregación en fracciones más pequeñas de hidrocarburos	Requiere de superficies considerables para su tratamiento. Es una tecnología excelente para las fracciones de hidrocarburo media y pesada. Se obtienen buenos resultados ya que se pueden controlar todas las variables de operación. La desventaja de esta técnica es que solo se puede aplicar hasta 1m de profundidad
Bioventeo Aerobio en el sitio contaminando.	Realizar estudios de ROI para determinar la cantidad y ubicación de los pozos de inyección de aire y de nutrientes en el subsuelo.	Se requiere que el sitio presente una geología homogénea para la correcta difusión del aire y de los nutrientes en los diferentes pozos.	Esta técnica aplica favorablemente para los hidrocarburos de fracción ligera, media, BTEX, y HAP's. Aunque depende mucho de la permeabilidad del suelo
Extracción de vapores “in situ”	Extraer los vapores orgánicos a través de pozos de extracción, y tratarlos mediante una serie de filtros para no contaminar la atmósfera. Se debe vigilar la presencia de mantos freáticos	Permeabilidad tiene que ser mayor de 10-8 cm ² , La humedad de saturación debe ser menor a 85%. Depende de la concentración de compuestos volátiles que se encuentren en la composición del contaminante	Es la tecnología más adecuada cuando se trata de hidrocarburos fracción ligera, y BTEX, aunque también aplica para Hidrocarburos fracción media y HAP's. El parámetro más importante para que sea efectiva es la permeabilidad del suelo.
Biorremediación por Biopilas a un lado del sitio contaminado	El material es colocado en una celda de tratamiento, en ella se adicionan los insumos que permitan el adecuado desarrollo de los microorganismos y que ello permita la degradación de los hidrocarburos, una vez que se ha restaurado, se regresa a su sitio	Para evitar la volatilización de los contaminantes hacia la atmósfera es necesario colocar membranas para cubrirlo. Por otra parte, concentraciones de contaminante muy elevadas tienden a producir un efecto inhibitorio en los	Es utilizada principalmente para hidrocarburos fracción media y pesada, aunque también puede funcionar en fracción ligera donde se usa una membrana impermeable para evitar su volatilización.

MÉTODO	PROCESO	RESTRICCIONES PRÁCTICAS	OPINIÓN
	original. nutrientes, reponer en el sitio original.	microorganismos responsables de su degradación	
Oxidación química a un lado del sitio	Este tipo de tratamiento requiere de excavar, mover a una celda de tratamiento para ahí realizar la oxidación de todo el material.	Obtención rápida de degradación de hidrocarburos, aunque requiere de un estricto control del pH, y grandes cantidades de reactivos para poder oxidar todo el contaminante.	El proceso de oxidación afecta también a la calidad biológica que posea el suelo tratado, por lo que se requiere de un tratamiento posterior para neutralizar el material y restaurar la microbiota.

Derivado del análisis de las diferentes técnicas autorizadas con las que cuenta industria y Servicios de Coahuila, S.A. de C.V. y considerando el tipo de contaminante así como los volúmenes de suelo impactado es de 3,672.95 m³, se propone utilizar para este sitio la técnica conocida como “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”, donde es necesario contar una celda de tratamiento que evite el contacto del suelo contaminado con el suelo limpio y que a la vez sea lo suficientemente impermeable para evitar que los lixiviados migren hacia el suelo y subsuelo. A continuación, se realiza una descripción de esta tecnología.

5 Biorremediación por el método de Biopilas a un lado del sitio contaminado (PILA-LS)

Esta técnica es otro sistema de tratamiento biológico, donde los hidrocarburos son degradados mediante un proceso de mineralización con el cual los microorganismos utilizan los hidrocarburos como fuente de carbono para su alimentación, donde reducen las cadenas de los hidrocarburos en compuestos más sencillos.

A diferencia de la técnica de remediación por Land farming, en esta podemos establecer un mayor control en el proceso de la degradación biológica de los hidrocarburos, al monitorear de manera contante los procesos que se desarrollan dentro de la Biopila. Donde, una serie de biopilas serán colocadas en el interior de una celda de tratamiento, misma que será construida en un área alejada al sitio contaminado, en ella se depositará de manera gradual el material contaminado, hasta ir formando una pila de cierta altura que permita de manera posterior la aplicación mediante riego de los diversos productos destinados especialmente para acelerar el desarrollo metabólico de los microorganismos (básicamente agentes surfactantes y nutrientes orgánicos) y por consecuencia incrementar la velocidad de degradación de los contaminantes en un periodo de tiempo relativamente menor. El escenario ideal es aquel en el que las poblaciones microbianas están capacitadas para utilizar los contaminantes como sustratos de crecimiento y en que las condiciones ambientales no inhiben su desarrollo. Es decir, que la biodegradación del contaminante permite a los microorganismos obtener la energía necesaria para sus funciones vitales y, al mismo tiempo,

sintetizar todos sus componentes celulares. En el caso de los hidrocarburos, la biodegradación más eficiente es la ligada al metabolismo microbiano aeróbico, es decir, su oxidación mediante oxígeno molecular, que en el complejo proceso metabólico celular hará el papel de lo que denominamos “aceptor final de electrones”. La aireación será, pues, la primera estrategia de estimulación que llevaremos a cabo en un proceso de biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos.

Las tres razones principales que provocan estos largos plazos son:

- Cantidad de oxígeno biodisponible en el suelo, insuficiente para el adecuado desarrollo de los microorganismos degradadores de los hidrocarburos.
- Escasa cantidad o mala distribución en el suelo de nutrientes, humedad lo que propicia que los procesos de degradación no se produzcan de manera uniforme.
- Otra es que los contaminantes no son biodisponibles por encontrarse adsorbidos en la superficie de las partículas del suelo, razón por la cual cobra importancia la adecuada adición de los Surfactantes que son adicionados al material.

El sistema general de la técnica de biorremediación por biopilas en una celda de tratamiento se muestra a continuación:

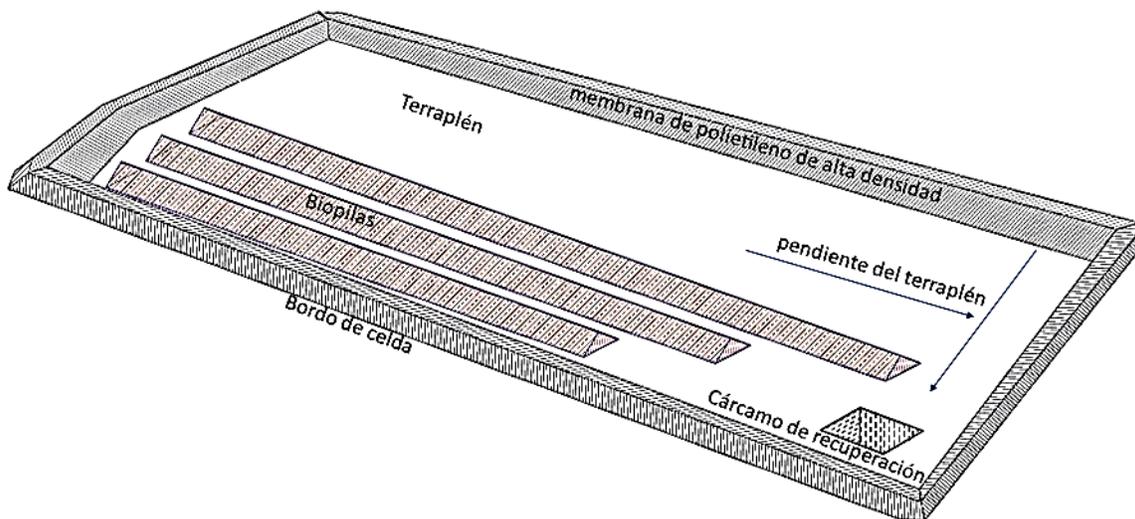


Figura 2. Vista de planta de un sistema de Biopilas.

5.1 Habilitación del área de la celda de tratamiento.

Como primera etapa de los trabajos de biorremediación, consiste en el desarrollo de las actividades de adecuación del sitio donde se instalará la celda de tratamiento, misma que se ubicará en un área colindante próxima al sitio contaminado. La actividad inicia con el transporte del personal, material,

equipo y herramienta necesarios hasta el sitio donde se llevarán a cabo los trabajos. Una vez en el área delimitada se realizan las actividades de limpieza para el retiro de todo aquel material que pudiese alterar el buen desarrollo de los trabajos, posteriormente se realiza el despalme con maquinaria para de esta manera ir realizando la nivelación del terreno, dejando una pendiente aproximada de 5% y de esta manera conducir todo aquel líquido excedente que se encuentre dentro de la celda de tratamiento hacia la fosa de captación de lixiviados, la cual se ubicará en el punto más bajo del terreno donde está situada la celda.

Otra de las actividades a desarrollar es la habilitación de los caminos de acceso donde se ubicará la celda y de esta manera poder asegurar un adecuado desarrollo de los trabajos de remoción y transporte del material extraído del sitio contaminado. Dichos trabajos serán realizados empleando la maquinaria pesada (retroexcavadoras, excavadoras, camiones de volteo de 14 m³, entre otros).

5.2 Construcción de celda de tratamiento.

Una vez terminados los trabajos de nivelación del terreno, para la construcción de la celda se llevan a cabo en las siguientes etapas:

- El tendido de una primera capa de material de banco (básicamente arcillas) con un espesor no menor a los 20 cm, la cual será compactada hasta obtener un 90% de compactación de la prueba Proctor y de esta manera funcionar como base de la celda de tratamiento e impedir la posible migración de lixiviados. Así mismo se construirán los bordos de la celda, utilizando el mismo material de banco, dichos bordos tendrán una altura máxima de 1.50m.
- La siguiente etapa consiste en el tendido de una película de polietileno de alta densidad (PEAD), de 1.0 mm de espesor la cual es la barrera impermeable que prevendrá la infiltración de contaminantes hacia capas inferiores del suelo no afectado, esta se colocará en toda la extensión de la celda de tratamiento, así como de los bordos de esta, asegurándola para que esta no se mueva una vez que esta fue colocada.
- Así mismo se construirá un cárcamo para la captación de lixiviados con, al menos, la capacidad suficiente para captar los escurrimientos que se generen durante el proceso de tratamiento.
- Una vez instalada todo el PEAD, se colocará una capa de material de banco (arcillas) con un espesor máximo de 30 cm, misma que será compactada hasta un 90% de prueba Proctor, esto con la finalidad de proteger la película del paso de la maquinaria para el acarreo del material contaminado que fue removido (mediante excavación) y depositado en la celda de tratamiento.

Con base al volumen de suelo contaminado a extraer, se plantea la construcción de una celda de tratamiento de un área de 7,226.019 m², con bordos de 1.5m de altura aproximadamente y su fosa de lixiviados, la cual puede ser establecida a 50m al suroeste del área a excavar.

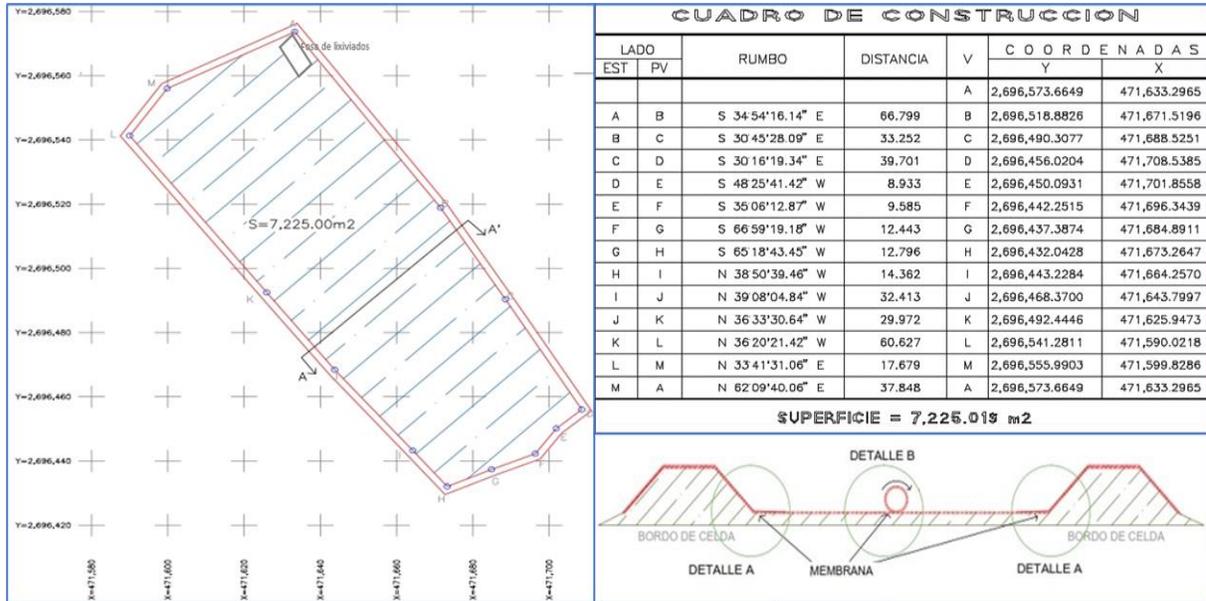


Figura 3. Proyección de celda de tratamiento para el pasivo ambiental aledaño al km 304+000

5.3 Excavaciones del material contaminado y su control:

Una vez que la celda está lista, se inicia la excavación del suelo contaminado, mediante el uso de maquinaria pesada, siendo esta una operación en la que deben extremarse todas las medidas de seguridad para evitar accidentes y daños a la estabilidad de las líneas de transporte de Pemex. Estos trabajos no deben iniciarse si no se tienen perfectamente identificadas las líneas que pasan a través del derecho de vía y el área de excavación que deberá estar bien establecida en el plan de excavación, este último está basado en el estudio de caracterización, considerando las observaciones de campo y los alcances de las partidas de excavación.

Este plan se apoya con la información (planos y coordenadas) que permitan trazar en campo las áreas de las plumas de contaminación indicadas en el estudio de caracterización. Por lo que, a través del apoyo del levantamiento topográfico del sitio, para hacer el replanteo o georreferenciación del trazado de las áreas de excavación, identificando plenamente el área la profundidad que abarcan cada pluma de contaminación, a la que se debe excavar en cada una de ellas. Los volúmenes extraídos serán medidos en banco y registrados en la bitácora de obra para determinar los avances y acumulados diarios de cada una de las partidas de excavación.

Con la finalidad de disminuir las emisiones a la atmósfera en las excavaciones, la extracción de suelo se realizará con maquinaria pesada para hacer los cortes y de inmediato cargar a camiones de volteo y estos llevar el suelo a la celda para el tratamiento.

El material excavado con maquinaria pesada (excavadora o retroexcavadora), este será colocado en camiones de volteo para su traslado a la celda de tratamiento. Cabe señalar que los camiones de volteo que transportarán el material extraído del sitio utilizarán cubiertas impermeables para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera durante el recorrido a la celda. Se cuidará en todo momento los accesos a la celda, señalando entradas y salidas, todo esto con el fin de evitar cualquier situación con las unidades en movimiento que ahí estarán circulando, durante el movimiento de material hacia la celda.

Una vez que se ha llegado al punto de tiro, el camión de volteo realizará las maniobras pertinentes, que le permitan descargar el material de tal manera que deje espacios reducidos entre cada descarga, esto con el fin de ir integrando la pila de manera uniforme, en el caso de que se desborde el material extraído hacia otras zonas de la celda, se realizará el acomodo mediante una retroexcavadora hasta dejar la pila en condiciones adecuadas de operación.

Como medida de control de la excavación, una vez que se haya llegado a una profundidad o área límite, se realizará la toma de muestra y análisis para la determinación de TPH's por medio del PetroFLAG y con ello verificar que el suelo que está presente contiene valores cercanos a los correspondientes al suelo natural (no mayores a las 300 ppm). Llevando un registro diario de los avances y acumulados en el volumen de cada de la excavación realizada y que esta coincida con lo señalado para cada pluma de contaminación identificada en el estudio de caracterización. Una vez que se llega a valores de concentración de TPH's por debajo del valor límite establecido, se dejará de excavar en esa zona y se continuarán con las otras hasta dejar completamente el sitio libre de material contaminado. Para posteriormente solicitar el muestreo comprobatorio, mismos que se realizará con un laboratorio debidamente acreditado y que cumpla con la normatividad ambiental vigente.

5.4 Condiciones de operación en la celda para el tratamiento del suelo por la técnica de Biopilas.

Ahora bien, para poder obtener buenos resultados en esta técnica de remediación, es de suma importancia lograr que el suelo contaminado presente en la celda se encuentre completamente disgregado, para que las condiciones sean consideradas como representativas de todo el material contenido en la celda, para ello es necesario ir realizando su acomodo de manera correcta, conformando las biopilas con una base de 4.0 m y una altura de 3.0 m. Para maniobras de la

maquinaria dentro de la celda de tratamiento se dejará un espacio entre biopilas de aproximadamente 2.5 m de ancho así como un espacio mínimo de 3.0 m a las cabeceras y costados de las mismas. La pilas deberán contar con un ángulo de reposo de 45°.

Cabe mencionar que debido a las características de los contaminantes presentes, como lo son la fracción ligera y los BTEX, se han tomado consideraciones especiales para su pronta degradación y con esto evitar en lo posible la transferencia de contaminantes a la atmosfera. En primera instancia y como se mencionó anteriormente, se empleará maquinaria pesada para disminuir los tiempos de corte, así como de extracción del material contaminado, posteriormente se emplearán camiones de volteo con capacidad de 14m³ que estarán cubiertos por una membrana impermeable con lo cual se disminuirán de manera considerable dichas transferencias. Una vez llegado el material a la celda, se procederá a conformar la biopila e inmediatamente se hará la agregación de humedad con el surfactante al igual que la adición de microorganismos, nutrientes y abono para posteriormente cubrir la pila con una membrana impermeable por un periodo de 20 días, mismos en los que se proyecta que se acelere la degradación de los hidrocarburos de fracción ligera y BTEX. Dicha situación será monitoreada mediante el análisis de Compuestos Orgánicos Volátiles en cada biopila y una vez que se haya detectado la disminución de los COV's, se procederá a realizar una nueva homogenización y aplicación de los reactivos mencionados, de igual manera se considera el volver a cubrir la pila con la membrana.

A continuación se desarrolla las fases del proceso de tratamiento de suelo

5.4.1 *Control de la humedad.*

Uno de los aspectos importantes para lograr un medio adecuado para lograr la biorremediación de los hidrocarburos, es el mantener el nivel necesario de humedad, por lo que se debe de planificar la cantidad de agua que se debe de incorporar, tomando en cuenta el tipo de suelo que será tratado es del tipo arcilloso, cuya capacidad de drenaje es menor al esperado en este tipo de tratamientos, por lo que se incrementará la humedad sin que se llegue a la saturación, experiencias en proyectos similares, así como la literatura señala que esta debe de mantenerse en un intervalo del 20 al 75%. La mejor manera de lograr el control adecuado de la humedad se logrará con el laboreo del material, tal como se mencionó anteriormente. El agua será adicionada empleando una pipa pequeña conforme se va avanzando con el acarreo del material hacia la celda o con una de mayor volumen una vez que todo el material a tratar se encuentra depositado en la misma.

En caso de que se presentasen lluvias durante el tratamiento del material, el agua excedente será captada en la fosa de lixiviados, ubicada en el extremo más bajo de la celda, donde se realizará su

recuperación y posteriormente ser ingresada en la celda de tratamiento, como parte del agua de uso para el tratamiento. Por último, la aplicación del agua en el material será cuando esta sea utilizada como medio de dilución durante la adición de los diferentes reactivos se serán utilizados durante el tratamiento.

5.4.2 *Surfactantes.*

Estos Surfactantes son compuestos anfifílicos que poseen la capacidad de interactuar con una molécula que presenta a la vez un grupo polar (hidrofílico) y un grupo apolar (hidrófobo) y por lo tanto ubicarse en la interfase de estos. Esta afinidad por las interfaces es lo que les otorga sus principales características de disminuir la tensión superficial, logrando de esta manera aumentar la solubilidad de los hidrocarburos inmersos en el suelo.

Otra característica del surfactante es su tendencia en asociarse, esto ocurre en una acumulación de surfactantes, el cual comienza por adsorberse a las interfaces disponibles, luego su concentración aumenta hasta que se forman las primeras micelas, por lo que, estos surfactantes permiten la interacción entre el medio de dilución y el hidrocarburo, dado que esta sustancia es biodegradable y provoca la formación de una emulsión, es decir, el hidrocarburo se fragmenta en pequeños aglomerados (micelas), cuya propiedad de interés en la biorremediación es su polaridad, la cual permite la miscibilidad del hidrocarburo en el medio de dilución. El surfactante utilizado por Industria y Servicios de Coahuila es el Quantum Clean, mismo que se encuentra dentro de los procesos que fueron autorizados por la ASEA y SEMARNAT. Este producto será adicionado en primera instancia en una proporción de 12ml de solución acuosa/kg suelo, mediante el sistema de aplicación de humedad, esto con la finalidad de que la interacción del emulsificante con el suelo en tratamiento permita lograr una mayor disociación de las cadenas cortas del hidrocarburo y de esta manera propiciar que estas fracciones puedan mejorar la biodegradación, aumentando la solubilidad y la biodisponibilidad del hidrocarburo a los microorganismos degradadores que se encuentran en el suelo de manera nativa. Una vez que se haya realizado su aplicación en el material, se dejará en reposo de 8 hr, esto con la finalidad de que el producto reaccione con el suelo.

Posteriormente, para continuar con la degradación de las cadenas de hidrocarburos más grandes se aplicará este reactivo en una proporción de 8 ml de solución acuosa/kg suelo. Cabe señalar que las cantidades de aplicación dependerán del avance en la remediación del suelo. La aplicación de este surfactante tendrá la mayor intensidad al principio del tratamiento y posteriormente se irán adicionando de acuerdo con los resultados de los muestreos de control realizados al material de la biopila.

5.4.3 *Microorganismos(SOLIBAC IP SOIL)*

En los procesos de biorremediación, una de las características más importantes que se debe cuidar en el suelo a tratar es el de las UFC de bacterias heterotróficas, el cual debe permanecer por encima de 1,000 unidades para su correcto funcionamiento. Por lo que, una vez añadidos los nutrientes en el material, para que la biorremediación sea adecuada requiere que estos entren microorganismos soporten la acción de cuando estos entran en contacto con el suelo impregnado y hacer frente a las concentraciones relativamente tóxicas para los microorganismos, por lo que es de suma importancia el lograr que su concentración se mantenga en condiciones óptimas de crecimiento de la población degradadora durante el transcurso de los trabajos de remediación.

Para lograr este fortalecimiento de las bacterias nativas que existen en el suelo afectado, se adicionará la fórmula microbiana de SOLIBAC IP SOIL en varias etapas en las que dura el tratamiento, cabe señalar que esta fórmula es una mezcla sinérgica de microorganismos del género Bacillus y Pseudomonas especialmente seleccionados y adaptados para degradar compuestos orgánicos presentes en el suelo contaminado. Esta fórmula bacteriana debe ser activada previamente a su aplicación 24 horas antes. Dicha activación y dilución de las bacterias específicas se llevará a cabo en tanques en el que se adiciona agua y una cubeta de 10 kg que contienen a los microorganismos liofilizados, a la solución se le incorpora aire, proporcionado por un difusor en el interior del tanque y se mantiene en movimiento, incrementando su oxigenación lo que promueve su reproducción de los microorganismos que serán adicionados al suelo.

Esta solución será adicionada al material por los mismos medios con los que se han aplicado los reactivos y el agua en las Biopilas. Por lo que será una vez que se haya terminado la aplicación con el Quantum Clean (8 hrs después de su aplicación en el material), asegurando que ya pasó la mayor reacción del surfactante con el suelo y que ya se formaron las micelas del hidrocarburo y así los microorganismos puedan utilizar esos fragmentos como su fuente de carbono. En primera instancia se aplicará un primer inóculo de estas bacterias y se dejará interaccionar con el material contaminado con el hidrocarburo por un espacio de 20 días. Posteriormente dependerá de como vaya el avance de la degradación de los hidrocarburos, siendo esto medido durante los muestreos de control internos que serán realizados de manera periódica para un adecuado control de operación de las biopilas.

5.4.4 *Nutrientes*

Como todo sistema vivo, los microorganismos empleados para la degradación de hidrocarburos, necesitan encontrar en el medio una fuente de nitrógeno, la cual es vital para el desarrollo del

sistema (una relación óptima de los nutrientes orgánicos C :N: P es de alrededor 100:10:1), en el caso que nos ocupa el aditivo que empleamos se denomina TRIPLE 17, el cual incorporará al medio en solución, la cantidad y concentración que será determinada en su momento según el desarrollo de los microorganismos.

Como ya se ha mencionado la humedad y la relación de nutrientes son dos características que si se pueden manipular con relativa facilidad adicionando agua y nutrientes disueltos al suelo contenido en la biopila. La cantidad de nutrientes y agua que deben adicionarse serán calculados utilizando los resultados del análisis de las muestras, así como la determinación de la humedad contenida en el suelo, antes de su ingreso a la biopila. Los nutrientes son muy solubles en agua por lo que no cuesta mucho trabajo su disolución, por lo que se disolverán 8.35 Kg del fertilizante TRIPLE 17, primero perfectamente en un recipiente pequeño y posteriormente se agregarán a la pipa que se empleará para incorporarlos a la biopila de tratamiento para que se obtenga una mejor mezcla de nutrientes-agua en la pipa donde es más difícil disolver y homogenizar la solución por agitación. La aplicación de TRIPLE 17 se realizará posterior a la aplicación de los microorganismos, esto con el fin garantizar una atmósfera adecuada y evitar la saturación del medio con sales que pudiesen inhibir el crecimiento de los microorganismos. Esta solución será preparada en tambores de 200L en el predio en tratamiento y su manejo no requiere de ningún cuidado en especial. Su aplicación será de la misma manera que los reactivos anteriores, es decir, una vez que se han formado las biopilas, posterior a la adición de los microorganismos, se aplicarán los nutrientes diluidos en agua hacia el material que conforma cada Biopila, mismas que se encuentran en la celda de tratamiento. Dicha aplicación dependerá del avance gradual que presente la degradación de los hidrocarburos presentes en las biopilas.

5.4.5 *Materia orgánica.*

Dado que este material contiene un considerado índice de arcillas, al material en tratamiento se le aplicará una enmienda con materia orgánica en un porcentaje no mayor al 6% del volumen total de la celda de tratamiento, mismo que será dividido entre el número de aplicaciones que se hagan a las Biopilas, esto con la finalidad de incrementar la porosidad y permeabilidad del material en tratamiento, ya que facilita la difusión del oxígeno, permitiendo que prevalezcan las condiciones aeróbicas en el medio y de esta manera incrementar la eficiencia del proceso de desarrollo de los microorganismos que participan en la degradación del hidrocarburo presente en el material. Su aplicación será de manera gradual por capas, en coordinación con la aplicación de los nutrientes, previas a la humectación o aplicación de los microorganismos, para posteriormente realizar su mezclado, asegurando su correcta integración en todo el material.

5.4.6 Homogenización mecánica de las Biopilas.

Como se ha mencionado, el movimiento del material contenido en la celda de tratamiento con ayuda de la maquinaria, permitirá realizar la correcta homogenización del material, mediante el cual se incrementa de manera importante el contacto entre los microorganismos, nutrientes y contaminantes, mejorando la biodegradabilidad este último inmerso en la matriz suelo. Esta actividad de homogenización del suelo también redistribuye los contaminantes, produciendo una adecuada reacción entre los diferentes niveles de contaminación.

Cabe resaltar, que para este proyecto en específico, se tiene contemplado que, una vez que se haya colocado todo el material contaminado que fue extraído de la excavación en la celda de tratamiento y que ya se haya formado la biopila adecuadamente, la homogenización de este material se considerará al movimiento que tuvo el material mediante las acciones de excavación así como de la carga y descarga de los camiones de volteo. Esto con la finalidad de no provocar una mayor dispersión de los hidrocarburos de cadenas cortas que aún se encuentran inmersos en la matriz del suelo. Posteriormente, cuando se haya corroborado de que dicha concentración ha disminuido de manera considerable, se procederá a realizar su homogenización mecánica de manera continua, misma que será de manera intensiva y constante, asegurando que este sea realizado en la totalidad del material contenido en las biopilas de la celda de tratamiento.

La profundidad a la que se va a mezclar el suelo permitirá una mayor difusión del oxígeno atmosférico en las capas inferiores del suelo, el cual se encuentra disminuido a profundidades mayores de 50 cm, es por ello por lo que este trabajo mecánico permitirá su distribución en esta capas inferiores que quedan expuestas durante el volteo del material y así sucesivamente. Otra de las funciones de esta homogenización mecánica, es el que permitirá ayudar en el control de la humedad presente en el material, ya que con ello se logra una homogenización del agua aplicada en la biopila. Por lo que esta acción se realizará cada vez que se realice la humectación o con la presencia de lluvias, en un tiempo no mayor a las 24 hr.

Tabla 3: Las características generales para la operación adecuada de la técnica de biopilas

CARACTERÍSTICA DEL SUELO	VALOR
Bacterias heterotróficas (UFC/gramo)	> 1000
pH	6 - 8
Humedad (% de saturación)	40 – 85 (12 a 30 % peso)
Temperatura (°C)	10 - 45
Nutrientes (C:N:P)	100:10:1
CARACTERÍSTICAS DEL CONTAMINANTE	VALOR
Tipo de contaminante	Destilados ligeros, medios a hidrocarburos pesados
Concentración máxima (ppm)	≤ 50,000

A continuación se muestra el diagrama de la metodología así como de la tabla resumen de los parámetros de operación de la biorremediación del suelo contenido en la celda de tratamiento:

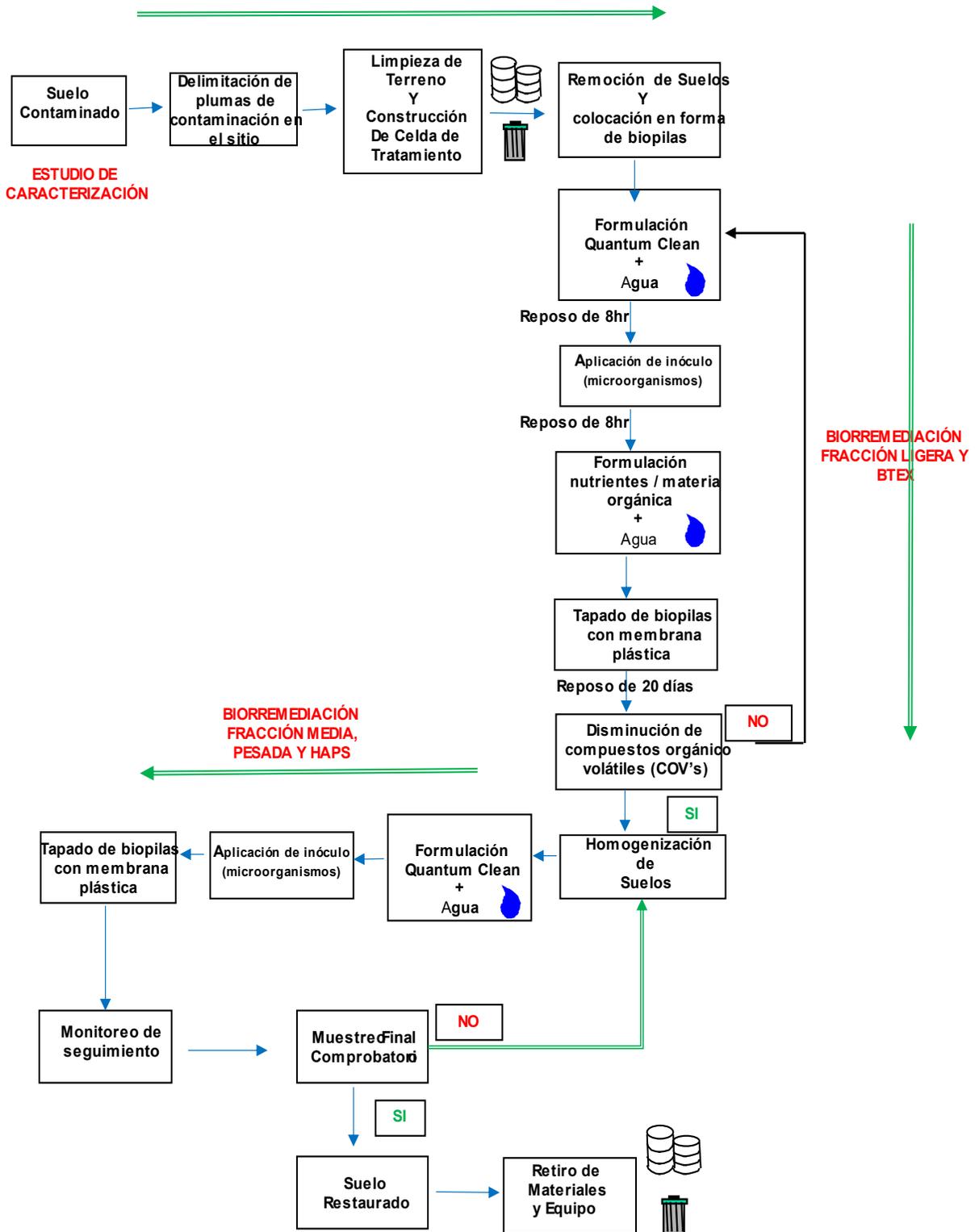


Figura 4. Metodología de la técnica autorizada de Biopilas

5.5 Pruebas de tratabilidad.

El éxito en la Restauración de un sitio contaminado, a menudo, se mide mediante el porcentaje de reducción en la concentración del contaminante en el terreno o agua subterránea. Este criterio resulta poco convincente, ya que algunos procesos pueden conseguir altos porcentajes de eliminación y aun así, no alcanzar los objetivos de depuración establecidos. Al mismo tiempo, los contaminantes pueden ser transportados más allá de los límites del terreno o aguas contaminadas, o transformados de manera abiótica a través de otros procesos como volatilización, migración o fotooxidación. En tal caso, los objetivos de la restauración no se cumplirían necesariamente. En la siguiente tabla se muestra una clasificación de las diferentes categorías en las que se puede conducir una prueba de tratabilidad, misma que considera varios aspectos importantes para demostrar la aplicabilidad de una tecnología de restauración específica para un sitio determinado.

Tabla 4: Categoría de pruebas de tratabilidad.

Criterio	Escala Laboratorio	Escala Banco	Escala Piloto
Tipo de datos	cualitativo	cuantitativo	cuantitativo
Parámetros críticos	Varios	Pocos	Pocos
No. de replicas	Simple / duplicado	Duplicado / triplicado	Triplicado ó más
Tamaño del estudio	Pruebas de jarras o estudios en matraces	Algunos pueden ser extensos como en charolas o contenedores	Planta piloto (on site u off site)
Tipo de proceso usual	Lotes	Lotes o continuo	Lotes o continuo
Tiempo requerido	Horas / días	Días / semanas	Semanas / meses

El presente proyecto, además de tener como propósito la estimación del impacto provocado al medio ambiente debido al derrame de hidrocarburo, como otro de sus objetivos tiene el proponer medidas correctivas que le devuelvan al sitio las características de uso de suelo que este presentaba antes del incidente. Por lo anterior, el trabajo contempla el desarrollo de una serie de pruebas de tratabilidad a nivel blanco para la obtención de datos confiables que faciliten considerar las condiciones óptimas de trabajo que serán aplicadas en campo.

En la primera propuesta se realizaron pruebas de tratabilidad siguiendo la tecnología de remediación por landfarming, actualmente y considerando la fracción ligera presente en el suelo contaminado se ha establecido que la técnica de Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado es más adecuada ya que permite hasta cierto punto un control sobre las emisiones de contaminantes a la atmosfera. La diferencia entre ambas técnicas radica principalmente que las biopilas utilizan una membrana impermeable para el control de operación de la biopila que también sirve para la contención de todo tipo de contaminantes de hidrocarburos. Debido a la similitud en ambas técnicas, se toman de referencia las pruebas de tratabilidad anteriormente realizadas por medio de land farming para tener una aproximación de la efectividad del tratamiento por biopilas, en el entendido de que, al controlar las condiciones de operación de esta técnica se obtendrán mejores resultados de los que se presenten a continuación.

Prueba de tratabilidad anteriormente realizada:

Para poder realizar pruebas con buen asertividad, se realizó la toma de suelo impactado en el sitio de estudio en el Km 304+000, en la misma ubicación donde se obtuvo la muestra de suelo durante la caracterización del sitio, cuyo valor de concentración de contaminante era representativa de toda el área. Este punto seleccionado fue el identificado en el plan de muestreo como PM-7, cuyas coordenadas son: UTM 471740.97 m E y 2696485.71 m N, el cual presentó un resultado analítico de 3,914.94 Kg/mg de fracción pesada a una profundidad de 1.00 m. A este mismo material se le realizó un análisis de hidrocarburos totales de petróleo (HTP's) por medio del analizador portátil PetroFLAG y con ello realizar una comparativa entre ambos métodos analíticos y de esta manera llevar un mejor seguimiento de la degradación del contaminante durante el desarrollo de estas pruebas.

Se procedió a tomar 10 gr de muestra y se le aplicó el procedimiento de extracción y análisis de TPH's, tal como lo señala el manual para el factor de respuesta número seis. Dando como resultado del análisis de PetroFLAG un valor de 5,366 ppm presentes en la muestra de suelo obtenida del punto PM-7.

De este punto seleccionado se recolectó una muestra con un volumen de 10 kg de suelo, misma que fue dividida en dos partes iguales de 5 kilogramos cada una, depositándolas en charolas con una cubierta plástica a forma de membrana impermeable. La primera charola fue utilizada como "testigo" para observar su comportamiento natural procurando mantener condiciones como las que tendría este material si se encontrara aun en el sitio, es decir teniendo variaciones únicamente de humedad y temperatura, las cuales fueron controladas por medio de un aspersor con agua y una temperatura ambiente. Esta muestra nos servirá para comparar la cinética de degradación de hidrocarburos que se presentará en la muestra de la segunda charola.

En esta segunda charola, se llevó a cabo la técnica, cuya metodología señala que se debe iniciar con la homogenización del material de manera manual, una vez teniendo la muestra lista se procedió a la preparación y aplicación de los aditivos mediante un aspersor manual. iniciando con el Quantum Clean, mismo que adicionado en una solución de 8 mililitros por cada kilogramo de suelo, es decir 40 mililitros del reactivo, el cual fue diluido en 110 mililitros de agua sin cloro, lo que nos da un total de 150 mililitros que se aplicaron mediante el aspersor y con ello tener un mejor control en la aplicación, evitando la saturación del suelo, y así poder dispersar dicha solución en el suelo. Una vez terminada su aplicación se dejó reposar por un espacio de 8 hr, posteriormente se adicionó la solución activada de SOLIBAC IP SOIL, a ellos se le sumó la aplicación de una solución diluida de nutrientes, una vez terminada la aplicación de los diferentes aditivos, dejándolo reposar por un espacio de 8 hr, se realizó el traspaleo, homogenización y mezclado del material y se procedió a dejar en reposo 24 hrs. Para posteriormente realizar nuevamente la aplicación, la cual fue de la siguiente manera: 3 veces por semana, durante las 4 semanas que duró la prueba. Al termino de cada semana se realizó la toma de muestra compuesta de todo el material contenido en la charola, mismo que se realizó la medición de Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP's) mediante el analizador PetroFLAG y así estimar el grado de avance en la degradación del hidrocarburo presente en el material de la charola.

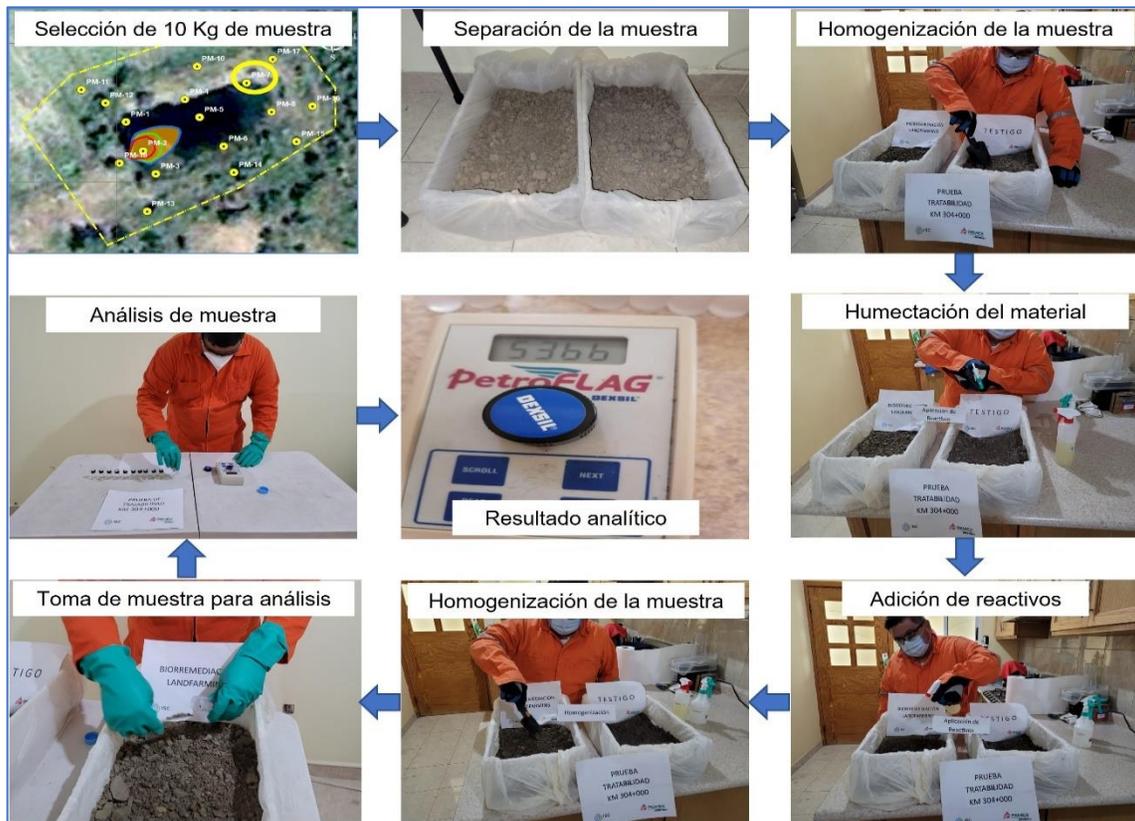


Figura 5. Trabajos de tratabilidad de la muestra realizados con la tecnología por biorremediación.

La cinética de degradación se presentó como sigue:

Tabla 5: Degradación del Contaminante a Través del Tiempo, donde se muestran los valores semanales.

SEMANA	TPH's (ppm)	MEDICIÓN	SEMANA	TPH's (ppm)	MEDICIÓN
0	5,366		3	4,488	
1	4,829		4	4,361	
2	4,561		Medición laboratorio: 3,914.94 mg/Kg Medición PetroFLAG: 5,366 ppm Factor Lab/Petro: 0.7295 Objetivo: 4,112 ppm de TPH's (3,000mg/kg)		

A partir de los resultados del análisis de muestra de suelo tratado por semana, se procedió a realizar un análisis estadístico del mismo y con esto tener una proyección de la disminución de la concentración del hidrocarburo con respecto al tiempo, pudiendo establecer las semanas en las que se obtendrían concentraciones por debajo del límite máximo permisible de acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

Como bien se mencionó en un inicio, se seleccionó la zona del punto de muestreo PM-7 y se extrajo el material, el cual, de acuerdo con los resultados del laboratorio acreditado, cuenta con una concentración de 3,914.94 mg/kg de fracción pesada y que su análisis mediante el PetroFLAG nos arrojó una concentración de 5,366 ppm de TPH's. Haciendo una regla de proporcionalidad, se obtiene que el factor para convertir de ppm TPH's a mg/kg de fracción pesada es de 0.7295 para este caso en específico.

De acuerdo con la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, la fracción pesada en un uso de suelo agrícola tiene un límite máximo permisible de 3,000 mg/kg, al cual, aplicando el factor de conversión, equivale a 4,112 ppm de TPH's que es la concentración a la que se debe llegar para obtener niveles de limpieza adecuados.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en las 4 semanas de análisis más el resultado inicial, se realiza el graficado de las semanas con las concentraciones medidas, aplicando una línea de tendencia exponencial a las concentraciones, debido a que en este tipo de remediaciones donde se estimula y adicionan bacterias, su bioaumentación es amplia y por lo mismo la degradación del hidrocarburo, pero con el tiempo la población bacteriana reduce su crecimiento al encontrarse en densidades altas, por tal motivo la degradación del hidrocarburo se mantiene estable en las últimas semanas. Lo anterior se representa adecuadamente mediante una línea de tendencia exponencial, la cual presenta un ajuste de datos o confianza del $R^2=0.9215$ y para la semana 13 se muestra una línea que ha pasado por debajo de las 4,000 ppm de TPH's, que es nuestro objetivo.

Por lo anterior, se propone un programa de trabajo para la remediación de 13 semanas, sin embargo, es importante considerar muestreos para ajustar dicha tendencia e ir liberando material de manera gradual (aquel presente concentraciones por debajo del límite máximo permisible)

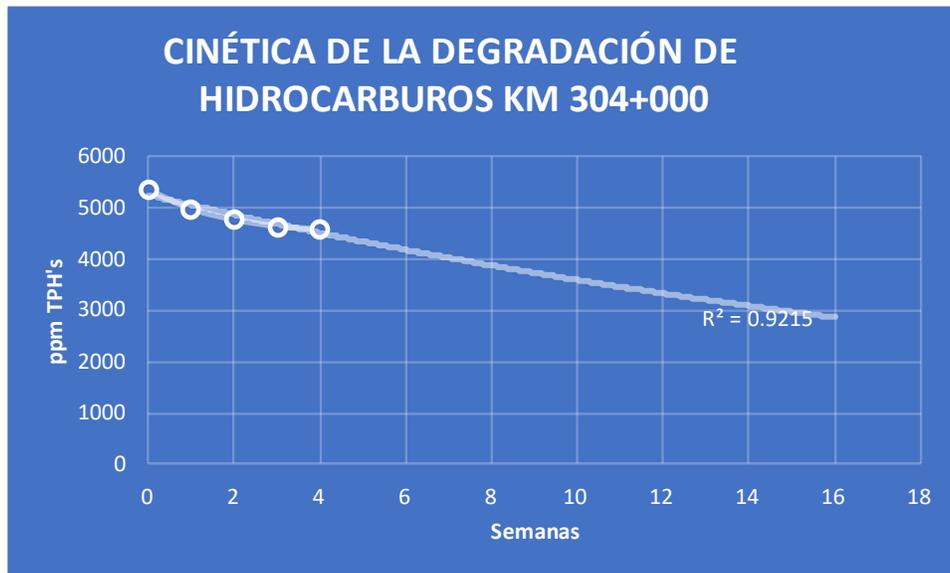


Figura 6. Cinética Gráfica de la Degradación del Contaminante

5.6 Monitoreos.

Durante la ejecución de los trabajos de Biorremediación se realizarán diversos monitoreos, mismos que permitirán el correcto control y seguimiento de la degradación de los contaminantes, de los niveles de nutrientes y la humedad presente en la biopila, así como de la actividad microbiológica. Además de verificar los niveles de limpieza obtenidos en los trabajos realizados durante la excavación así como del material en tratamiento contenido en la biopila, es importante mencionar que si dentro de los monitoreos se identifican volúmenes parciales de material que han alcanzado niveles de limpieza, deberán ser retirados de la celda de tratamiento para evitar algún tipo de contaminación cruzada. A continuación se describen cada uno de ellos:

5.6.1 Muestreo inicial de suelo.

Una vez que se han extraído los volúmenes de suelo contaminado y que se han conformado las biopilas en la celda de tratamiento, se deberá asegurar que el material se encuentre lo más homogéneo posible e identificar aquellas zonas donde sea evidente la presencia del contaminante; por cada biopila se establecerá un punto para la toma de 1 de muestra, mismo que será considerado como el muestreo inicial.

En estas muestras además de la concentración del hidrocarburos en todas sus fracciones, los resultados obtenidos deberán contener los valores de los parámetros como humedad, actividad microbiológica (expresada en unidades formadoras de colonias, UFC/gr), pH, las concentraciones de C, N y P. Este muestreo inicial será tomado en cada biopila, considerando la profundidad de 1.50m como la ideal para llevar a cabo los análisis mencionados. Las muestras serán colectadas mediante el uso de hand auger, colocando la muestra en frascos de vidrio, que serán etiquetados y preservados para su posterior análisis en un laboratorio, mismo que cuenta con las autorizaciones y acreditaciones emitidas por las autoridades ambientales.

5.6.2 Monitoreos de control interno para evaluar la degradación de los hidrocarburos (B).

Una vez optimizado el proceso, este tipo de monitoreos se realizan periódicamente. En esta etapa, el objetivo es observar el avance en la biorremediación del suelo en tratamiento, donde el material únicamente recibe la humectación, aplicación de nutrientes y el laboreo. En estos monitoreos se analizarán las concentraciones de los hidrocarburos que contiene el suelo ya homogenizado y con ello comprobar que el suelo va siendo remediado próximo a los valores de los límites permitidos y

con ello programar el muestreo final comprobatorio. El procedimiento de colecta de las muestras de control interno deberá ser similar al muestreo inicial, considerando tomar la muestra en el mismo punto de cada biopila, recordando que estas muestras son de carácter interno y que nos permitirán conocer la concentración que aún persiste en el material, por lo que los análisis serán realizados por el mismo laboratorio acreditado, cuyos resultados obtenidos contienen la suficiente certidumbre o precisión para tomar la decisión en campo de ajustar con el proceso de remediación.

De igual manera que en el muestreo inicial, se determinarán los mismos parámetros en cada una de las muestras obtenidas en estos muestreos de control siendo: concentración de hidrocarburos en sus tres fracciones, BTEX y HAP's, humedad, actividad microbiológica (expresada en unidades formadoras de colonias, UFC/gr), pH, las concentraciones de C, N y P.

5.6.3 Muestreo final comprobatorio (MFC)

El plan del MFC que se presenta a continuación, se elabora con base en los resultados obtenidos en la caracterización del pasivo ambiental, misma que ya fue realizada y con la cual se logró dimensionar a los contaminantes presentes en el pasivo. Los trabajos de remediación del pasivo ambiental aún no se han desarrollado como tal, se encuentra en espera de la aprobación por parte de la autoridad ambiental al Programa de Remediación mediante la técnica “Biorremediación por biopilas a un lado del sitio contaminado”

Se propone la realización de un muestreo final comprobatorio para dar por finalizados los trabajos de excavación y extracción del material impactado en el área una vez que se hayan realizado los trabajos, esto con el objetivo de obtener los valores de concentración de hidrocarburos por debajo de los límites máximos permisibles para las fracciones pesada, media y ligera, así como para los BTEX y HAP's.

Para la ubicación de los puntos de muestreo en el área de excavación se toman como referencia los criterios descritos en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”, específicamente en el punto “2.3.1 Criterios para la determinación del número de puntos de muestreo en área de excavación, cuando el suelo fue retirado”, en su inciso c), el cual menciona que:

- Cuando el área de contaminación es de 1000 m² y hasta 5000 m²: FORMA IRREGULAR:
 - Número de muestras y distribución: una muestra por cada 15 – 20 metros lineales en las paredes del perímetro del área excavada y 2 en el fondo según la superficie

(áreas hasta 1000 m²) y 4 o 10 muestras para áreas de hasta 5000 m², según sea el caso.

Para el pasivo ambiental aledaño al Km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta, la excavación será de forma irregular, la cual presentará un área de excavación de 1,539.28m² y un perímetro de 155.10. Tomando en cuenta las dimensiones de la zona a excavar y aplicando el criterio anteriormente mencionado, obtenemos que en el caso de las paredes deberían de ser por lo menos 11 puntos de muestreo (tomando en cuenta la regla de una muestra cada 15m) y para el fondo serían 4 muestras ya que el criterio indica entre 4 y 10 muestras para áreas menores a 5,000m² en excavaciones irregulares. En este sitio en particular se realizarán 2 niveles de excavación, uno que va de 0.0 a 2.0 m y otro mas que va de 2.01 a 3.5 m, por lo cual se establece 2 zonas de muestreo de paredes y fondos (una para cada nivel de excavación), en ambas se aplica el mismo criterio de muestreo de acuerdo con la guía, con la finalidad de dar una mayor certeza al muestreo, se define que para cada cara de la excavación irregular se tomará una muestra (una muestra entre vértices del corte), por lo cual, para la excavación de 0.0 a 2.0m se tomarán 21 muestras (16 pared y 5 fondo, incluyen 2 duplicados) y para la excavación de 2.01 a 3.5m se tomarán 7 muestras (4 pared y 3 fondo, incluye 1 duplicado). Lo anterior se puede constatar en la Figura 7 y Tabla 6, cumpliendo con el criterio establecido en la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”.

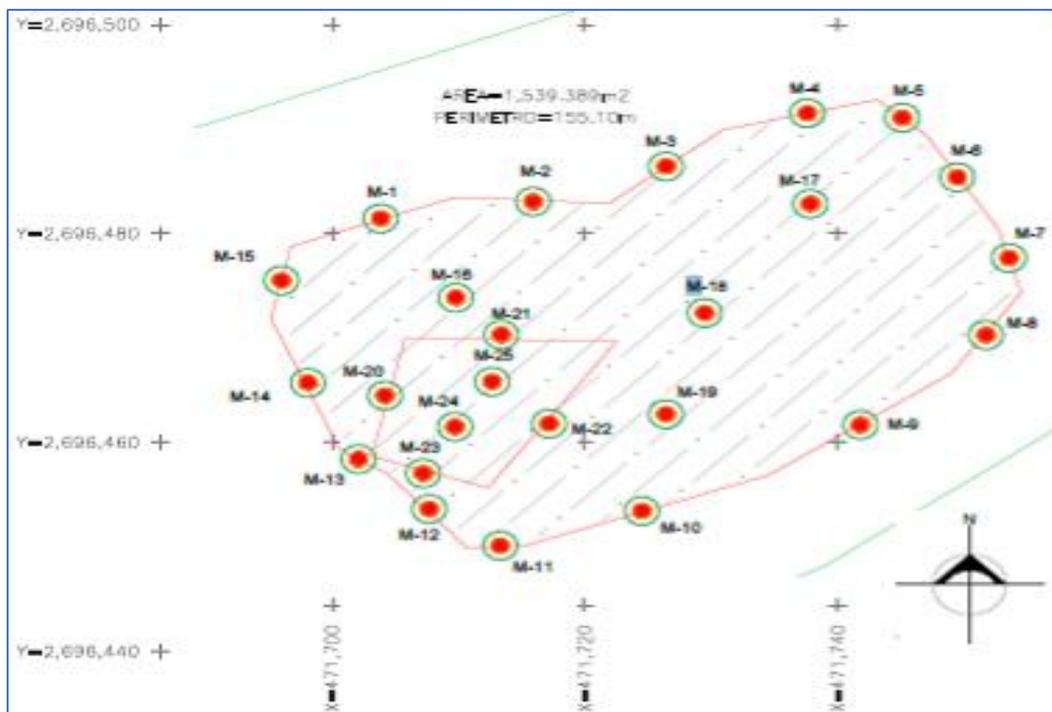


Figura 7. Propuesta de distribución de los puntos de muestreo en paredes y fondos de las excavaciones a realizarse en el pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

Tabla 6. Propuesta de puntos de muestreo final comprobatorio en paredes y fondos del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24"Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

NUMERO	ESTE	NORTE	PUNTO DE MUESTREO	UBICACIÓN
PUNTOS DE MUESTREO EN EXCAVACION DE 0.0 A 2.0 M.				
1	471703.84	2696481.40	M-1	PARED
2	471715.89	2696483.05	M-2	PARED
3	471726.43	2696486.40	M-3	PARED
4	471737.60	2696491.44	M-4	PARED
5	471745.11	2696491.01	M-5	PARED
6	471749.54	2696485.37	M-6	PARED
7	471753.61	2696477.66	M-7	PARED
8	471751.71	2696470.24	M-8	PARED
9	471741.84	2696461.70	M-9	PARED
10	471724.50	2696453.40	M-10	PARED
11	471724.50	2696453.40	M-10 DUP	PARED
12	471713.37	2696450.02	M-11	PARED
13	471707.71	2696453.60	M-12	PARED
14	471702.14	2696458.37	M-13	PARED
15	471698.10	2696465.68	M-14	PARED
16	471696.03	2696475.46	M-15	PARED
17	471709.77	2696473.83	M-16	FONDO
18	471737.82	2696482.81	M-17	FONDO
19	471729.46	2696472.38	M-18	FONDO
20	471726.41	2696462.66	M-19	FONDO
21	471726.41	2696462.66	M-19 DUP	FONDO
PUNTOS DE MUESTREO EN EXCAVACION DE 2.01 A 3.5 M.				
22	471706.61	2696468.19	M-20	PARED
23	471720.19	2696469.35	M-21	PARED
24	471714.25	2696458.81	M-22	PARED
25	471704.65	2696458.72	M-23	PARED
26	471710.06	2696460.64	M-24	FONDO
27	471712.69	2696465.83	M-25	FONDO
28	471712.69	2696465.83	M-25 D	FONDO

Ahora bien, en el caso de las biopilas, nos basamos en lo estipulado en el punto “2.3.2 Criterios para la determinación del número de puntos de muestreo en biopilas”, suponiendo que los trabajos de remediación se realizaran como están programados, se proyecta que se instalarán un total de 5 pilas las cuales presentan 3.0m de altura, 4.0 m de base, y 136 m de largo lo cual genera un volumen por cada una de aproximadamente 4,080 m³ de material contaminado abundado (816m³ por biopila)). Tomando en cuenta los criterios del tema 2.3.2 de la Guía donde establece que:

- Por regla general se debe de requerir que se aplique 1 muestra simple por cada 250 – 300 m³, cuando se trate de tratamiento de remediación por biopilas y landfarming con aeración mecánica (con excavadora “mano de chango” o similar, sin cribado industrial previo). La densidad de muestreo de las biopilas puede variar en más o menos 10 – 15 %. La densidad

de muestreo de todas las biopilas debe de estar siempre alrededor de 5 - 10 % de la regla general (1 Muestra /250 – 300 m³ ± 5 – 10 %).

Par el caso de las biopilas también se debe considerar el tema “2.3.3 Criterios para la determinación de la localización de puntos de muestreo en biopilas”, el cual indica que una biopila se debe dividir en 4 triángulos de dimensiones semejantes, nombrando cada triangulo con una letra que va de la A a la D, donde en el caso del triángulo B se considera una profundidad de muestreo a partir de 1.80 m y para los triángulos A, B y C, la profundidad de muestreo es de 0.8m

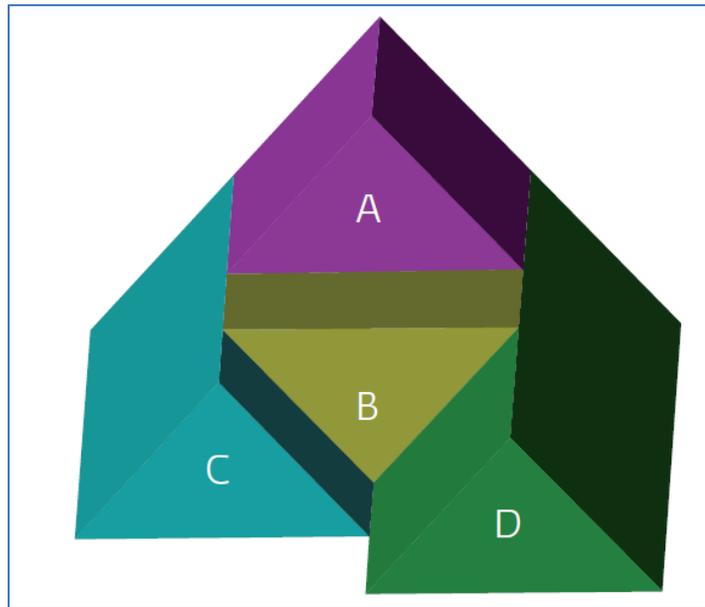


Figura 8. Diagrama de secciones transversales en biopilas para su muestreo de la “Guía Técnica de Orientación para la Planeación y Realización de Muestreos Finales Comprobatorios”

Tomando en cuenta los criterios anteriores, se estableció que las biopilas serán seccionadas a cada 41.50m, esto con la finalidad de asegurar la condición de 250m³ por muestra, lo que da un resultado de 3.264 muestras por biopila, sin embargo para obtener datos mas confiables de las condiciones de limpieza, se propone realizar el ajuste 4 muestras (más aún porque estas no se pueden fraccionar) por cada biopila. Las muestras estarán distribuidas de acuerdo con el criterio 2.3.3 de la Guía; en total se consideran 22 muestras para las biopilas (incluyen 2 duplicados) la distribución y ubicación de los muestreos se presenta en la Figura 9

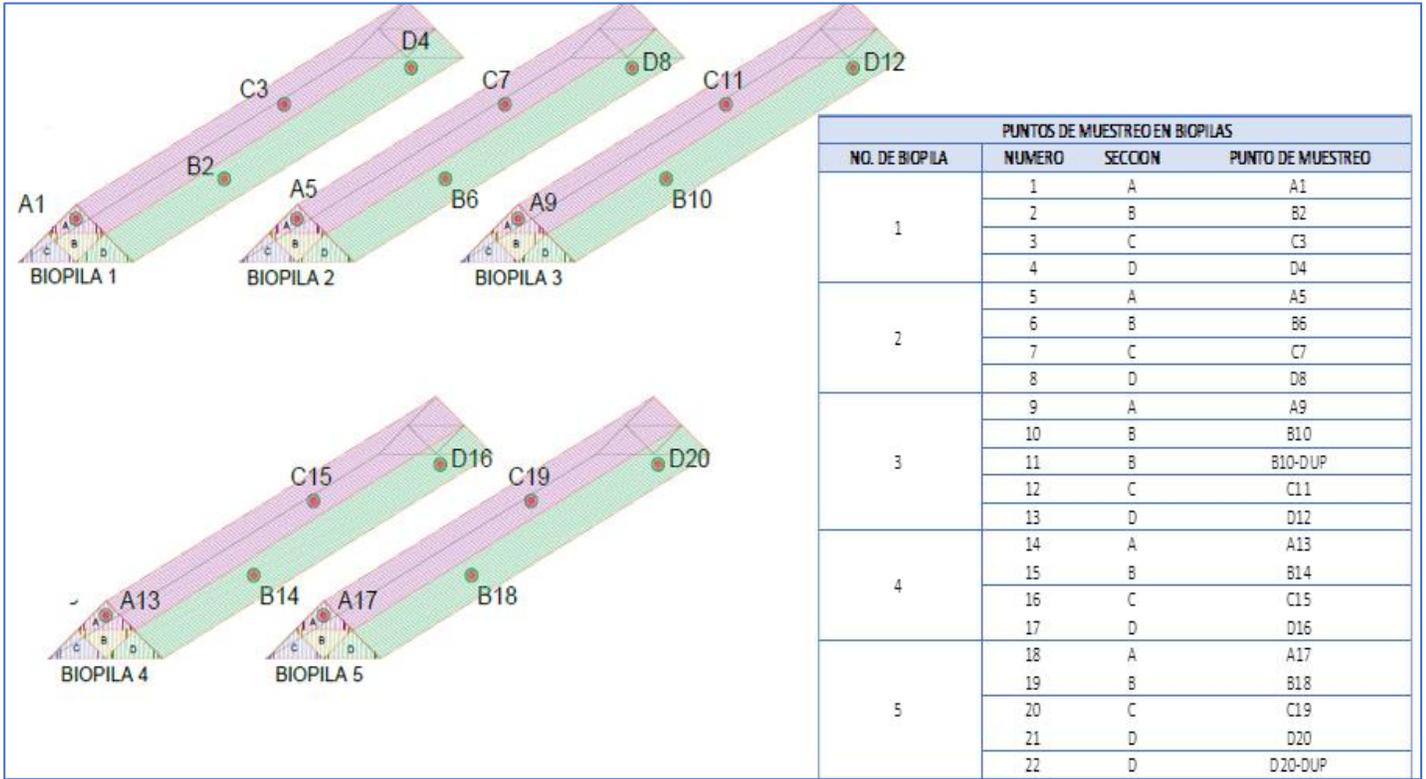


Figura 9. Distribución del Muestreo Final Comprobatorio en biopilas del pasivo ambiental del área aledaña al km 304+000 del OLD 24”Ø Nuevo Teapa – Cadereyta

5.7 Reacomodo del suelo remediado.

Una vez que se ha verificado que se han alcanzados los niveles de concentración de hidrocarburos propuestos como criterio de limpieza, se procederá a realizar el reacomodo del material ya restaurado fuera de la celda de tratamiento, mediante el uso de maquinaria y camiones, realizando su acomodo en el sitio de donde fue extraído originalmente, procurando no alterar la infraestructura petrolera que ahí existe, reintegrando las condiciones en las que se encontraba el sitio antes de que sucediese la afectación, que eran las de salvaguardar los ductos en operación ahí presentes y que derivado de ello, no pueden realizarse otro tipo de actividad en esta área.

5.8 Manejo de residuos generados durante el tratamiento

Los residuos generados antes, durante y después del proceso de extracción y saneamiento durante el desarrollo del proyecto serán recopilados y clasificados de acuerdo con su naturaleza (física, química y/o biológica), donde los subproductos y/o residuos no peligrosos, se colocarán en contenedores temporales para que cada semana sean dispuestos en el relleno sanitario más próximo al área de trabajo o en el sitio autorizado para esto. Entre estos residuos se encuentran básicamente, envases y embalajes de los materiales empleados en campo.

En el caso de las aguas residuales generadas por los servicios sanitarios móviles que se contrate serán recolectadas y tratadas por el prestador del servicio sanitario contratado.

En este proyecto no se contempla la generación de residuos peligrosos, sin embargo si se diera el caso de contar con residuos que requieran análisis para verificar su grado de peligrosidad, serán nominados y manipulados como “residuos peligrosos”, de manera temporal hasta que los resultados de las pruebas permitan su identificación definitiva para de esta manera ser manejados y dispuestos de acuerdo con la normatividad vigente y aplicable. En todos los casos, el manejo y disposición serán registradas en las bitácoras de campo.

5.9 Programa calendarizado de trabajo.

La siguiente tabla contiene el Programa de Actividades que se han de realizar en el sitio para la degradación de los hidrocarburos contenidos en el material, estimando un tiempo de desarrollo de los trabajos de 16 semanas. Dicho programa se muestra a continuación:

Tabla 7. Calendarización de la remediación

Actividad	Semanas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Preparación de la Celda de tratamiento	■												
Excavación y transporte de material contaminado a la celda	■												
Biorremediación por BIOPILAS	Surfactante	■			■	■			■				
	Bacteria	■			■	■			■				
	Nutrientes	■			■	■			■				
	Materia orgánica	■			■	■			■				
Homogenización mecánica del material	■				■	■	■	■	■	■			

Actividad	Semanas												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Proceso de tratamiento de suelo													
Monitoreo preliminares	INICIAL				B				B			MFC	
Regreso de suelo remediado al lugar de origen													

Monitoreo preliminar Inicial: Muestreo realizado al inicio de la biorremediación.

Monitoreo preliminar (B): Muestreo de seguimiento de operaciones de biorremediación

Monitoreo Final Comprobatorio (MFC): Muestreo basado en la normatividad ambiental vigente.