

Lecciones aprendidas de un proyecto de biorremediación in situ de un pasivo ambiental

Autor(es): S.J.Mendez, TWM; J.Villegas, TWM.

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

La responsabilidad de la gestión y limpieza de pasivos ambientales es un tema que cada vez tiene mayor importancia en Colombia, por lo cual es necesario compartir experiencias y concluir con socialización de buenas prácticas de proyectos de remediación que se vayan ejecutando. Este caso de estudio consistió en el tratamiento y recuperación de una zona de amortiguación hídrica, con presencia de hidrocarburos, clasificada como pasivo ambiental, la cual se intervino por métodos combinados de biorremediación como lo son el bioventing, la bioestimulación y fitorremediación. En un área establecida de 0,59 hectáreas y 5.944 metros cúbicos de suelo, se contaba con un porcentaje promedio de TPH del 7% y profundidades de hasta 2 metros. El tratamiento para la reducción del TPH hasta lograr parámetros de cumplimiento con el protocolo de Louisiana 29B [9], tuvo una duración de 5 meses netos (no calendario), con 7600 horas hombre, más 2500 litros de productos acondicionadores aplicados en el suelo y más de 2600 gravimetrías. Adicionalmente se realizaron seguimientos semanales por medio de análisis internos de la operación y muestreos de control con laboratorio externo por parte del dueño del proyecto (cliente) y otro de la empresa ejecutora de la biorremediación. El resultado fue la disminución del TPH por debajo del 1% y la recuperación del área. Sin embargo, las lecciones aprendidas para mejorar estos procedimientos de parte de los diferentes actores que intervienen en el proceso, como operadoras de campo, laboratorios y contratistas de servicios de biorremediación y comunidad, fueron múltiples y se deben compartir con el fin de garantizar el éxito de estas intervenciones tan importantes para corregir desviaciones de la operación en la explotación de hidrocarburos y generar mayor confianza de las autoridades y ambientalistas en nuestro sector.

Introducción

En Colombia, contamos con el reto de gestionar por lo menos 1.843 casos reportados de pasivos ambientales, según un estudio contratado por el Ministerio de Ambiente en el año 2015 [1]. Este informe dio paso a un proyecto de ley en el año 2018 que buscaba reglamentar la gestión de pasivos ambientales en el país y en este se definía como pasivo ambiental *“la afectación ambiental ubicada y delimitada geográficamente, que no fue oportuna o adecuadamente mitigada, compensada, corregida o reparada, causada por actividades antrópicas y que puede generar un riesgo a la salud humana o al ambiente”* [2]. Aunque el proyecto de ley no progresó, conocemos que hay una responsabilidad de parte del gobierno y del sector industrial de impulsar políticas y acciones que permitan controlar o eliminar los riesgos que puede estar generando un pasivo ambiental cada vez que se identifique o reporte.

De los 1.843 pasivos ambientales reportados, 18% tiene como causal el derrame de hidrocarburos por transporte y un 13% el derrame de hidrocarburos por atentados guerrilleros [1], lo que significa de gran importancia el compartir experiencias de proyectos ejecutados de remediación de pasivos ambientales por contaminación con hidrocarburos. Adicionalmente, los proyectos de tratamiento o limpieza de un pasivo ambiental tienen complejidades adicionales a las que pueda tener la limpieza de un evento de contaminación reciente, como, por ejemplo: cambios en los propietarios de las tierras contaminadas y su permiso para ejecutar una limpieza, uso actual de la tierra, acceso al área y recurso económico limitado para el tratamiento debido a falta de claridad en responsabilidades [3]. Aunque, la misma naturaleza realice una tarea de biorremediación durante los años por medio de su atenuación natural y aporte para que muchos años después una intervención para tratamiento con estimulación sea más fácil y corto, las respuestas a tiempo de eventos de contaminación siempre serán necesarias para evitar mayores consecuencias negativas sobre el suelo y el agua, recursos de uso básico por el ser humano.

Estas premisas descritas anteriormente, sobre los retos de remediación de pasivos ambientales, se evidenciaron en el proyecto que se analiza en este artículo. Entre los años 2020 y 2021, se realizó un trabajo de biorremediación y recuperación de una zona de amortiguación hídrica o bajo inundable, la cual fue afectada en el pasado por las actividades propias de la explotación de hidrocarburos, siendo clasificada como zona de pasivo ambiental. En la resiliencia y adaptación de la naturaleza se encuentra con la formación y crecimiento de vegetación sobre los cuerpos de agua de estos bajos inundables de tal manera que uno de los objetivos del trabajo buscaba tener el menor impacto social y ambiental con la tecnología de biorremediación que se aplicara. De esta forma se propuso diseñar un sistema de tratamiento in situ con baja intervención en el entorno y en el ecosistema combinando tecnologías de biorremediación como son el bioventing, bioestimulación y fitorremediación.

El bioventing o bioventeo, es un método de biorremediación in situ y consiste en la aplicación de aire al suelo sin necesidad de moverlo de su sitio. Por medio del aire aplicado se busca estimular el crecimiento y la actividad bacteriana aeróbica existente en el suelo. Un complemento a este tratamiento es la bioestimulación, dado que tiene como objetivo la mejorar el contenido de nutrientes del suelo por medio de su inyección y así aportar alimento a las comunidades microbianas autóctonas para su actividad metabólica [4] [5]. Por último, la combinación de estas dos metodologías con la capacidad de las plantas y los microorganismos contenidos en su rizosfera para degradar y secuestrar contaminantes orgánicos e inorgánicos hace que se obtengan eficiencias considerables donde solo se había aplicado un proceso de biorremediación como se ha evidenciado en literatura publicada [6].

De acuerdo con el estudio de caracterización entregado por el cliente, el área de tratamiento consistía en 0,59 hectáreas y un volumen aproximado de 5.944 m³ de suelo con presencia de hidrocarburos. Estos se repartían en 8 puntos dispersos, algunos hasta de 2 metros de profundidad y con concentraciones de hidrocarburo en el suelo y sedimentos de hasta 2,76%. También se indicó la existencia de una capa vegetal de hasta 1.1 metros de espesor de la cual expresaron la ausencia de hidrocarburo razón por la cual no hacía parte del volumen indicado a tratar.

En un tiempo de 5 meses se llegó al objetivo del nivel permisible por la norma Protocolo de Louisiana 29B [9] en las ubicaciones y profundidades indicadas. A pesar de los buenos resultados obtenidos en el tratamiento realizado, estos resultados se dieron en medio de varias disimilitudes entre la caracterización y contexto entregado por el cliente, lo planeado y ejecutado. Entre estas un sobrecosto del 30%, lo cual hace inviable estos proyectos para los ejecutores y para los responsables si no se planean en equipo y con base a experiencias para este tipo de proyectos.

Para una futura legislación en la gestión de pasivos ambientales, es importante sobrepasar la falta de socialización de experiencias de proyectos de remediación de pasivos ambientales, y en el caso particular del sector de hidrocarburos socializar proyectos ejecutados de biorremediación in situ de áreas atípicas contaminadas con hidrocarburos, para que sirva como referencia y se conozca lecciones aprendidas que eviten incurrir en errores que afecten la sostenibilidad y buenas intenciones de estos proyectos. Es así como también en este artículo nos reservamos nombrar lugares y actores, para enfocarnos en el análisis de variables técnicas y de planeación de proyectos de esta naturaleza, los cuales pueden llegar a ser independientes del ejecutor o responsable si se cuenta con más información de proyectos similares y se comparten mejores prácticas de forma abierta.

Metodología y datos

La metodología y datos para el análisis de las lecciones aprendidas se derivan de todo el proceso de licitación, preparación, ejecución y conclusión del proyecto, debido a que en cada una de estas etapas hay datos claves para tener en cuenta en un proyecto cualquiera de remediación de pasivos ambientales.

Antes del proyecto. Las condiciones iniciales entregadas para realizar la propuesta y además la preparación de la ejecución del proyecto incluyeron diferentes premisas que fueron desde el tema de seguridad física, seguridad y salud en el trabajo, medio ambiente, calidad, cumplimiento laboral y manejo de la relación con propietarios. El alcance del proyecto, para la empresa que realizaría la limpieza del área asignada, incluía las etapas de socialización, contratación de personal, capacitaciones del dueño del proyecto, remediación y restauración.

El primer paso fue la realización de una visita de campo junto con los demás proponentes en la etapa de licitación. Luego de esta visita, no fue viable por parte del cliente volver a realizar visitas, aun cuando había pasado más de un año desde la fecha del informe del pasivo ambiental hecha por el cliente y la apertura del proceso.

Adicionalmente, el manejo social es una variable clave y la relación con los propietarios de las tierras y la gestión de las servidumbres solo debía ser por medio de una línea de comunicación y responsabilidad, la cual fue manejada por el cliente.

Con respecto a la contratación de la mano de obra, desde los pliegos se consideró que los trabajos no eran inherentes a la industria del petróleo y por esta razón no aplicaban los beneficios de la convención colectiva de trabajo que tiene este sector en Colombia. De

todos modos, era claro que toda contratación debía cumplir con los requisitos de ley y que además el 100% de la mano de obra no calificada debía ser del área de influencia del proyecto.

En relación con criterios de calidad, los productos para el acondicionamiento del suelo durante la remediación fueron revisados y aceptados por el dueño del proyecto. Para esto era importante contar con las fichas técnicas, certificaciones o conceptos emitidos por autoridades de tal forma que se asegurara la seguridad de estos productos para el personal y medio ambiente. Los parámetros principales para el seguimiento y aceptación final del trabajo a ejecutar fueron el TPH y grasas y aceites, en cumplimiento con los criterios del protocolo de Louisiana 29B [9]: TPH y Grasas y Aceites en concentraciones <1%.

Se esperaba que la metodología realizada fuera principalmente in situ. Se sabía que por el tiempo del pasivo los hidrocarburos más livianos se habrían volatilizado y los más pesados posiblemente permanecieran con características de meteorización. Por este último motivo, se preveía la opción de hacer retiros de alguna cantidad de suelo para ser tratados en planta externa licenciada.

Ejecución del proyecto. El tratamiento propuesto por la empresa TWM, para la descontaminación del área asignada de pasivo ambiental con presencia de hidrocarburos, consistió en un proceso de bioremediación orgánica in situ, con el uso de inyección de aire y adición de productos biodegradables con una fórmula innovadora, a base de moléculas orgánicas que permiten una absorción más eficiente de los nutrientes por fitorremediación y microorganismos autóctonos que permite remediar in situ asegurando resultados en cortos periodos de tiempo sin afectar los ecosistemas involucrados. Para el desarrollo del trabajo se realizaron los siguientes pasos:

1. Identificación del área: Se realizó la identificación del área a intervenir con la ubicación de las coordenadas de los ocho puntos a tratar por medio de GPS, y se identificaron las profundidades en cada punto.
2. Adecuación del área: Se realizó la señalización del área a intervenir, marcando las zonas con presencia de hidrocarburos; estos puntos son geo referenciados por el GPS, para establecer allí los puntos de seguimiento y control del proceso. Se identificaron las rutas de acceso para el personal y los equipos, se realizó la rocería de estas áreas también para disminuir los riesgos biológicos de la zona, y se realizaron las conexiones neumáticas e hidráulicas correspondientes.
3. Monitoreo físico químico: Se realizaron una serie de apiques en las 8 áreas identificadas con presencia de hidrocarburos, tomando como referencia los puntos geo referenciados en el estudio entregado por el cliente. Igualmente se tomó como referencia las profundidades a las cuales se tomaron muestras para así realizar nuestros monitoreos.
 - Primer muestreo: Al inicio del tratamiento se tomaron una muestra para análisis con laboratorio externo de TPH y Grasas y aceites. También se analizaron una muestra para el laboratorio de campo de TWM.
 - Seguimiento semanal: Cada semana TWM realizó un muestreo para prueba de gravimetría para análisis de TPH en el laboratorio adecuado en campo.
 - Seguimiento certificado: se realizó seguimiento de TPH y grasas y aceites con laboratorio externo certificado. Los cuales se determinan con la operadora el número de muestras y procedimiento de muestreo.
4. Instalación de lanzas de inyección: Para permitir la oxigenación y distribución de los diferentes productos, en las áreas en tratamiento, se instalaron las lanzas de inyección a diferentes profundidades del terreno, para realizar una ventilación forzada y proporcionar los productos para acelerar el proceso de biodegradación.
5. Inyección de aire y productos para tratamiento de remediación: Utilizando las lanzas de inyección, se realiza la oxigenación a bajo caudal, menor de 2.500 psi de aire generado mecánicamente y los diferentes productos que cumplen las funciones de rompedor de cadenas de hidrocarburo, acondicionador de suelo y fertilizante los cuales son aplicados con hidrolavadora de alta presión.
6. Apertura de calicatas: Se realizan apertura de calicatas en el colchón vegetal aguas abajo, esto para reducir la tensión en estos puntos y permitir recolectar el hidrocarburo liberado de la operación de inyección de aire y química. Estos puntos también permiten un panorama de la efectividad de la remediación, ya que con la segunda aplicación de producto disminuyó notablemente el afloramiento de hidrocarburo.
7. Retiro de material contaminado: Este material contaminado sale del hidrocarburo meteorizado, recolección de afloramiento y material vegetal del colchón de los puntos que no cumplieron con los parámetros.

Resultados y discusiones

Los resultados de algunos muestreos internos y certificados se presentan en las gráficas 1, 2, 3 y 4, por medio de las cuales podemos notar el avance y resultado final de la biorremediación. El valor “2017” en el eje x hace relación a los TPH entregados por el dueño del proyecto, es decir valores tomados en septiembre del 2017, hace más de un año antes de la primera fecha de muestreo certificado que fue en enero 2021. La línea negra punteada en todas las gráficas representa el límite de TPH al cual se desea llegar o pasar para que la concentración de hidrocarburo sea lo menor posible y por debajo de 1%.

En los gráficos se presentan 4 de las subáreas trabajadas (área 1, 3, 4 y 8) dado que son las que hasta los últimos muestreos certificados aun presentaban concentraciones de TPH mayores a 1. En las gráficas de la 1 a la 4 se muestran los resultados a profundidades de 0,5 metros, 1 metro y 1.5 metros por debajo del colchón vegetal. Y en la gráfica 5 se presentan las concentraciones encontradas dentro del colchón vegetal, el cual fue el área trabajada al final del proyecto entre los meses de julio y noviembre del 2021.

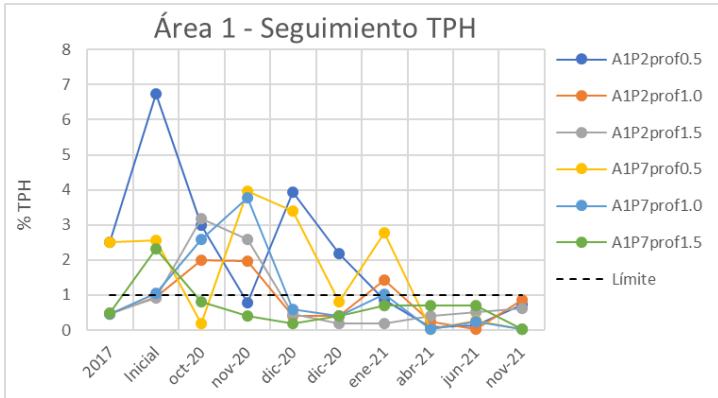


Gráfico 1. Seguimiento TPH en el área 1.

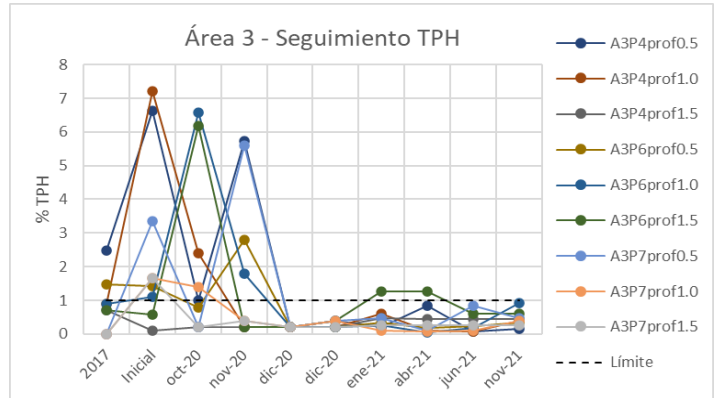


Gráfico 2. Seguimiento TPH en el área 3.

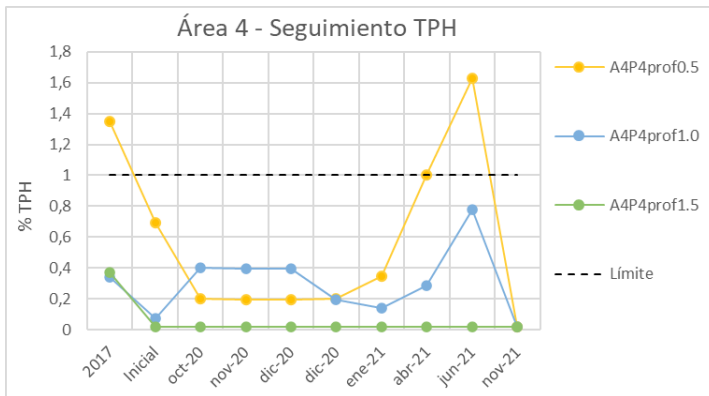


Gráfico 3. Seguimiento TPH en el área 4.

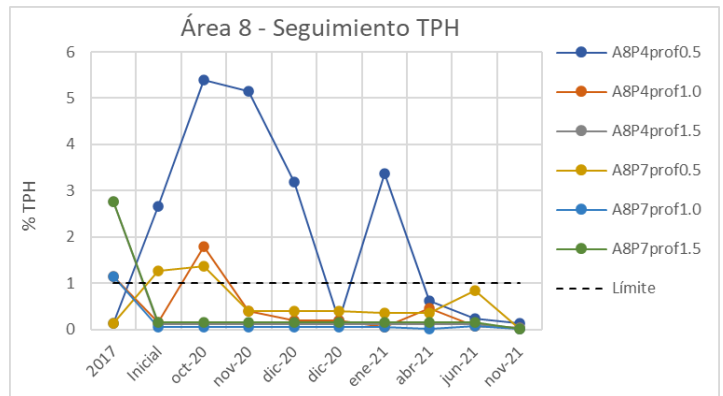


Gráfico 4. Seguimiento TPH en el área 8.

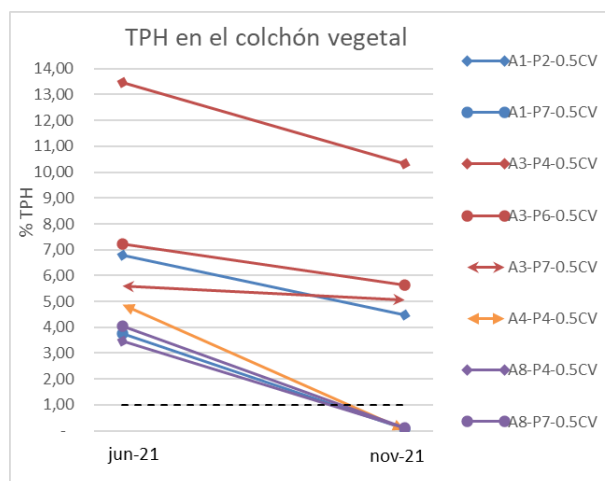


Gráfico 5. Puntos con TPH mayor a 1 en el colchón vegetal

El tratamiento logró su objetivo de llegar a concentraciones de hidrocarburos totales menores al 1% en profundidades de 0,5 metros, 1 metro y 1.5 metros por debajo del colchón vegetal. Esto se logró en el 90% de las muestras a inicios de diciembre 2020, como se puede

concluir de las gráficas 1, 2, 3 y 4. Sin embargo, los siguientes aspectos hicieron que el tratamiento y proyecto no terminara al concluir el tratamiento del 10% restante:

- Claridad sobre el alcance del proyecto con respecto a la inclusión del volumen del colchón vegetal, el cual adicionó al proyecto 5.441 m³ y concentraciones que sobrepasaban el máximo que se había reportado en la licitación.
- El tiempo de respuesta y toma de decisiones de parte del dueño del proyecto no estuvo acorde al tipo de contrato y proyecto, lo cual sumó días y costos al proyecto.
- Desviaciones en la ubicación por coordenadas de los puntos a tratar afectó los días de arranque para el acuerdo sobre las ubicaciones definitivas y rangos de acción para la toma de muestras y seguimiento.
- Porcentajes de TPH más altos presentados en los puntos de referencia y contaminación a mayores profundidades a las inicialmente presentadas.

Variables	Esperado	Realidad
Días de tratamiento	150	201 días trabajados 475 días calendario
Concentración máxima	2,76	13,47
Número de personas	14	14
Cantidad de muestreos externos	3	4
Cantidad de muestras analizadas	49	180
Volumen para tratar (m ³)	5.944	12.348
Sobrecosto del proyecto	0%	30%

Tabla 1. Variables de comparación entre lo planeado y esperado y el resultado de lo ejecutado (Elaboración propia).

Como consecuencia, el proyecto concluyó realizándose en 475 días calendario, de los cuales solo 201 fueron operativos, se trataron concentraciones hasta de 13,47% de TPH, los muestreos internos se multiplicaron y el volumen de los productos de acondicionamiento del suelo aumentó. Todo esto derivó en un sobrecosto del 30% en el total del proyecto. Adicionalmente, al final del tratamiento se debió incurrir en costos y recursos adicionales, para el retiro del material del colchón vegetal que tenía concentraciones aun muy altas, como lo muestra la gráfica 5 y que principalmente se presentaba en el área 3. Este material debió ser retirado para su tratamiento en planta externa licenciada. Este ultimo aspecto, ya se tenía previsto, y solo se toma la decisión cuando ya se identifica que la intervención del retiro por el volumen menor no va a impactar la zona.



Imagen 1. Ventanas tipo calicatas para el retiro del hidrocarburo que va aflorando por el tratamiento. A este hidrocarburo se le realiza tratamiento: se muestra el antes y después en el mismo punto.

Por último, vale la pena nombrar otros eventos presentados y no esperados, pero que se pueden dar en nuestro contexto colombiano. El campamento organizado, el cual consistía en un contenedor donde se guardaba todo bajo candado, fue violentado y se robaron algunos los equipos. Esto sucedió en el espacio más largo en que se detuvo el proyecto por demoras en respuestas por parte del dueño del proyecto. El segundo evento, estuvo relacionado con lo que asumió el dueño del proyecto al inicio del contrato, sobre si aplicaban los beneficios de la convención colectiva de trabajo del sector petrolero. Este fue uno de los primeros ajustes en materia administrativa que se tuvo que realizar al proyecto. Aunque este cambio si se reconoció y se hizo retroactivo a los colaboradores del proyecto, es importante tener en cuenta esta experiencia para evitar reprocesos y malentendidos con la comunidad. El ultimo evento tiene que ver con el reto del manejo de la servidumbre en estos casos de pasivos ambientales, dado que un fragmento de área no fue posible aplicarle el tratamiento desde el inicio por falta de la autorización del propietario.

Cabe reconocer que en materia de seguridad y salud en el trabajo no se corrió con ningún incidente. Es importante que se apliquen los mismos estándares y preparaciones para asegurar que este tipo de trabajo que tiene principalmente riesgos mecánicos por el uso de la diferente herramienta y la manipulación de las lanzas de inyección, sean realizados con la protección individual necesaria y entrenamiento y supervisión requeridos.

Los diferentes inconvenientes que tuvimos en las etapas del proyecto pueden derivarse de varias razones de causa raíz, las cuales fueron parte de nuestra reflexión al concluir el proyecto y encontramos las siguientes “mejores prácticas” para evitar estos inconvenientes y causas de raíz en proyectos de tratamiento de pasivos ambientales:

- Crear una línea base en conjunto entre el dueño del proyecto y la empresa que realizará el tratamiento, creando un programa de muestreo donde se acuerden profundidades, tipo de muestreo: simple o compuesto y demarcación de ubicaciones en el campo. Esta línea base se debe realizar por medio de un laboratorio externo certificado.
- Es preferible considerar un tipo de contrato escalonado de acuerdo con los volúmenes de tratamiento, teniendo en cuenta un costo fijo y una disminución de la tarifa con el aumento del volumen. Adicionalmente, es muy importante que el contrato beneficie a ambas partes y se base en la confianza.
- Dado que la responsabilidad de la remediación de un pasivo ambiental no es siempre clara, esto hace que la entidad que deba correr con el costo del tratamiento no le dé la importancia y recursos necesarios tanto en presupuesto como en tiempo, lo cual puede hacer que se incurran en errores en el camino. Es necesario embarcarse en un proyecto de remediación con mucho orgullo de adelantar una acción de gran impacto ambiental y social, dado que es una tarea que esta aportando a la naturaleza una recuperación acelerada al tiempo que se entrega un ejemplo de responsabilidad a la comunidad.

Conclusiones

El reto que se presenta para la remediación de pasivos ambientales en Colombia es significativo, sin embargo, por medio de nuestros resultados y reflexiones demostramos que es posible efectuar la limpieza de zonas contaminadas con hidrocarburos que son identificados como pasivos ambientales. La metodología de biorremediación tipo bioventing, bioestimulación y fitorremediación dieron un buen resultado en este ecosistema tipo bajo inundable en donde se presentaba una contaminación con hidrocarburos desde hace más de 10 años. Este proyecto demuestra también que las remediaciones in situ son viables y son una buena alternativa para este tipo de pasivo ambiental comparada con soluciones ex situ que pueden llegar a tener un costo mucho mayor por el transporte y excavación de materiales [7] [8].

Además de escoger una correcta combinación de metodologías y asegurar una aplicación basada en la experiencia, es muy importante realizar un proceso de contratación y un trabajo en equipo con el experto en remediación que permita acordar variables claves del seguimiento del tratamiento como lo son la ubicación más exacta posible de los puntos de contaminación y en campo, frecuencia y metodología de monitoreo, toma de muestras, profundidades, y por último, el tipo de contratación del personal y manejo de la servidumbre y comunidad donde se desarrollará la intervención.

Referencias

1. Innovación ambiental (Innova). (2015) Propuesta integral de selección de alternativas jurídicas, técnicas, económicas y financieras para la gestión integral de los “Pasivos ambientales en Colombia”. Innovación ambiental (Innova) & Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Yumbo, Colombia. Página web consultado el 16 de junio 2022. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2065>
2. Gaceta del Congreso. ISSN0123-9066. Año XXVII - N° 587. Bogotá, D. C., viernes, 10 de agosto de 2018. Página 2. Página web consultada el 17 de junio 2022: <http://www.andi.com.co/Uploads/GAC.587-2018%20PROYECTO%20DE%20LEY.pdf>

3. Sam, Kabari & Coulon, Frédéric & Prpich, George. (2017). Management of petroleum hydrocarbon contaminated sites in Nigeria: Current challenges and future direction. *Land Use Policy*. 64. 10.1016/j.landusepol.2017.01.051.
4. Dadrasnia, A., Shahsavari, N., & Emenike, C. U. (2013). Remediation of Contaminated Sites. In V. Kutcherov, & A. Kolesnikov (Eds.), *Hydrocarbon. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/51591>
5. Delgado Vallejo, A. (2017). «Gestión de un proceso de biorremediación bacteriana de suelo contaminado con crudo en condiciones anaeróbica». [online] Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. [Acceso: 21 de junio 2022]
6. Velásquez Arias, J. A. (2017) «Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación», *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), pp. 151–167. doi: 10.22490/21456453.1846.
7. Azubuike, C.C., Chikere, C.B. & Okpokwasili, G.C. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol* 32, 180 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>
8. Gomes, Helena & Dias-Ferreira, Celia & Ribeiro, Alexandra. (2013). Overview of in Situ and ex Situ Remediation Technologies for PCB-contaminated Soils and Sediments and Obstacles for Full-scale Application. *The Science of the total environment*. 445-446C. 237-260. 10.1016/j.scitotenv.2012.11.098.
9. Department of Natural Resources of The United State. "Louisiana Standard 29B Section XIX 301 - 323: LR 26:2798 (December 2000), amended LR 33:1653 (August 2007), LR 36:2570 (November 2010)"

Nomenclatura.

TPH = Sigla en inglés que significa “Total Petroleum Hydrocarbons” o Hidrocarburos totales de petróleo.

TWM= Nombre de la empresa colombiana prestadora de servicios ambientales para el sector de hidrocarburos e industrial en general, y de la cual son miembros los autores del artículo. Para más información la página web es www.twm.com.co.