

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN  
DE TRATAMIENTOS BIODEGRADABLES EN LA ELIMINACIÓN DE  
RESIDUOS ACEITOSOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA**

**PAULA ANDREA GALVIS MENESES**

**MARIA CAMILA HERNANDEZ BOBADILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**BUCARAMANGA**

**2017**

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN  
DE TRATAMIENTOS BIODEGRADABLES EN LA ELIMINACIÓN DE  
RESIDUOS ACEITOSOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA**

**PAULA ANDREA GALVIS MENESES  
MARIA CAMILA HERNANDEZ BOBADILLA**

**Proyecto de grado para optar al título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director:  
EDISON ODILIO GARCÍA NAVAS  
Ingeniero de Petróleos  
M.Sc. Ingeniería de Hidrocarburos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2017**

## AGRADECIMIENTOS

*A la vida y su bonita forma de tratarnos a lo largo de este viaje,  
por enseñarnos que siempre hay una puerta más que tocar  
después de que otras se hayan cerrado.*

*A su creador, el Padre Celestial, por su infinito amor para con  
nosotras. ¡Que nuestros logros siempre sean para su gloria!*

*A nuestros padres, por ser nuestros mayores seguidores, por ser  
amor, inspiración, ejemplo y motivación en cada etapa de  
nuestras vidas.*

*A C&P, por darnos el discernimiento y pasión por este tema, que  
nos abre otros tantos caminos por recorrer.*

*A nuestro amigo y programador Carlos Berdugo, por nunca decir  
“no” a nuestras peticiones, por su creatividad y paciencia.  
Pusiste la “cherry on top” de nuestro trabajo.*

*A nuestros hermanos y amigos, por su acompañamiento, apoyo,  
momentos de dispersión, muchas risas y su valiosísima amistad.*

*Especialmente gracias a mi compañera de tesis y amiga, Cami,  
por tu incansable manera de perseguir sus sueños, por  
enseñarme el significado de perseverancia, sin su intensidad,  
esto no hubiese sido posible. (- Paula)*

*A Pau, que en muy poco tiempo se convirtió en mi compañera  
de aventuras, siempre dispuesta a seguir mis ideas, arranques,  
madrugadas y trasnochos, gracias por ser ese apoyo  
incondicional. (- Camila)*

*A ti, Jerónimo Pérez, tu apoyo, comprensión y paciencia son tu mayor expresión de amor, gracias por caminar conmigo esta aventura que llamamos vida. (- Paula)*

*A nuestro director, el ingeniero Odilio, por su voto de confianza, y junto a él, la UIS, la Escuela de Ingeniería de Petróleos y todos los ingenieros que aportaron su granito de arena, no solo en nuestro trabajo, si no a lo largo de toda nuestra carrera, transmitir su conocimiento es el legado máspreciado que se le puede dejar a nuestra generación.*

*Con amor,  
Paula & Camila*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	15
1. ESTADÍSTICAS DE GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS .....	17
1.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL MUNDO .....	17
1.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN COLOMBIA .....	19
1.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA INDUSTRIA .....	20
2. GENERALIDADES SOBRE SÓLIDOS ACEITOSOS .....	23
2.1. FUENTES GENERADORAS DE SÓLIDOS ACEITOSOS.....	23
2.2. COMPOSICIÓN DE LOS SÓLIDOS ACEITOSOS .....	25
2.3. CONTAMINANTES PRESENTES EN LOS SÓLIDOS ACEITOSOS .....	25
2.3.1. IMPACTO A LOS ECOSISTEMAS .....	26
3. NORMATIVIDAD Y REGLAMENTACIÓN.....	30
3.1. REGULACIONES A NIVEL NACIONAL .....	30
3.2. REGULACIONES A NIVEL INTERNACIONAL.....	36
4. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE BIORREMEDIACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS .....	38
4.1. BIOAUMENTACIÓN Y BIOESTIMULACIÓN .....	42
4.2. LANDFARMING .....	42
4.2.1. Casos de aplicación.....	44
4.3. LANDFILL .....	45
4.4. BIOPILAS/COMPOSTAJE .....	46
4.4.1. Casos de aplicación:.....	48
4.5. BIO-SLURRY .....	48
4.5.1. Casos de aplicación .....	49
5. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS .....	51
5.1. ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	51

5.2. EXPLICACIÓN DEL MÉTODO .....	52
5.2.1. Ponderación lineal (scoring) .....	53
5.3. SELECCIÓN DE CRITERIOS Y SISTEMAS DE PONDERACIÓN.....	54
5.3.1. Parámetros ambientales .....	55
5.3.2. Parámetros operacionales .....	55
5.3.3 Parámetros económicos .....	56
5.4. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN.....	57
5.4.1. Sección 1. Ingreso Información.....	58
5.4.2. Sección 2. Parámetros ambientales .....	59
5.4.3. Sección 3. Parámetros operacionales .....	60
5.4.4 Sección 4. Parámetros económicos.....	61
5.4.5. Sección 5. Importancia de los parámetros .....	63
5.4.6. Sección 6. Módulo de respuesta.....	64
6. CONCLUSIONES .....	65
7. RECOMENDACIONES .....	66
BIBLIOGRAFIA.....	68

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Generación de residuos en miles de toneladas en algunos países del mundo.....	18
Figura 2. Borrás registradas en refinerías a nivel mundial.....	19
Figura 3. Generación de corrientes de Residuos Peligrosos en los años 2012 a 2015 en Colombia.....	22
Figura 4. Generación de residuos en la industria petrolera. ....	24
Figura 5. Proceso de biorremediación del petróleo.....	39
Figura 6. Métodos convencionales de tratamientos de sólidos aceitosos.....	40
Figura 7. Derecha, Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas. Izquierda, Representación esquemática de un sistema aireado de biopilas estáticas.....	47
Figura 8. Proceso toma de decisiones.....	52
Figura 9. Esquema operacional de las secciones de la herramienta. ....	57
Figura 10. Registro de datos iniciales - Sección 1. ....	58
Figura 11. Ponderación final de parámetros ambientales.....	60
Figura 12. Registro de datos operacionales – Sección 3.....	60
Figura 13. Registro de datos económicos – Sección 4. ....	62
Figura 14. Registro de porcentajes dados por el usuario – Sección 5.....	63
Figura 15. Comparación de imposición de multas. ....	67
Figura 16. Cantidad de residuos peligrosos generados por estado de la materia, en el periodo 2012-2015. ....	67

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de componentes de la corriente Y9+A406.....	20
Cuadro 2. Efectos negativos de los residuos peligrosos presentes en las borras. .....	26
Cuadro 3. Normatividad colombiana.....	30
Cuadro 4. Códigos de la ley de conservación y recuperación de los recursos.	36
Cuadro 5. Tratados ambientales internacionales.....	37
Cuadro 6. Resumen de parámetros de métodos biodegradables.....	41
Cuadro 7. Conversión de escala cualitativa a cuantitativa de parámetros ambientales.....	59
Cuadro 8. Conversión de escala cualitativa a cuantitativa de parámetros operacionales.....	61
Cuadro 9. Conversión de valores en los parámetros económicos.....	63

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Encuesta ambiental .....	72
Anexo B. Escenarios operacionales .....	73
Anexo C. Importancia criterios operacionales .....	76
Anexo D. Sección Ingreso de datos .....	77
Anexo E. Ingreso de datos operacionales .....	78
Anexo F. Ingreso de datos económicos .....	79
Anexo G. Ingreso de datos de ponderación .....	80
Anexo H. Informe de respuesta – Página 1 (Ejemplo compostaje) .....	81
Anexo I. Informe de respuesta – Página 1 (Ejemplo compostaje) .....	82

## RESUMEN

**TÍTULO: DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS BIODEGRADABLES EN LA ELIMINACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA\***

**AUTORES: PAULA ANDREA GALVIS MENESES  
MARIA CAMILA HERNANDEZ BOBADILLA\*\***

**PALABRAS CLAVES: Biorremediación, biodegradable, sólidos aceitosos, medio ambiente, residuos peligrosos**

### **DESCRIPCIÓN:**

Debido a la escasez de conocimiento y reglamentación del manejo y disposición de los residuos aceitosos de la industria de los hidrocarburos en Colombia y, a su alto grado de toxicidad para el medio ambiente y la salud humana; surge la necesidad de indagar diferentes alternativas de tratamientos utilizados actualmente, con el fin de seleccionar el método más apropiado que sea eco-amigable, eficiente, económicamente viable y aplicable a los residuos aceitosos generados en fondos de tanques de producción de campos colombianos.

Este trabajo se inició con una revisión bibliográfica detallada de las cifras de generación global y nacional de los residuos peligrosos, exponiendo las grandes cantidades producidas y la participación líder por parte de la industria petrolera; además, se hizo un estudio del ordenamiento jurídico nacional e internacional referente a su manejo y disposición. Posteriormente, se introduce el concepto de sólidos aceitosos y se expone la caracterización e impactos que estos conllevan, seguido de la descripción de los tratamientos de biorremediación utilizados actualmente para la disposición final y su metodología de aplicación.

Lo anteriormente analizado con el objetivo de diseñar una herramienta multicriterio para facilitar la selección del método más adecuado para la disposición final de los residuos aceitosos teniendo en cuenta parámetros ambientales, operacionales y económicos, que afectaran directamente la viabilidad de cada uno de los métodos.

---

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. Ing. Edison Odilio García Navas, Ingeniero de Petróleos.

## ABSTRACT

**TITLE: DESIGN OF A MULTI-CRITERION METHODOLOGY FOR THE SELECTION OF BIODEGRADABLE TREATMENTS IN THE ELIMINATION OF OILY WASTE IN THE OIL INDUSTRY \***

**AUTHORS: PAULA ANDREA GALVIS MENESES  
MARIA CAMILA HERNANDEZ BOBADILLA\*\***

**KEY WORDS: Bioremediation, biodegradable, oily sludges, environment, hazardous waste**

### **DESCRIPTION:**

Due to the lack of knowledge and regulation of the management and disposal of the oily waste of the hydrocarbons industry in Colombia and its high degree of toxicity to the environment and human health; there is a need to investigate nowadays, in order to select the most appropriate method that is eco-friendly, efficient, economically viable and applicable to oily residues generated in the bottom of production tanks in Colombian fields.

This work was carried out with a detailed bibliographic review of the global and national production rates of hazardous waste, exposing the large quantities produced and the majority participation by the oil industry, in addition, a study of the national and international legal normativity regarding its handling and disposal was made. Subsequently, the concept of oily sludges was introduced and the characterization and impacts of these are presented, followed by a description of the bioremediation treatments currently used for the final disposal and its application methodology.

The analyzed information was carried out with the objective of designing a multi-criterion tool to facilitate the selection of the most appropriate method for the final disposal of oily waste, taking into account the environmental, operational and economic parameters that directly affect the viability of each of the methods.

---

\*Degree project

\*\*Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. Ing. Edison Odilio García Navas, Ingeniero de Petróleos.

## INTRODUCCIÓN

Las crecientes cifras en la producción de residuos peligrosos generados a partir de los procesos de la Industria de los Hidrocarburos es un problema alarmante e inminente que atacar. Para el 2015, según el MINAMBIENTE e IDEAM, se estimaron a nivel nacional más de 400.000 toneladas de residuos peligrosos, de los cuales el 56% se le concede a la industria petrolera<sup>1</sup>. Sumado a esto, la carencia de infraestructura, conocimiento y normatividad estricta, han potenciado la disposición y tratamiento incontrolado de residuos en condiciones ambientalmente no aptas, ocasionando impactos con costos asociados extremadamente altos, acarreando repercusiones sobre los suelos, vegetación, fauna y, significativas consecuencias a la salud humana.

Durante la línea de producción de los hidrocarburos, condiciones operacionales con baja energía que conlleva a depósitos y acumulación de componentes más pesados y sustancias recalcitrantes asociadas. Estos depósitos se denominan sólidos aceitosos (borras) y se presentan en mayor cantidad en fondos de tanques de producción. Seguido a la recolección de los sólidos aceitosos, se llevan a cabo procesos para la recuperación de la mayor cantidad de aceite crudo que traen consigo, dejando un sub-residuo final sin valor económico para la industria, que para finalidad de este proyecto serán denominados en adelante como **residuos aceitosos**, siendo estos nuestro foco de estudio.

Debido a lo anterior, es necesario buscar la manera de mitigar su producción, y una vez agotadas las posibilidades de minimización, tratar los residuos aceitosos y disponerlos con el fin de completar la cadena de gestión. Dicha disposición debe ser ambientalmente adecuada, es decir, que considere los riesgos asociados tanto para el ambiente como para la salud y la seguridad, teniendo en

---

<sup>1</sup> IDEAM, Informe Nacional Generación y Manejo de residuos o desechos Peligrosos en Colombia 2014 y 2015. Bogotá, D.C., 2016. 96 p.

cuenta las características de los componentes y las del medio donde se va a desarrollar.

Hasta el momento se han realizado cientos de experimentos y trabajos donde se demuestra la efectividad degradadora de microorganismos sobre los residuos aceitosos, sin embargo, no se ha alcanzado un balance entre las necesidades ambientales e intereses económicos de la industria.

El presente estudio tiene la finalidad de revisar las biotecnologías más usadas para la disposición final de los residuos aceitosos generados en los fondos de tanques de producción y, con base a estas, diseñar una herramienta software multicriterio, llamada **C&P**, con el fin de ser usada como soporte en la selección del tratamiento de disposición más adecuado según los parámetros ambientales, operacionales y económicos para cada caso.

## **1. ESTADÍSTICAS DE GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS**

La gran variedad de productos y servicios que llegan al mercado mundial, así como las tendencias en su demanda, han estimulado el uso de nuevos materiales, sustancias y productos a un ritmo cada vez más acelerado, aumentando la generación de residuos o desechos peligrosos derivados de las diferentes actividades económicas. Aunado a esto, la toxicidad, complejidad y heterogeneidad química de estos desechos, así como los altos costos de tratamiento y disposición final, los convierten en un problema de atención inmediata.

Un “residuo o desecho peligroso” es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgos, daños o efectos no deseados, directos o indirectos, a la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considerará residuo peligroso a los empaques, envases y embalajes que estuvieron en contacto con ellos [Ley 1252 de noviembre de 2008. Artículo 3].

### **1.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN EL MUNDO**

De acuerdo con una investigación realizada por la autoridad de protección ambiental de Estados Unidos (US EPA), cada refinería en los Estados Unidos produce un promedio anual de 30.000 toneladas de residuos aceitosos (borras) y en China, la producción anual de los residuos sólidos a partir de la industria petroquímica está estimada en 3 millones de toneladas. Generalmente una mayor capacidad de refinación es asociada con una mayor producción de residuos aceitosos y ha sido estimado que por cada 500 toneladas de crudo procesado, se genera una tonelada de borras, dando lugar a la producción anual

de más de 60 millones de toneladas y más de 1 billón de toneladas que se han acumulado mundialmente<sup>2</sup>.

En la Figura 1 se muestra la generación de residuos peligrosos en algunos lugares del mundo durante los años 2012, 2013 y 2014 en miles de toneladas, de los cuales el mayor aportante proviene de la industria de los hidrocarburos.

Figura 1. Generación de residuos en miles de toneladas en algunos países del mundo



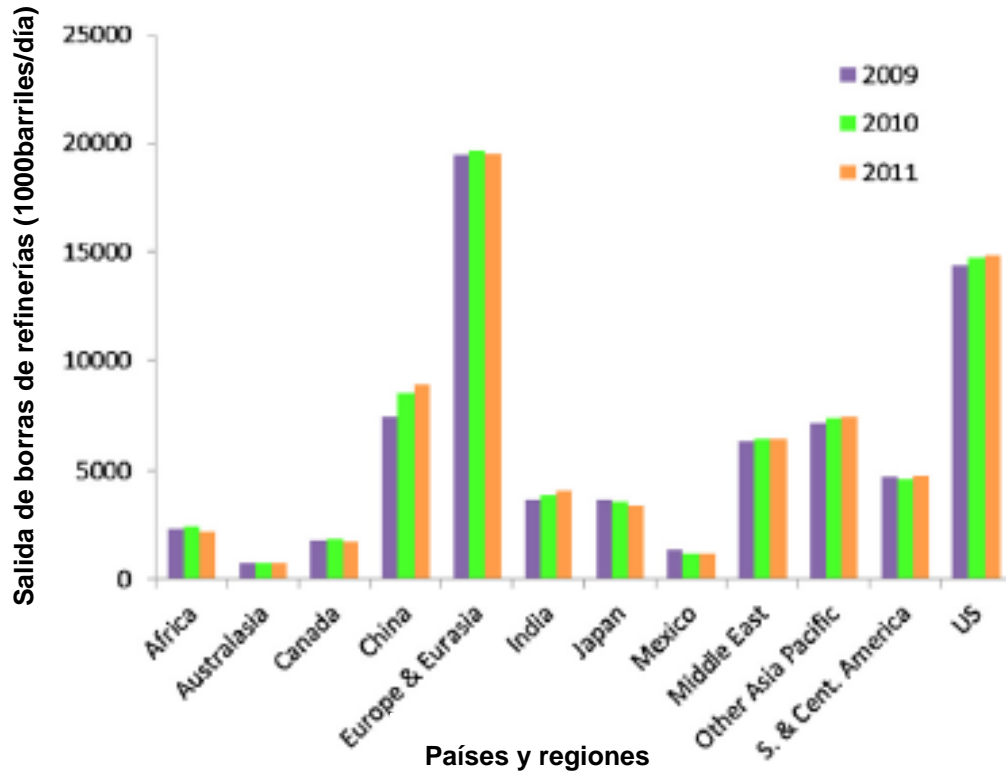
Fuente: IDEAM, Informe Nacional Generación y Manejo de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, 2014 y 2015. Bogotá, D.C., 2016. 13 p.

En la figura 2, se pueden ver las producciones más significativas de residuos aceitosos de los principales países productores y sus variaciones desde el 2009 hasta el 2011.

---

<sup>2</sup> HU Guangji, LI Jianbing y ZENG Guangming. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. En: Journal of Hazardous Materials, ELSEVIER. 2013.

Figura 2. Borrás registradas en refinerías a nivel mundial



Fuente: G. Hu, J. Li, G. Zeng, Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review, Journal of Hazardous Materials, ELSEVIER (2013).

## 1.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN COLOMBIA

En el año 2015 la generación de residuos o desechos peligrosos en el país fue de 406.078,2 toneladas, cifra inferior a la generada en el 2014, pero superior a la generada en los años 2013 y 2012, se estima que la disminución de las cantidades reportadas para el año 2015 con respecto al año 2014, pueden atribuirse a una menor actividad de extracción de petróleo crudo. Sin embargo, alrededor del 39% de estos residuos fueron gestionados adecuadamente, el 32% aprovechados y el 28% restante llegó a los basureros sin ningún tipo de tratamiento; adicional a esto la preocupación radica en que existe un subregistro respecto a este tema, pues la información se basa en lo que reportan las diversas

empresas ante las autoridades competentes. Según el director de IDEAM, Omar Franco, sólo aquellas empresas que generen más de 10 toneladas de residuos son obligadas a reportar, generando así un déficit en la información real<sup>3</sup>.

### 1.3. GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA INDUSTRIA

Las corrientes generadas en la industria petrolera se denominan: Y9, representan mezclas y emulsiones de desechos de hidrocarburos y agua y A4060, que representan desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua según el Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos como se muestra a continuación.

Dicho esto, para efectos de presentación de las estadísticas, estas corrientes de residuos peligrosos poseen descripciones equivalentes y se consideran iguales, por lo tanto, sus cantidades se suman.

Cuadro 1. Descripción de componentes de la corriente Y9+A406

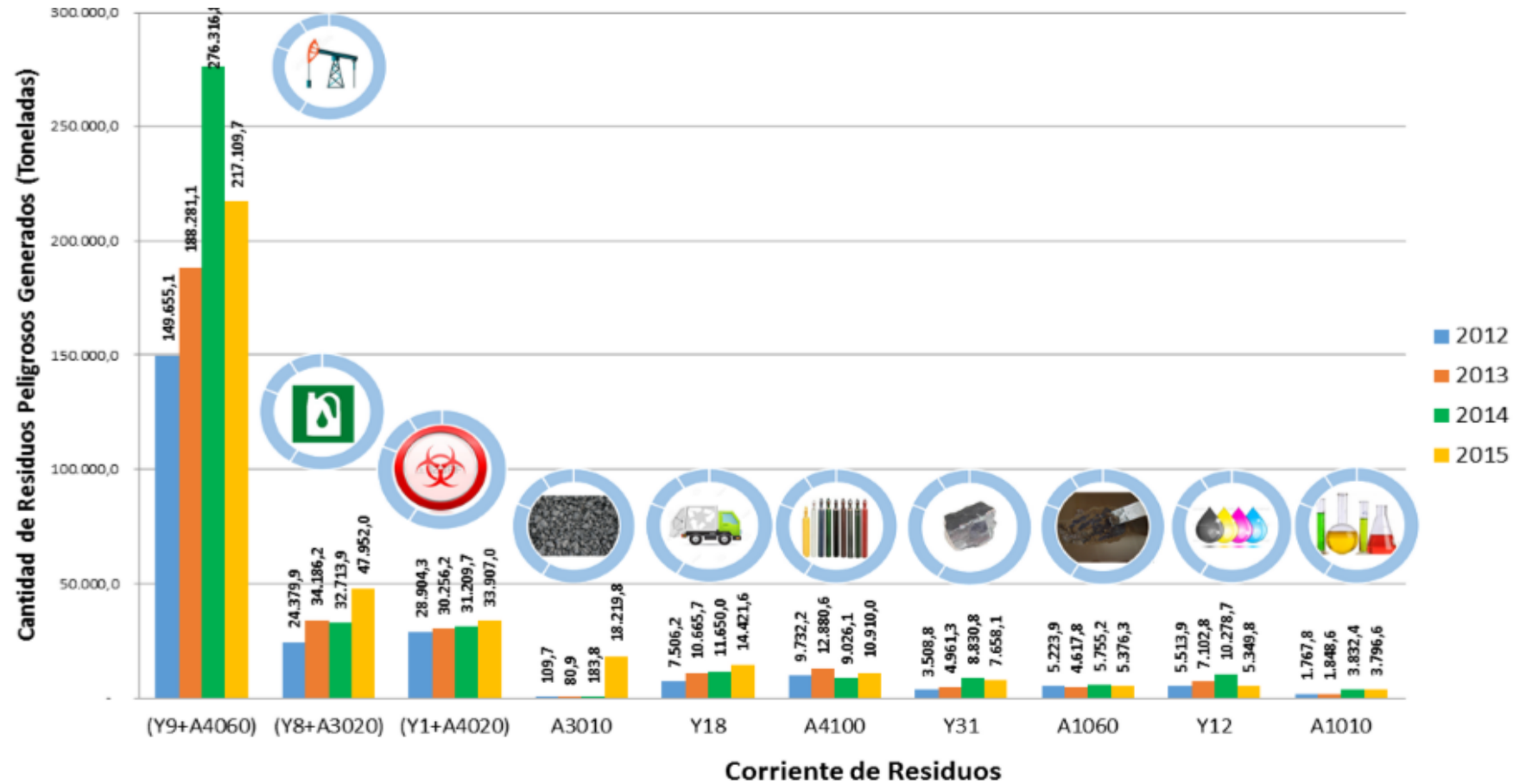
CORRIENTE DE RESIDUO	DESCRIPCIÓN
<b>Y9 + A4060</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Borrás</li> <li>• Lodos aceitosos</li> <li>• Lodos con presencia de hidrocarburos</li> <li>• Mezclas y emulsiones de hidrocarburos con agua</li> </ul>

Fuente: Modificado de IDEAM, Informe Nacional - Generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia – 2013.

<sup>3</sup> “Colombia está inundada de residuos peligrosos” [En línea]. En: Semana Sostenible. Marzo 07, 2017. (Recuperado en 10 de junio de 2017). Disponible en: <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/residuos-peligrosos-en-colombia-un-grave-problema/37263>

En la Figura 3, se puede observar la distribución de la generación de los diez principales residuos peligrosos para el año 2015 comparado con la generación de éstos en los años 2012 a 2014 por corriente de residuos. Allí se muestra claramente que los residuos generados por la industria (Y9+A4060) son los que más se dan en el país, seguidas por la corriente de aceites minerales no aptos para el uso al que estaban destinados (Y8+A3020) y la corriente de desechos clínicos y afines (Y1+A4020). En 2015, la corriente (Y9+A4060) representó el 53.5% del total de residuos generados, la segunda el 11,8% y la tercera el 8,3%. Cabe resaltar que, de las corrientes de residuo presentes en la imagen, hubo una disminución de la generación de la corriente (Y9 + A4060) entre los años 2015 y 2014 en 59.207 toneladas, lo que equivale a una disminución del 21,4%.

Figura 3. Generación de corrientes de Residuos Peligrosos en los años 2012 a 2015 en Colombia.



Fuente: IDEAM, Informe Nacional - Generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia – año 2013. Bogotá, D. C., 2015. 30 p.

## **2. GENERALIDADES SOBRE SÓLIDOS ACEITOSOS**

### **2.1. FUENTES GENERADORAS DE SÓLIDOS ACEITOSOS**

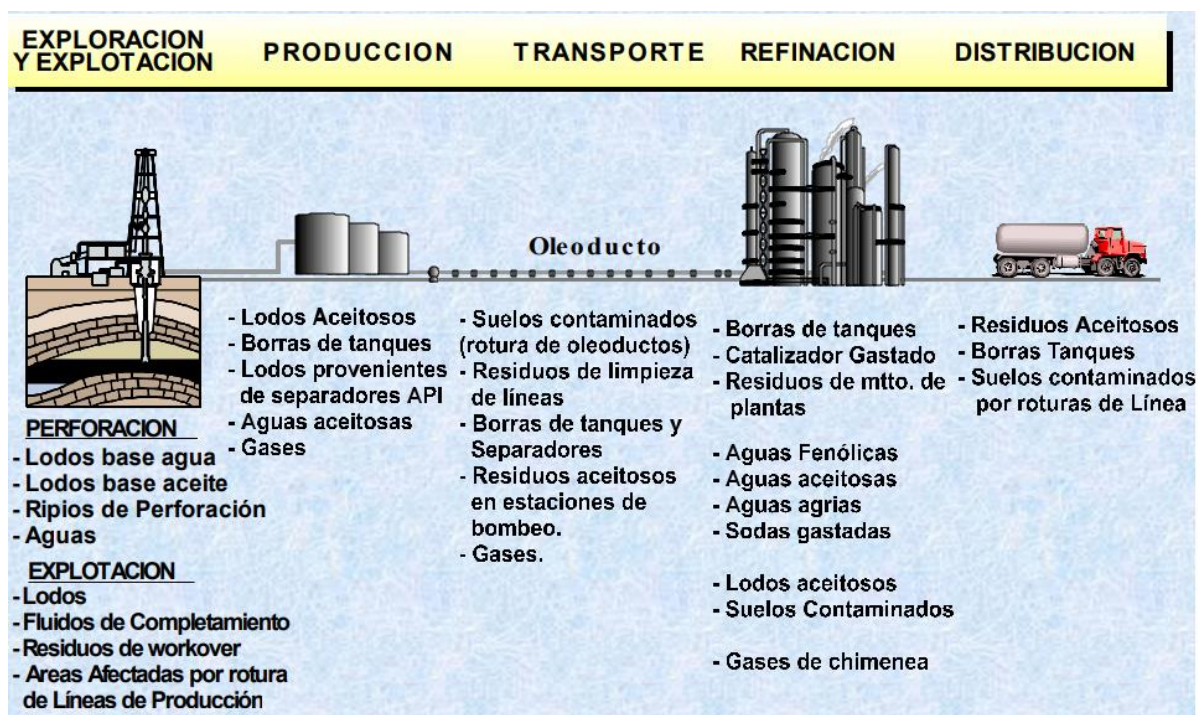
En los campos de petróleo, una vez el crudo se extrae del subsuelo debe ser sometido a procesos para removerles el agua y la sal que traen asociada. Después de estos tratamientos, los crudos son almacenados en tanques para posteriormente ser transportados hacia los centros de refinación o hacia los puertos para su exportación. Adicional al agua, el crudo contiene arena del pozo y otros materiales, como óxidos de las tuberías.

Durante el desarrollo de estos procesos se presenta formación de agua y arrastre de materiales sólidos, como residuos de catalizadores y óxidos de metales; adicionalmente, ocurren procesos de sedimentación donde los compuestos más densos, tales como agua, hidrocarburos pesados y sólidos se van acumulando en el fondo del tanque hasta formar materiales pastosos y viscosos, los cuales reciben el nombre de sólidos aceitosos o borras de fondo de tanque.

Se denomina residuo aceitoso a todo tipo de sedimento que se acumula en zonas de baja velocidad, como tanques y zonas muertas de tuberías; el hidrocarburo presente en los sólidos aceitosos está formado por algunos compuestos pesados, como asfáltenos, resinas y/o parafinas, que se precipitan debido a diferentes mecanismos, atrapando agua y sólidos en este proceso. Los sedimentos o sólidos pueden ser óxidos, arenas, partículas finas y residuos metálicos.

En la figura 4 se muestran los diferentes tipos de residuos generados a lo largo de la cadena productiva de los hidrocarburos, esta generación puede ser considerada como una pérdida del proceso y un mal aprovechamiento de la materia prima empleada, representando, por lo tanto, una reducción en la rentabilidad del proceso productivo.

Figura 4. Generación de residuos en la industria petrolera.



Fuente: Tendencias de Biorremediación para la Industria Petrolera, Ecopetrol.

Los residuos de mayor generación corresponden a los aceitosos generados en fondos de tanques de producción y, según lo proyectado en un estudio hecho del PMA del bloque Cubarral (Campos Castilla y Chichimene) en el 2011, estimaron la no despreciable cantidad de 14400 barriles de sólidos aceitosos (2291 m<sup>3</sup>), que es un volumen suficiente para llenar una piscina Olímpica de 50 m de largo por 25 m de ancho y 2 m de profundidad, en más del 90% de su capacidad o peor aún, poder llenar 117 carros compactadores de basura que vemos en una ciudad a diario. Y este volumen es calculado para un solo campo productor<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>TORRES CERVERA, Karina. Análisis de los impactos ambientales generados por el tratamiento y disposición final de los residuos aceitosos (borras) generados en los distritos de producción de hidrocarburos. Monografía Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas. Instituto de Estudios Ambientales, 2014.

## **2.2. COMPOSICIÓN DE LOS SÓLIDOS ACEITOSOS**

Las borras son un residuo recalcitrante, con valor del ph variando en un rango entre 6.5 y 7.5, caracterizadas como una emulsión de agua y aceite estable, con sólidos, hidrocarburos y metales pesados en su composición; la cual, junto con sus propiedades, varían notablemente dependiendo del tipo de crudo, proceso y equipo que fue usado para su tratamiento, así como por la exposición al ambiente durante su almacenamiento al aire libre.

Generalmente estos rangos oscilan entre 10-56% de material aceitoso, 30-85% de agua y 13-46% de partículas sólidas, y, el sólido aceitoso, a su vez está compuesto por 40-52% alcanos, 28-31% aromáticos, 8-10% asfáltenos y el 7-22.4% resinas restantes.

Según reporte del American Petroleum Institute (API), las concentraciones de metales pesados presentes en los lodos aceitosos provenientes de refinerías comúnmente tienen rangos de valores entre 7-80 mg/kg de Zinc (Zn), 0.001-0.12 mg/kg de Plomo (Pb), 32-120 mg/kg de cobre (Cu), 17-25 mg/kg de níquel (Ni) y 27-80 mg/kg de cromo (Cr), sin embargo, en algunos casos estos valores pueden llegar a ser tan altos como algunos reportados en la literatura con 1299 mg/kg de Zn, 60200 mg/kg de hierro (Fe), 500 mg/kg de Cu, 480 mg/kg de Ni, y 565 mg/kg de Pb.<sup>5</sup>

## **2.3. CONTAMINANTES PRESENTES EN LOS SÓLIDOS ACEITOSOS**

Estos residuos son normalmente almacenados en piscinas de concreto o muchas veces sin ningún tipo de aislamiento al suelo, donde fácilmente se desbordan por las lluvias y lixivian las capas subterráneas, trayendo consigo varios efectos tóxicos que pueden perturbar las propiedades físicas y químicas en el suelo que las recibe, generando alteraciones en el desarrollo natural de los ecosistemas, produciendo daños colaterales tanto en cuerpos de agua

---

<sup>5</sup> HU Guangji, et al. Op cit.

superficiales y acuíferos, como afectando la salud del personal y comunidades partícipes del entorno.

### 2.3.1. IMPACTO A LOS ECOSISTEMAS

La disposición de las borras al ambiente conlleva a varios efectos tóxicos causados por los PHCs y metales pesados. La mayoría de los metales pesados, tienen un efecto acumulativo y son de por sí un peligro en particular, sin embargo, son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs, por sus cifras en inglés) aquellos que generan mayor preocupación. En la tabla 2 se exponen los principales contaminantes catalogados como residuos peligrosos según el Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos<sup>6</sup>, sus efectos a la salud humana y los ecosistemas.

Cuadro 2. Efectos negativos de los residuos peligrosos presentes en las borras.

Nombre Residuo Peligroso	Efectos Negativos	
	Salud Humana	Ecosistemas
<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Cáncer</li> <li>→ Genotoxicidad</li> <li>→ Mutagenicidad</li> <li>→ Teratogenicidad</li> <li>→ Inmunotoxicidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Contaminación de aguas subterráneas</li> <li>→ Lenta degradación</li> <li>→ Ecotoxicidad</li> <li>→ Riesgo de inflamabilidad y explosión</li> </ul>
<b>Plomo (Pb)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Daño al cerebro y al sistema nervioso</li> <li>→ Problemas de comportamiento, crecimiento y aprendizaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Limita la síntesis clorofílica de las plantas y perjudica el crecimiento de las plantas</li> </ul>

<sup>6</sup> ESTADOS UNIDOS. Code of Federal Regulations. . Chapter I - Environmental Protection Agency. Subchapter I - Solid Wastes. Title 40 - Protection of Environment. Part 261 - Identification and listing of hazardous waste. 261.31 - Hazardous wastes from non-specific sources. (01, julio, 2012).

Nombre Residuo Peligroso	Efectos Negativos	
	Salud Humana	Ecosistemas
	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Problemas auditivos</li> <li>→ Anemia</li> <li>→ Problemas reproductivos</li> <li>→ Alta presión sanguínea</li> <li>→ Problemas digestivos</li> <li>→ Desórdenes nerviosos</li> <li>→ Problemas de memoria y concentración.</li> <li>→ Dolores musculares y articulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Provoca perturbaciones en el fitoplancton</li> <li>→ En animales, puede causar envenenamiento, e incluso la muerte por paro cardio-respiratorio</li> <li>→ Alteraciones genéticas causantes de automutilaciones y autolaceraciones</li> </ul>
<b>Cromo Hexavalente (Cr VI)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Erupciones cutáneas</li> <li>→ Malestar de estómago y úlceras</li> <li>→ Problemas respiratorios</li> <li>→ Debilitamiento del sistema inmune</li> <li>→ Daño en los riñones e hígado</li> <li>→ Alteración del material genético</li> <li>→ Cáncer de pulmón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Contaminación en la cadena alimenticia de seres vivos</li> <li>→ Genotoxicidad</li> <li>→ Cancerígeno</li> <li>→ Malformaciones</li> <li>→ Infertilidad</li> </ul>
<b>Mercurio (Hg)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Daño al sistema nervioso</li> <li>→ Daño a las funciones del cerebro</li> <li>→ Daño al ADN y cromosomas</li> <li>→ Reacciones alérgicas, irritación de la piel, cansancio, y dolor de cabeza</li> <li>→ Efectos negativos en la reproducción, daño en el esperma, defectos de nacimientos y abortos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Acidificación del agua</li> <li>→ Daño sistema nerviosos en los animales</li> <li>→ Puede acumularse en peces y en cadenas alimenticias de las que forman parte</li> <li>→ Daño en los riñones e intestinos, trastornos en el estómago</li> <li>→ Fallos en la reproducción y alteración del ADN</li> </ul>
<p><b>Otros contaminantes y metales pesados</b> <b>En altas concentraciones:</b></p>		

Nombre Residuo Peligroso	Efectos Negativos	
	Salud Humana	Ecosistemas
<b>Zinc (Zn)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Defectos de nacimiento</li> <li>→ Úlcera de estómago, vómito y náuseas</li> <li>→ Irritación de la piel</li> <li>→ Anemia</li> <li>→ Arterioesclerosis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Incrementar la acidez del agua</li> <li>→ En suelos ricos en Zinc, sólo un número limitado de plantas tiene la capacidad de sobrevivir</li> <li>→ Puede interrumpir la actividad en los suelos, con influencias negativas en las actividades de los microorganismos y lombrices de tierra</li> </ul>
<b>Cobre (Cu)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Irritación de la nariz, boca y ojos</li> <li>→ Dolor de cabeza, estómago, mareos, vómitos y diarreas</li> <li>→ Toma en altas dosis, puede causar daño al hígado y riñones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Puede interrumpir la actividad en los suelos, con influencias negativas en las actividades de los microorganismos y lombrices de tierra</li> <li>→ La descomposición de la materia orgánica puede disminuir</li> </ul>
<b>Níquel (Ni)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata</li> <li>→ Embolia de pulmón</li> <li>→ Fallos respiratorios</li> <li>→ Defectos de nacimiento</li> <li>→ Asma y bronquitis crónica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Puede causar varios tipos de cánceres en los animales, mayormente en aquellos que viven cerca de las refinerías</li> <li>→ Daño a las plantas, en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas</li> </ul>

Adicionalmente, se pueden presentar en menor proporción otros metales tales como Cobalto, Hierro, Selenio, Manganeso, Molibdeno, Antimonio, Bario, Plata, Talio, Titanio, Estaño, Vanadio. Anudado a esto, el tiempo de almacenamiento que estos residuos tienen de exposición, acentúan su peligrosidad y por ende se genera problemas operativos y financieros importantes.

### 3. NORMATIVIDAD Y REGLAMENTACIÓN

#### 3.1. REGULACIONES A NIVEL NACIONAL

En Colombia, cada autoridad ambiental, dependiendo de su jurisdicción, recopila información y cifras por parte de las entidades generadoras de residuos peligrosos en su territorio y los reporta al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el cual recibe la información y consolida las cantidades anuales de residuos peligrosos generados por estado de la materia, actividad productiva, por corriente o tipo de residuos, entre otros. Igualmente, esta información se reporta a la Secretaría del Convenio de Basilea – SCB.

Según el ordenamiento jurídico colombiano, no se encuentra de forma explícita una ley o decreto de orden nacional sobre contaminación o remediación de suelos, como tampoco en tratamientos, procedimientos o cantidades de contaminantes máximas permitidas presentes en suelos o en desechos impregnados de hidrocarburos. Sin embargo, se rescatan algunos apartes que se pueden extrapolar a la industria petrolera para ser aplicados en tratamientos y disposición de residuos peligrosos. Estos están citados en la tabla 3.

Cuadro 3. Normatividad colombiana

<b>LEY/ARTÍCULO/ DECRETO</b>	<b>PRINCIPIO</b>
<b>Decreto 2811 de 1974</b>	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Normas técnicas de manejo, uso, aprovechamiento, explotación, conservación, preservación, protección y restauración de recursos naturales humanos.

LEY/ARTÍCULO/ DECRETO	PRINCIPIO
<p><b>Ley 9 de 1979</b></p>	<p><i>Artículo 31.</i> Quienes produzcan basuras con características especiales, en los términos que señale el ministerio de salud, serán responsables de su recolección, transporte y disposición final.</p> <p><i>Artículo 32.</i> Para los efectos de los artículos 29 y 31 se podrán contratar los servicios de un tercero el cual deberá cumplir las exigencias que para tal fin establezca el Ministerio de Salud o la entidad delegada.</p> <p><i>Artículo 44.</i> Se prohíbe descargar en el aire contaminantes en concentraciones y cantidades superiores a las establecidas en las normas que se establezcan al respecto.</p> <p><i>Artículo 45.</i> Cuando las emisiones a la atmósfera de una fuente sobrepasen o puedan sobrepasar los límites establecidos en las normas, se procederá a aplicar los sistemas de tratamiento que le permitan cumplirlos.</p>
<p><b>Decreto 2309 de 1986</b></p>	<p>Ministerio de salud: para el manejo de residuos especiales</p> <p><i>Artículo 2. Residuos especiales.</i> Para los efectos de esta resolución se denominan Residuos Especiales, los objetos, elementos o sustancias que se abandonan, botan, desechan, descartan o rechazan y que sean patógenos, tóxicos, combustibles, inflamables, explosivos, radiactivos o volatilizables y los empaques y envases que los hayan contenido, como también los lodos, cenizas y similares.</p> <p><i>Artículo 5. Residuo toxico.</i> Se entiende por residuo toxico, aquel que, por sus características físicas o químicas, dependiendo de su concentración y tiempo de exposición, puede causar daño a la salud humana o al medio ambiente.</p>

LEY/ARTÍCULO/ DECRETO	PRINCIPIO
	<p><i>Artículo 11. Manejo de residuos especiales.</i> En el manejo de residuos especiales quedan comprendidas las siguientes actividades: generación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento, separación y disposición final.</p>
<p><b>Ley 99 de 1993</b></p>	<p>Por el cual se crea el ministerio del medio ambiente, se reordena el sector publico encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el sistema nacional ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Reglamentado por los decretos 1713 de 2002, 4688 de 2005, 3600 de 2007 y 2372 de 2010.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema nacional ambiental -SINA</li> <li>• Planificación y gestión</li> <li>• Licencias ambientales</li> <li>• Participación ciudadana</li> <li>• Control y vigilancia</li> </ul>
<p><b>Ley 253 de 1996</b></p>	<p>Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989.</p> <p>2. Cada parte tomará las medidas apropiadas para:</p> <p>a) Reducir al mínimo la generación de desechos peligrosos y otros desechos en ella, teniendo en cuenta los aspectos sociales, tecnológicos y económicos;</p> <p>b) Establecer instalaciones adecuadas de eliminación para el manejo ambientalmente racional de los desechos peligrosos y otros desechos, cualquiera que sea el lugar donde se efectúa su eliminación que, en la medida de lo posible, estará situado dentro de ella.</p>

<b>LEY/ARTÍCULO/ DECRETO</b>	<b>PRINCIPIO</b>
<b>Ley 430 de 1998</b>	Tiene como objetivo regular todo lo relacionado con la prohibición de introducir desechos peligrosos al territorio nacional, en cualquier modalidad según lo establecido en el Convenio de Basilea y sus anexos, y con la responsabilidad por el manejo integral de los generados en el país y en el proceso de producción, gestión y manejo de los mismos.
<b>Decreto 321 de 1999</b>	Se adopta el plan nacional de contingencia contra derrames de hidrocarburo, derivados y sustancias nocivas.
<b>Decreto 1713 de 2002</b>	<p>Por el cual se reglamentan las leyes 142 de 1994, 632 de 2000 y 689 de 2001, en relación con la presentación del servicio público de aseo, y el decreto ley 2811 de 1974 y la ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.</p> <p>Modificado por el decreto 838 de 2005, derogado por el artículo 120, decreto 2981 de 2013. Derrogan parcialmente el decreto 605/96. Gestión integral de residuos sólidos, recolección de basuras y disposición de residuos. Vigente régimen sancionatorio.</p>
<b>Ley 2820 del 5 de agosto de 2010.</b>	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
<b>Decreto 1609 de 2002</b>	Reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carreteras.
<b>Resolución 1045 de 2003</b>	Se adopta la metodología para la elaboración de los planes de gestión integral de residuos sólidos.

LEY/ARTÍCULO/ DECRETO	PRINCIPIO
	Modifica el derecho 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
<b>Decreto 4741 de 2005</b>	Reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
<b>Resolución 1362 de 2007</b>	Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el registro de generadores de residuos o desechos peligrosos, a las que hacen referencia los artículos 27 y 28 de decreto 4741 de 2005
<b>Ley 1252 de 2008</b>	Por la cual se dictan normas prohibidas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
<b>Decreto 838 de 2005</b>	Por el cual se modifica el decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
<b>Artículo 120, decreto 2981 de 2013</b>	Decreto por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo.  Artículo 120 deroga los decretos 1713 de 2002, 1140 de 2003 y 1505 de 2003, entre otros.
<b>Decreto 4688 de 2005</b>	Por el cual se reglamenta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente.
<b>Decreto 3600 de 2007</b>	Por el cual se reglamentan las disposiciones de las leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de la parcelación y edificación en este tipo de suelo y se adoptan otras disposiciones.

LEY/ARTÍCULO/ DECRETO	PRINCIPIO
<b>Decreto 2372 de 2010</b>	Por el cual se reglamenta el decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones.

Además, hay ciertas normas que indirectamente aplican al tratamiento y disposición final de los sólidos aceitosos, como los referentes a residuos especiales.

Sin embargo, estas normas no han recibido atención como actividad prioritaria dentro del contexto de la protección ambiental y el desarrollo sostenible y son ineficientes para el tratamiento y disposición final de residuos aceitosos.

Un claro ejemplo de esto se ve reflejado en el bloque Cubarral, donde se encentraron, según estudios realizados en el 2014, problemas ambientales directamente relacionados a la disposición de los residuos aceitosos, convirtiéndose en pasivos ambientales; ya que se encontraban en piscinas de biorremediación en mal estado (colmatadas), se continuó el almacenamiento en las mismas, generando impactos (contaminación del suelo, agua, aire, pérdida de la flora y fauna, alteración del paisaje y ecosistema), resultando en un periodo de suspensión y clausura de en las actividades de biorremediación e incineración por la problemática encontrada para la empresa estatal Ecopetrol, además de una multa por \$1'387.984.678, en base al numeral 1° del artículo 40 de la ley 1333 del 21 de julio de 2009 <sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> TORRES CERVERA, Karina. Análisis de los impactos ambientales generados por el tratamiento y disposición final de los residuos aceitosos (borras) generados en los distritos de producción de hidrocarburos. Monografía Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas. Instituto de Estudios Ambientales, 2014.

### 3.2. REGULACIONES A NIVEL INTERNACIONAL

Las normas pertinentes al manejo ambiental están basadas en la norma estadounidense *Lousiana 29B*. Esta norma fue la pionera en las recomendaciones dadas a todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente; especialmente en el título 43, parte XIX, orden estatal 29B.

Debido a la naturaleza peligrosa de los sólidos aceitosos, algunas medidas han sido tomadas a nivel mundial como la ley de la conservación y recuperación de los recursos (RCRA, por sus siglas en inglés), es la ley pública creada en Estados Unidos para el manejo apropiado de residuos sólidos, esta describe el programa de manejo de residuos ordenada por la autoridad de protección ambiental (EPA), estableciendo estrictos estándares para su manejo, almacenamiento y disposición final.

Cuadro 4. Códigos de la ley de conservación y recuperación de los recursos.

<b>Norma</b>	<b>Función</b>
<b>Usepa 40 CFR 261</b>	Identificación y listado de residuos peligrosos
<b>Usepa 40 CFR 262</b>	Normas para generadores de residuos
<b>Usepa 40 CFR 264</b>	Normas para el manejo, almacenamiento, tratamiento y disposición de residuos.

También se han establecido algunas normas a nivel mundial, las cuales han servido como punto de referencia y regulación en este tema para algunos países como Colombia.

Cuadro 5. Tratados ambientales internacionales

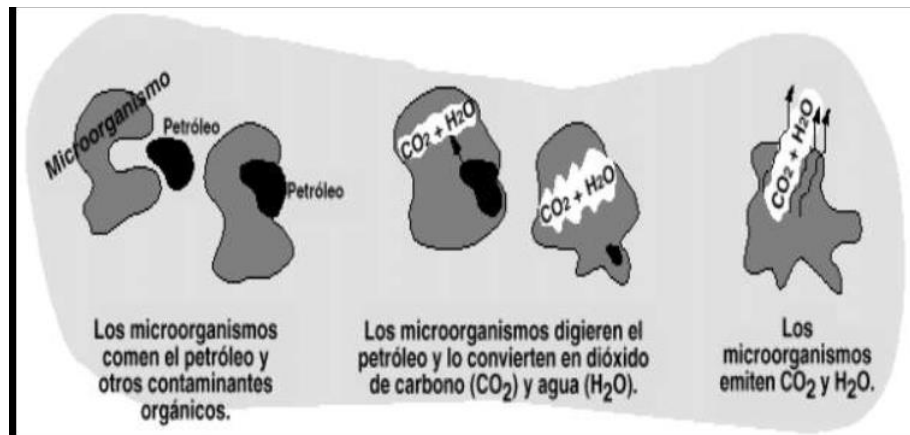
<b>Normas internacionales</b>	<b>Función/Objetivo</b>
<b>Convenio de Basilea</b>	Control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Protocolo sobre la responsabilidad e indemnización por los daños resultantes de estos.
<b>Protocolo de Montreal</b>	Es un protocolo de la convención de Viena para la protección de la capa de Ozono, reduciendo la producción y consumo de sustancias que reaccionan y se consideran responsables del agotamiento de la capa.

#### 4. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE BIORREMEDIACIÓN DE RESIDUOS ACEITOSOS

A mediados del siglo XX se desarrollaron las primeras investigaciones encaminadas a estudiar el potencial de los microorganismos para biodegradar contaminantes. Este "uso" intencionado recibió entonces el nombre de biorremediación (bioremediation). Las primeras técnicas que se aplicaron fueron similares al "landfarming" ("labranza") actual y sus actores, lógicamente, compañías petrolíferas. Las primeras patentes, fundamentalmente para remediación de vertidos de gasolina, aparecen en los años 70. En los años 80 se generalizó el uso del aire y peróxidos para suministrar oxígeno a las zonas contaminadas mejorando la eficiencia de los procesos degradativos. Durante los años 90 el desarrollo de las técnicas de "air sparging" (burbujeo de oxígeno) hizo posible la biorremediación en zonas por debajo del nivel freático. Al mismo tiempo, la implementación en la práctica de aproximaciones experimentales en el laboratorio permitió el tratamiento de hidrocarburos clorados, los primeros intentos con metales pesados, el trabajo en ambientes anaerobios, etc. Paralelamente, se desarrollaron métodos de ingeniería que mejoraron los rendimientos de las técnicas más populares para suelos contaminados ("landfarming", "composting", etc.).

La biorremediación consiste en la aceleración de los procesos naturales de biodegradación mediante bacterias u otros microorganismos como plantas, algas, cianobacterias, actinomicetes y hongos, que alteran, convierten y metabolizan aeróbicamente los hidrocarburos y las moléculas orgánicas en otras sustancias, como CO<sub>2</sub>, agua, metano y fuentes de alimento para sustentar su crecimiento y reproducción, es decir la biodegradación ocurre naturalmente. Esta atenuación natural transforma el contaminante en una forma menos tóxica. Por tanto, esta biotecnología es una herramienta efectiva para mejorar la degradación de contaminantes en el suelo. A continuación, en la figura 5 se observa cómo se da el proceso de biorremediación del petróleo.

Figura 5. Proceso de biorremediación del petróleo.



Fuente: Determinación y análisis de un proceso de biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Miguel Ángel Cando Rodríguez, 2011.

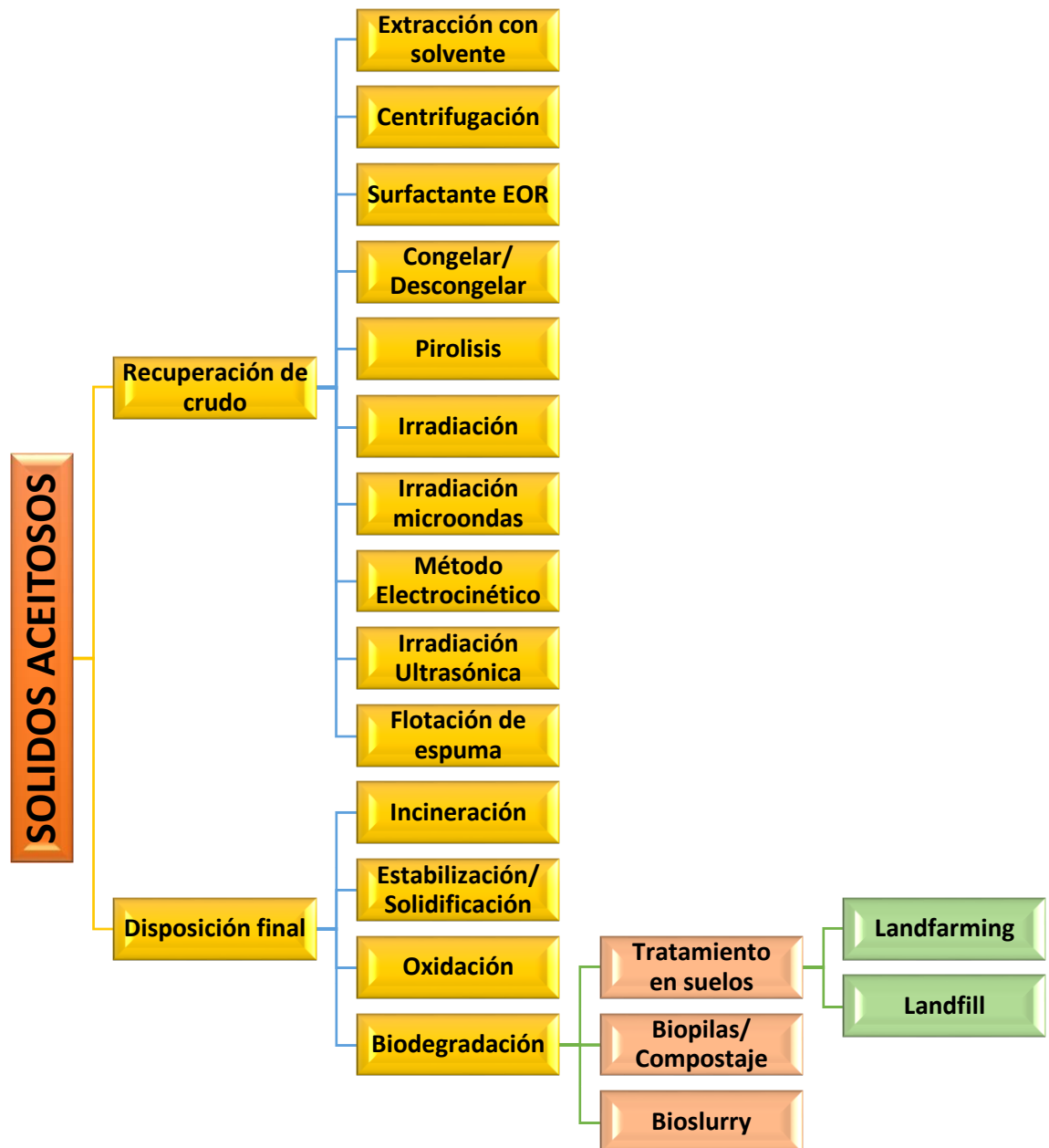
Es muy probable que la presencia de cambios severos de temperaturas día/noche, elevada radiación solar, cambios de humedad y falta de oxigenación, producto de un inadecuado mezclado de las borras, causen una reducción en la velocidad de degradación de los componentes, así como también debido a su alta viscosidad, sus componentes tienden a fijarse en el espacio poroso del suelo, creando una capa superficial que reduce la mojabilidad, la conductividad hidráulica y la capacidad de retención del agua; cuyas remediaciones incrementarían significativamente los costos ambientales y económicos.

Generalmente, una estrategia de gestión de sólidos aceitosos debe ser aplicada en 3 niveles. Esto incluye: (1) emplear tecnologías que minimicen la producción de la cantidad de sólidos aceitosos, (2) recuperación de aceite existente en las borras, y (3) disposición final del residuo no recuperable (residuos aceitosos) si ninguno de los dos primeros pasos no son aplicables o ya han sido aplicados. Una variedad de métodos han sido desarrollados para el tratamiento de borras y son mostrados en la figura 6.

De la aplicación de uno o la combinación de estos métodos depende el éxito del tratamiento de la borra. De tal manera que muchos investigadores han concentrado sus esfuerzos en desarrollar estas técnicas con el objetivo único de

lograr un tratamiento y una disposición adecuada de estos desechos con el mínimo impacto posible al medio ambiente y a las personas.

Figura 6. Métodos convencionales de tratamientos de sólidos aceitosos.



Fuente: HU Guangji, LI Jianbing y ZENG Guangming. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. En: Journal of Hazardous Materials, ELSEVIER. 2013.

Debido a que dentro del alcance de este proyecto no se incluye la explicación de todos y cada uno de los métodos, en el presente capítulo se profundizará sólo en aquellos de disposición final con el principio de biodegradación.

Como se mencionó anteriormente, los residuos de interés son aquellos a los que ya se les ha realizado los tratamientos referentes a recuperación de crudo y deshidratación, para proseguir con la última fase que atraviesa el desecho. Dicho esto, a continuación, se exponen los métodos de tratamientos biodegradables, sus ventajas, características y limitaciones a la hora de ser considerados como alternativas de disposición final.

A modo de introducción, se presenta en el cuadro 6 la compilación de parámetros representativos de cada uno de los tratamientos de disposición final para posteriormente ser explicados en detalle uno a uno.

Cuadro 6. Resumen de parámetros de métodos biodegradables

<b>Método</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>Costo (USD/m3)</b>	<b>Duración</b>	<b>Subproductos</b>
<b><i>Lanfarming</i></b>	75-90%	50-100	6-24 m	VOCs (Componentes orgánicos volátiles), suelos contaminados, lixiviados peligrosos
<b><i>Landfill</i></b>	75-90%	50-100	6-24 m	Suelos contaminados, relativamente poca cantidad de VOCs
<b><i>Compostaje/ Biopilas</i></b>	75-90%	50-100	1-6 m	Emisiones de VOCs si no existe una unidad recolectora
<b><i>Bioslurry</i></b>	>90%	50-200	1-6 m	<i>Sludge slurry</i>

Fuente: Modificado de HU Guangji, LI Jianbing y ZENG Guangming. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. En: Journal of Hazardous Materials, ELSEVIER. 2013.

#### **4.1. BIOAUMENTACIÓN Y BIOESTIMULACIÓN**

Sin ser considerados individualmente como tratamientos de disposición, estos procesos se toman como base a la hora de aplicar cualquier método biodegradable.

Los procesos de biorremediación se clasifican en técnicas de bioestimulación y bioaumentación. La técnica de bioestimulación se basa en el uso de nutrientes, sustratos o aditivos con actividad superficial para estimular el crecimiento y desarrollo de organismos capaces de biodegradar compuestos contaminantes del medio ambiente. La técnica de bioaumentación describe la adición de organismos o enzimas a un material con el propósito de eliminar sustancias indeseables. La bioaumentación asegura que estén presentes los microorganismos específicos capaces de degradar al compuesto contaminante no deseado hasta sus moléculas básicas, los microorganismos comúnmente utilizados son bacterias.

#### **4.2. LANDFARMING**

Este procedimiento inicia trasladando los contaminantes a un suelo no contaminado, el cual ha sido preparado con anterioridad para evitar su contaminación y la de las aguas subterráneas con sustancias que puedan producirse durante el tratamiento. Para ello se efectúa el diseño del lugar donde se depositan los contaminantes, aislando el material de tratamiento del área no contaminada con una tela impermeable.

Para empezar el procedimiento, se hace una búsqueda y selección de bacterias nativas aisladas de las muestras de suelos que se encuentran contaminados, ya que estas tienen la capacidad catabólica para crecer bajo las condiciones físico-químicas y de estrés a las que están sometidas, y tendrán un mejor desempeño a la hora de la biorremediación. La búsqueda comienza en el procesamiento de una muestra de suelo mediante una serie de diluciones, tratando de obtener aquellos morfotipos cultivables. Además de una búsqueda general, se realiza

una específica a través de medios selectivos y diferenciales, en la cual se pretende aislar ciertos morfotipos como las *Pseudomona* sp. y bacterias lactosa positivas –bacterias capaces de utilizar la lactosa–, debido a su bien conocida actividad degradadora de hidrocarburos.

Ya seleccionados los morfotipos se conforma un consorcio o pool de microorganismos degradadores de hidrocarburos y, utilizando la estrategia de bioaumentación, se hace una producción a mayor escala y en proporciones estratégicas de estos. La eficiencia del tratamiento puede aumentar manteniendo la adecuada tasa de aplicación del residuo, la aireación, fertilización, mojabilidad y, pH para mantener la densidad microbiana y mejorar su actividad en la mezcla suelo-lodo.

Comparada con otras tecnologías el *landfarming* tiene muchas ventajas, tales como:

- ✓ Bajos costos de inversión
- ✓ Operación simple
- ✓ Alto potencial de éxito, alta eficiencia
- ✓ Bajo consumo de energía
- ✓ Capacidad para tratar grandes volúmenes de borras

Desventajas:

- ☒ Requiere de grandes terrenos
- ☒ Proceso a largo plazo (de 6 a 24 meses)
- ☒ Los parámetros o condiciones que favorecen la degradación son difícilmente controlados
- ☒ Puede acarrear otros problemas ambientales: emisión de componentes orgánicos volátiles, riesgo de contaminación de acuíferos por lixiviados que pueden contener HCs, fenoles y metales pesados.

**4.2.1. Casos de aplicación:** A continuación, se muestran algunos casos de ejemplos en los que fue aplicado el Landfarming.

- K. Torres<sup>8</sup> investigó que en los campos Castilla y Chichimene, ubicados en el bloque Cubarral, en el departamento del Meta, Colombia; se utilizó landfarming como mecanismo de disposición de sus residuos aceitosos los cuales son producidos en el tratamiento de crudo (borras de tanques, lodos de piscinas) al igual que en actividades de limpieza y mantenimiento de las facilidades.

Inicialmente se realizaba la disposición en el sitio de almacenamiento “La Vara” donde los residuos eran transportados en camiones de vacío y eran almacenados en una primera área en 3 “frack tanks”, luego de algunos procesos de separación, se disponían para la biorremediación en 3 piscinas del mismo sitio, sin embargo estas fueron clausuradas por Cormacarena debido al incumplimiento de parámetros en su funcionamiento, y actualmente los residuos son tratados por terceros en el predio El Palmar, ubicado en Flandes, Tolima, donde se realiza Landfarming, o a la planta de LMP – TCC (liquid Mud Plant-Thermo-Mechanical Cuttings cleaner) de la empresa Halliburton en Yopal.

- R.F. Hejazi et. al<sup>9</sup> compararon la eficiencia de 3 parámetros operativos- labranza, adición de agua y adición de nutrientes- en un tratamiento de 12 meses de un oily sludge bajo condiciones áridas y encontraron que la labranza es el parámetro principal responsable de alcanzar la máxima remoción de HC (76%).

---

<sup>8</sup> TORRES CERVERA, Karina. Análisis de los impactos ambientales generados por el tratamiento y disposición final de los residuos aceitosos (borras) generados en los distritos de producción de hidrocarburos. Monografía Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 2014.

<sup>9</sup> R.F. Hejazi, T. Husain, Landfarming performance under arid conditions. Evaluation of parameters, Environ. Sci. Technol. 38 (2004).

- S. Mishra et. al<sup>10</sup> combinaron la bioaugmentación (introducir bacterias diferentes) y la bioestimulación (adición de nutrientes y agua) y los resultados indicaron que hasta el 90.2% de los HCs pueden ser degradados en 120 días en los bloques donde se introdujo bacterias extrañas y se añadieron nutrientes y agua, mientras que el bloque de control solo mostró una degradación del 16.8%.

### 4.3. LANDFILL

El diseño del sistema depende exclusivamente de las funciones, puede variar desde un sistema de una capa vegetal a un complejo sistema multicapa con material sintético. Generalmente los sistemas más simples son usados en climas secos y los complejos en climas húmedos, sin embargo, se sugiere basarse en el subtítulo C del RCRA (*the Resource Conservation and Recovery Act*), que establece un programa federal para el manejo de residuos peligrosos, como los producidos en la industria petrolera. El objetivo de este programa es asegurar el manejo de forma que se protejan la salud humana y el ambiente.

Para un correcto diseño se deben basar en las observaciones de que en algunos casos del landfarming, la mayor parte de la degradación venía de la evaporación y no de la descomposición en los suelos (especialmente en climas áridos) y de las afectaciones que puede llevar al ambiente. El landfill aísla los desechos del aire y los acuíferos utilizando gruesas capas impermeables de arcilla y metal, también tienen un sistema de recolección de lixiviados en el fondo. Este sistema es popular y desarrollado en países como USA, UK, Canadá, Alemania y puede solucionar eficientemente los problemas ambientales asociados al landfarming, aunque con costos mucho más elevados.

---

<sup>10</sup> S. Mishra, J. Jyot, R.C. Kuhad, B. Lal, In situ bioremediation potential of an oily sludge-degrading bacterial consortium, *Curr. Microbiol.* 43 (2001)

#### **4.4. BIOPILAS/COMPOSTAJE**

Es un proceso biológico anaeróbico que convierte materia orgánica en un material más estable con un contenido menor de materia orgánica degradable, dando así lugar a una menor fitotoxicidad hacia las plantas. El compostaje se ha practicado para reducir el volumen y el contenido de agua de la materia prima, destruir patógenos y los componentes sulfurosos y nitrogenados que generan olores.

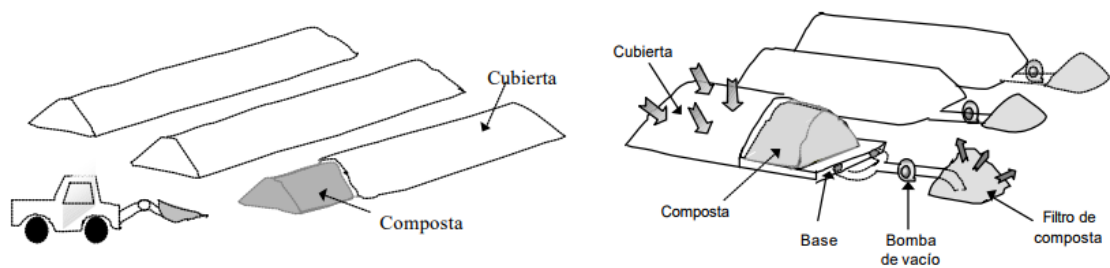
El compostaje de residuos petroleros ha recibido mayor atención como un sustituto del landfarming, puesto que éste último normalmente requiere grandes áreas de suelo. Se refiere a biopilas, a la conversión de material de desecho en pilas usualmente de 2-4 m de altura, por degradación por micro organismos endógenos y exógenos.

La elección del tipo de sistema de biopilas depende principalmente de las condiciones climáticas y de la composición de compuestos orgánicos volátiles presentes en el suelo contaminado. Generalmente las biopilas se diseñan como sistemas cerrados, ya que éstas permiten mantener la temperatura y evitar la saturación de agua debido a lluvias, además de disminuir la evaporación de agua y de compuestos orgánicos volátiles. La eficiencia del biotratamiento puede ser mejorada ajustando la humedad, con bombeo de aire, y la adición de agentes de volumen y nutrientes. Entre estos agentes se incluyen paja, aserrín y astillas de madera, u otro material orgánico. La adición de los agentes de volumen da resultado a un aumento de la porosidad en las biopilas de residuos, conllevando a mejorar la distribución de aire y humedad en la matriz. Esta tecnología es llamada como compostaje, si material orgánico es añadido.

La tasa de biodegradación puede ser mejorada con la manipulación de un número de parámetros operativos tales como: controlar las tasas de carbón, nitrógeno y fósforo; bombeo de aire o movimiento de la tierra (labranza) para mejorar la aireación y, control sobre los valores de humedad y temperatura para mantener una alta actividad microbiana.

Dos de los sistemas de biopilas más empleados para el tratamiento de suelos contaminados, son las biopilas alargadas (Figura 7, derecha) y las biopilas estáticas (Figura 7, izquierda). La diferencia entre ambas tecnologías radica en el método de aireación que se emplea para proveer de oxígeno el proceso de composteo. En los sistemas estáticos, el material a compostear se airea por inyección (sopladores) o extracción (bombas de vacío) a través de tuberías perforadas, colocadas debajo de las pilas. En estos sistemas, la aireación implica aireación forzada a través del suelo por inyección o extracción a través de tuberías perforadas. En el caso de las biopilas alargadas, el material es mezclado periódicamente con el uso de un equipo móvil (tractores o máquinas diseñadas especialmente para este fin), este tipo de biopilas se considera actualmente como la alternativa más económica de composteo<sup>11</sup>.

Figura 7. Derecha, Representación esquemática de un sistema de biopilas alargadas. Izquierda, Representación esquemática de un sistema aireado de biopilas estáticas.



Fuente: VOLKE SEPÚLVEDA, Tania Lorena. Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo. [Proyecto de investigación]. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Noviembre 2003, pp. 1-30.

Adicionalmente, este tratamiento es ambientalmente amigable ya que el compostaje puede ser conducido en tanques de tratamiento y las emisiones de

<sup>11</sup> <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/composteo2003>

VOCs pueden ser controladas con unidades de colección auxiliares. También es muy fácil de diseñar e implementar, y puede ser diseñado para acoplarse a diferentes condiciones. Sin embargo, la capacidad del tratamiento es mucho menor que la del *landfarming* y todavía requiere un área relativamente grande y un tiempo relativamente largo para la degradación de las borras.

**4.4.1. Casos de aplicación:** A continuación, se muestran algunos casos de ejemplos en los que fue aplicado el Biocompostaje.

- Ouyang et al. [202] investigaron los efectos de la bioaumentación en el compostaje de las borras, y encontraron que el contenido de TPH disminuye hasta 46-53% en las pilas después de 56 días de tratamiento, pero solo decrecen hasta 31% en el control de las pilas.
- Kriipsalu et al. [203] reportó la biodegradación aeróbica de borras de refinerías en pilas compostadas con 4 diferentes arreglos, y los resultados mostraron que después de 373 días de tratamiento, la reducción de TPH fue 62%, 51%, 74% y 49% en las pilas con compostaje de arena, aceite maduro, residuos de cocina, y desechos de madera residual respectivamente, comparado con *landfarming*, biopilas/compostaje es capaz de presentar mayor eficiencia de remoción de HC en borras y puede tratar más componentes tóxicos desde que se creen condiciones controladas más favorecidas de biodegradación. Otra notable característica de las biopilas/compostaje es que la temperatura en las pilas puede aumentar hasta 70°C o más debido al calentamiento generado por la intensa actividad microbiana, y la aplicación de este método bajo extremas condiciones climáticas.

#### **4.5. BIO-SLURRY**

Esta tecnología mezcla los sólidos asociados al *sludge* con agua (i.e 5-50% w/v) y disuelve contaminantes en una fase acuosa para obtener una mayor cantidad de contaminantes solubilizados. La degradación microbiana puede entonces

transformar los contaminantes a intermediarios menos tóxicos (ácidos orgánicos y aldehídos) o productos finales de dióxido de carbono y agua. La degradación de la fase *slurry* usualmente ocurre en biorreactores diseñados donde el contacto entre los microorganismos, HCs, nutrientes y oxígeno, puede ser maximizado.

La degradación mediante *bio-slurry* es un rápido y efectivo enfoque a la disposición final de borras, las cuales pueden ser descontaminadas en gran porcentaje dentro de un periodo corto de tiempo.

#### Ventajas

- ✓ Pequeña área de suelo
- ✓ Biodegradación rápida
- ✓ Alta tasa de remoción de hidrocarburos

#### Desventajas

- ☒ Elevados costos, debido a los siguientes pre o post tratamientos:
- ☒ Pueden ser mezclas arcillosas y no homogéneas, lo que conlleva a pre tratamientos y causal de problemas operacionales
- ☒ Durante los procesos del tratamiento, puede haber volatilidad de gases lo que podría requerir otro tratamiento
- ☒ Es necesaria deshidratación

**4.5.1. Casos de aplicación:** A continuación, se muestran algunos casos de ejemplos en los que fue sido aplicado el Bioslurry.

- Ward et al. [31] investigaron que la biodegradación de las borras (*oily sludge*) en fase *slurry* con una concentración de borras entre el 1.55-12.8%, encontraron que la degradación de los TPH (*Total petroleum hydrocarbons*) estuvo en el rango de 80-99% entre 10-12 días usando tres tipos diferentes de consorcios microbianos productores de biosurfactante.

- Maga et al. [210] reportaron que un SBR (*Sequencing batch reactor*) de 10000 galones fue usado en la degradación in-situ de borras, y los microorganismos degradaron los hidrocarburos en las borras desde concentraciones de 20000 ppm a menos de 100 ppm durante dos semanas de tratamiento.

## **5. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS ACEITOSOS**

Teniendo en cuenta la importancia del correcto tratamiento y disposición que requieren los desechos aceitosos producidos en la industria petrolera, a su carácter como residuos altamente peligrosos y a la falta de reglamentación por parte del gobierno colombiano, surge la necesidad de elaborar una herramienta, llamada C&P, que facilite la toma de decisiones respecto a cuál sería el tratamiento más adecuado teniendo en cuenta determinados parámetros que se han fijado basado en referencias bibliográficas y consulta con expertos.

### **5.1. ANÁLISIS MULTICRITERIO**

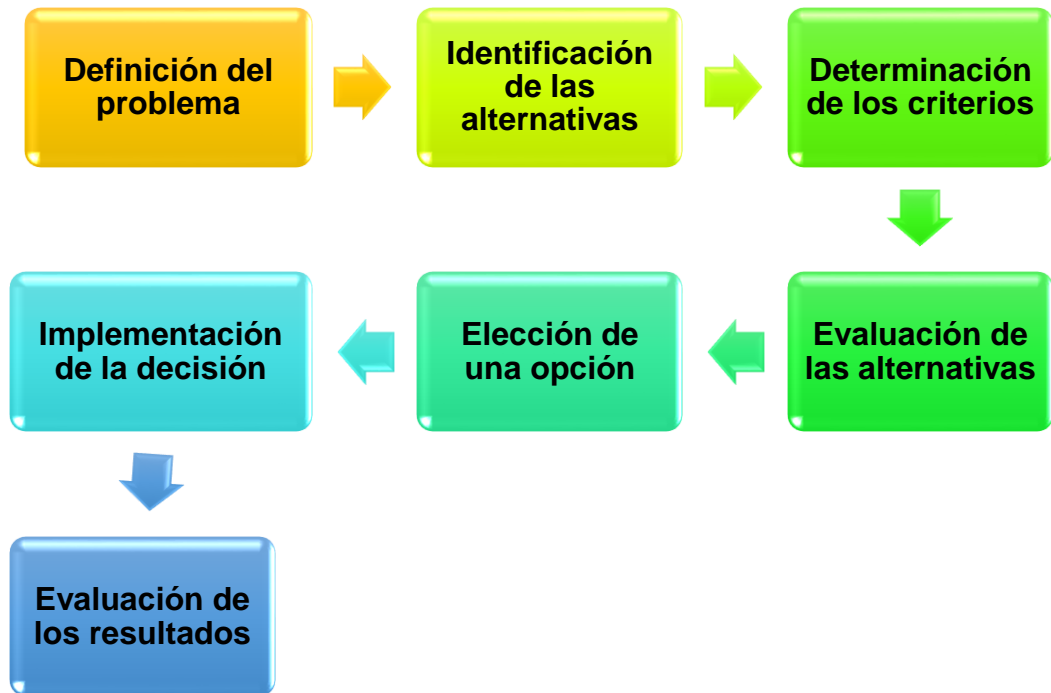
El análisis o evaluación multicriterio se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión, el cual se basa en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva o negativa sobre el objeto de decisión.

El análisis multicriterio es un método se ha implementado comúnmente cuando se tiene un problema donde existen al menos 2 criterios en conflicto y más de una alternativa de solución, y que pretende identificar o determinar la mejor solución considerando simultáneamente múltiples criterios en competencia.

Este método simplifica situaciones complejas y permite avanzar paso a paso hacia la búsqueda de una solución a un problema determinado, teniendo en cuenta algunos criterios.

Este es el proceso a seguir en la resolución de problemas usando análisis multicriterio.

Figura 8. Proceso toma de decisiones.



Fuente: PEREZ, A. La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación, curso Máster en Edificación Especialidad Gestión curso. 2012-2013.

La herramienta de análisis multicriterio puede ser complementada con otras herramientas según las necesidades particulares de cada situación, entre estas se encuentra el panel de expertos, los cuales toman participación en las ponderaciones.

## 5.2. EXPLICACIÓN DEL MÉTODO

Los métodos de análisis multicriterio se pueden clasificar según el número de alternativas a tener en cuenta en la decisión.

Cuando las funciones objetivo toman un número infinito de valores distintos, que conducen a un número infinito de alternativas posibles del problema se llama métodos de análisis multicriterio multi-objetivo y, cuando las alternativas de

decisión son finitas se denominan problemas de métodos de análisis multicriterio discreto (MAMD), los cuales son más comunes en la realidad y los considerados para el desarrollo de la herramienta.

Algunos de los métodos que se utilizan en los casos de MAMD son: Ponderación lineal (Scoring), utilidad multiatributo (MAUT), relaciones de superación y el proceso analítico jerárquico (AHP- Analytic Hierarchy Process)<sup>12</sup>.

Después de realizar un análisis de los diferentes métodos y las características propias de la problemática tratada, se optó por el uso de Ponderación lineal o Scoring. A continuación, se explicará detalladamente el método seleccionado para el desarrollo de este proyecto de grado.

**5.2.1. Ponderación lineal (scoring)<sup>13</sup>** : Es una manera rápida y sencilla para identificar la alternativa preferible en un problema de decisión multicriterio, ya que aborda situaciones de incertidumbre con pocos niveles de información donde se construye una función de valor para cada una de las alternativas.

La respuesta está basada en las preferencias o la comparabilidad del ejecutor, por lo cual es un método manipulable que depende del valor de importancia dado a cada criterio.

Las etapas del método son las siguientes:

1. Identificar la meta general del problema y las alternativas
2. Listar los criterios a emplear en la toma de decisión
3. Asignar una ponderación para cada uno de los criterios

---

<sup>12</sup> HURTADO, T., BRUNO, G. El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisión en la selección de proveedores. Tesis. UNMSM.

<sup>13</sup> ROEVIS L. <<ponderación lineal (scoring)>> [En línea]. Disponible en:<http://unisistemasoptimo.blogspot.com.co/2012/05/ponderacion-lineal-scoring.html>

4. Establecer en cuanto satisface cada alternativa a nivel de cada uno de los criterios
5. Calcular el puntaje para cada una de las alternativas
6. La alternativa con el puntaje más alto representa la alternativa a recomendar

$$P_j = \sum_i W_i R_{ij} \quad \text{Ecuación 1. Ponderación lineal}$$

Donde:

$R_{ij}$  = rating de la alternativa j en función del criterio i

$W_i$  = Ponderación para criterio i

$P_j$  = puntaje para la alternativa j

### **5.3. SELECCIÓN DE CRITERIOS Y SISTEMAS DE PONDERACIÓN**

Para el desarrollo de la herramienta C&P se establecieron tres parámetros considerados fundamentales que influyen directamente en la viabilidad y selección del método de disposición final de los residuos aceitosos. Los parámetros establecidos son ambientales, operaciones y económicos, y a su vez, estos están divididos en criterios, los cuales fueron seleccionados en base a la revisión bibliográfica realizada.

**5.3.1. Parámetros ambientales:** El aspecto ambiental asociado a cada metodología de disposición afectará directamente la percepción social sobre la operación que se realiza en la zona; por esto, se debe buscar realizar las operaciones con el menor impacto ambiental posible. Los aspectos ambientales asociados a la disposición de residuos se basaron principalmente en la Resolución 2309 del 24 de febrero de 1986 y son:

- Emisión de volátiles: Emisión de componentes livianos y demás contaminantes a la atmósfera.
- Ecosistema: Afectación sobre el ecosistema presente en el lugar de la disposición, como flora y fauna.
- Contaminación de aguas: Riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.
- Presencia de comunidades: Impacto social sobre las comunidades cercanas, como el efecto que puede tener sobre la salud de sus habitantes.
- Consumo de Energía: Energía total requerida para cada método.
- Suelo: Impacto sobre el suelo donde se depositan los residuos y efectos secundarios sobre estos.

**5.3.2. Parámetros operacionales:** Dentro de estos factores, se considera como los más relevantes el área disponible para tratar los residuos y el volumen de estos, ya que como se ha mencionado anteriormente, los volúmenes producidos son bastante considerables y van aumentando a medida del tiempo, convirtiendo la capacidad de tratamiento en una limitante en cada método, adicionalmente se encuentran otros criterios citados a continuación.

- Área disponible: Hace referencia al espacio de las locaciones necesarias o disponibles para cada método de disposición, es decir el parámetro que afecta directamente la capacidad de tratamiento o almacenamiento.
- Tipo de crudo/Contaminantes: Hace referencia al tipo de crudo del cual proviene el residuo aceitoso a tratar, presencia de contaminantes (halógenos, grupos nitro, metilo) teniendo en cuenta cualquier tratamiento que se le haya

realizado y que pueda afectar sus contaminantes finales, como adición de químicos entre otros, que pueden ser tóxicos para los microorganismos que realizan la biodegradación e inhiben su crecimiento.

- Volumen a tratar: Hace referencia al volumen total de residuo aceitoso; dicho residuo es el volumen resultante de tomar la borra o sólido aceitoso y realizarle los procedimientos necesarios para la extracción del HC, hasta reducirlo al mínimo volumen posible con HC no recuperable.
- Topografía: Hace referencia a la topografía del terreno que se tiene para la disposición final del residuo, este parámetro afectará la viabilidad de los diferentes métodos disponibles.
- Climatología: Hace referencia a las condiciones climáticas presentes en el sitio de disposición: temperatura ambiente, radiación solar, niveles de pluviosidad y nubosidad, humedad del ambiente, entre otros.
- Tiempo: Hace alusión al tiempo que tarda el tratamiento en alcanzar la máxima tasa de degradación posible.

**5.3.3 Parámetros económicos:** Los factores económicos serán determinantes en la viabilidad del proyecto; el manejo de residuos aceitosos en grandes volúmenes requiere de diferentes métodos y estrategias que a su vez tienen costos asociados. A continuación, se detallan los parámetros tomados en cuenta para el cálculo de costos de cada tratamiento.

- Landfarming:
  - Estudio de suelos
  - Adecuación del terreno (excavación)
  - Costo por metro cúbico
- Landfill
  - Adecuación del terreno
  - Costo por metro cúbico
- Compostaje/Biopilas
  - Procesamiento por metro cúbico

Compostaje por metro cúbico

- Bioslurry

Costo biorreactor

Costo por metro cúbico

#### 5.4. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN

La herramienta se encuentra dividida en diferentes secciones mostradas en la figura 9 y explicadas posteriormente.

Figura 9. Esquema operacional de las secciones de la herramienta.



En primer lugar, se ingresan los datos del campo y la zona a la herramienta, adicionalmente se responden una serie de preguntas con el fin de asignar un puntaje a cada variable para cada método de disposición. Esta puntuación se

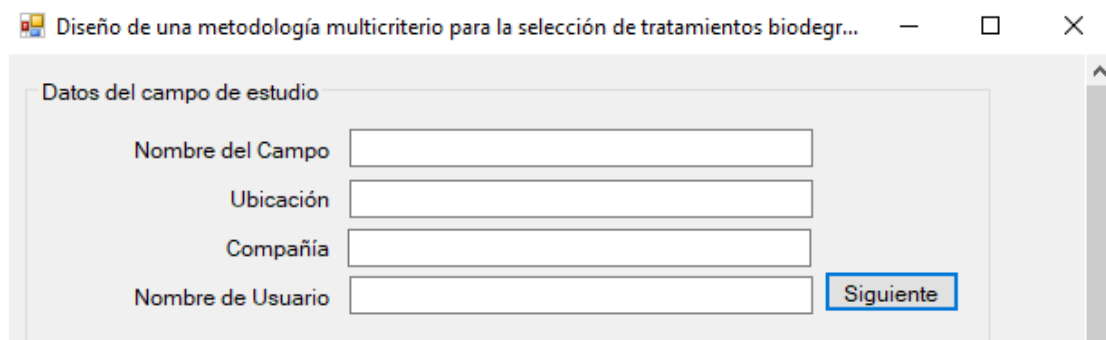
basa en consideraciones realizadas a partir de la bibliografía revisada anteriormente y avalada por expertos.

Luego para cada parámetro, la herramienta realiza una ponderación a partir del producto obtenido y la importancia de cada criterio y, de esta forma se obtiene un resultado parcial para cada método de disposición de estas secciones.

Una vez terminada la etapa de evaluación, se consolida la ponderación y se muestra el método de disposición con mayor puntuación, es decir, el método que mejor se adapta a las condiciones inicialmente dadas por el usuario.

**5.4.1. Sección 1. Ingreso Información:** Con el fin de obtener la información necesaria y que permita tener una referencia más completa del campo, al inicio de la herramienta, el usuario ingresa manualmente los datos respondiendo unas preguntas preestablecidas.

Figura 10. Registro de datos iniciales - Sección 1.



The image shows a screenshot of a software application window. The title bar reads "Diseño de una metodología multicriterio para la selección de tratamientos biodegr...". The main content area is titled "Datos del campo de estudio" and contains four text input fields stacked vertically, labeled "Nombre del Campo", "Ubicación", "Compañía", and "Nombre de Usuario". To the right of the "Nombre de Usuario" field is a blue button labeled "Siguiete".

Dentro de la información general del campo se encuentran preguntas como el nombre del campo, la ubicación, la compañía operadora y el nombre del usuario u operario que está realizando el registro.

**5.4.2. Sección 2. Parámetros ambientales:** Para los parámetros ambientales se realizaron encuestas (Anexo A) a diferentes expertos en el tema, con el fin de determinar que tanta importancia consideran tiene cada criterio y a su vez, que tanto impacto genera en cada uno de los tratamientos.

La escala de evaluación de estos criterios se realiza de forma cualitativa. Luego, estos resultados son llevados a una escala numérica, con el fin de poder puntuar y comparar los diferentes métodos, como se muestra a continuación.

Cuadro 7. Conversión de escala cualitativa a cuantitativa de parámetros ambientales

<b>Escala cualitativa</b>	<b>Escala numérica</b>
<b>A: Alto impacto</b>	1
<b>B: Bajo impacto</b>	3
<b>N: No tiene impacto</b>	5

Una vez los resultados se encuentran de forma numérica se multiplican por la importancia dada a cada criterio por cada experto, para así obtener el puntaje para cada método dado de forma individual.

Una vez se tengan los datos se procede a ponderar todos los resultados obtenidos con el fin de obtener el puntaje correspondiente para cada tratamiento de disposición final.

Figura 11. Ponderación final de parámetros ambientales.

Parámetro	PONDERACIÓN				
	Imp. Criterio	Landfarming	Landfill	Compostaje	Bioslurry
Emisión de volátiles	59	2.50	3.00	3.50	3.50
Ecosistema	80	2.00	1.50	3.00	4.00
Contaminación aguas	93	2.00	2.00	2.50	3.00
Presencia comunidades	90	2.50	3.50	4.00	4.00
Consumo energía	31	4.50	4.50	4.00	2.50
Suelo	80	2.00	1.50	2.50	4.00
<b>TOTAL</b>		<b>1.696</b>	<b>1.761</b>	<b>2.270</b>	<b>2.602</b>

**5.4.3. Sección 3. Parámetros operacionales:** Para los criterios que hacen parte de este parámetro, se hicieron una serie de consideraciones y escenarios basados en la revisión bibliografía, siendo estos escenarios categorizados como: altamente favorable, favorable y desfavorable, los cuales, posteriormente, los validaron los expertos encuestados. Este cuadro se evidencia en el anexo B.

Para cada criterio, en cada uno de los métodos de disposición, con los que se determina la viabilidad operacional para ubicar el caso puntual que se está tratando, el usuario debe responder algunas preguntas con única respuesta.

Figura 12. Registro de datos operacionales – Sección 3.

The image shows a web form titled "Datos operacionales". It contains four dropdown menus for selection: "Disponibilidad de Terreno", "Tipo de crudo Fuente", "Volumen a tratar", and "Topografía". To the right of these dropdowns are two buttons: "Atrás" and "Siguiete".

Y al igual que los parámetros ambientales, cada escenario representa un valor numérico, con el que se puede estandarizar y comparar equitativamente.

Cuadro 8. Conversión de escala cualitativa a cuantitativa de parámetros operacionales.

Escala cualitativa	Escala numérica
<b>AF: Altamente favorable</b>	5
<b>F: Favorable</b>	3
<b>D: Desfavorable</b>	1

Seguidamente, se procede a multiplicar los resultados por la importancia que fue dada por los expertos para cada criterio mediante una encuesta (Anexo C) y por último se realiza la ponderación final.

**5.4.4 Sección 4. Parámetros económicos:** Al igual que los demás parámetros, es fundamental comparar económicamente los métodos entre sí, para esto es necesario identificar los costos asociados a cada método de disposición para estimar la diferencia de un método a otro. Los costos más importantes y tenidos en cuenta según sea necesario para cada tratamiento, son:

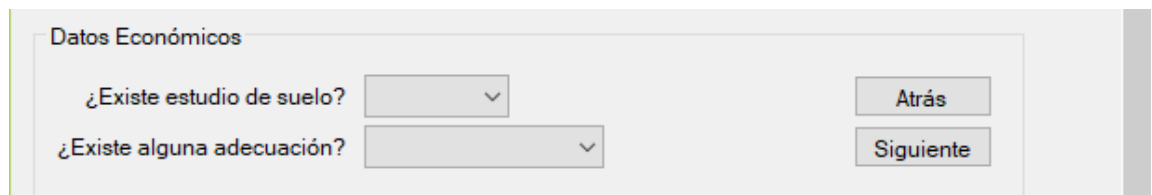
- Estudios de laboratorios requeridos
- Pruebas pilotos
- Costos de facilidades requeridas (Biorreactor, geomembranas, entre otras)
- Costo de tratamiento por metro cubico

Los costos la herramienta están basados en una serie de valores de referencia de Estados Unidos, tomados de “*Federal remediation technologies Roundtable*” (FRTR), establecido en 1990, con el fin de trabajar para crear un ambiente de colaboración entre las agencias federales involucradas en el tratamiento de

desechos peligrosos junto con los principales gerentes de programas de limpieza federales y representantes comunitarios de remediación. Algunos de los miembros incluyen: El departamento de defensa, El departamento de energía, El departamento de interior, La agencia de protección ambiental (todas estas organizaciones del gobierno de Estados Unidos).

Con el fin de conocer cuáles de estos costos estarán asociados se realizan algunas preguntas adicionales.

Figura 13. Registro de datos económicos – Sección 4.



The image shows a screenshot of a web form titled "Datos Económicos". It contains two dropdown menus. The first dropdown menu is labeled "¿Existe estudio de suelo?" and the second is labeled "¿Existe alguna adecuación?". To the right of the first dropdown menu is a button labeled "Atrás", and to the right of the second dropdown menu is a button labeled "Siguiete".

Luego de totalizar los costos, estos resultados se normalizan con el fin de tener todos los valores en la misma escala.

$$N1 = E1 / (E1 + E2 + E3 + E4)$$

Donde N es el valor normalizado para el primer método de disposición, y E representa el valor de cada uno de los métodos.

Después de tener el valor normalizado, este se lleva a la misma escala de ponderación basada en la favorabilidad de cada método, este valor puede estar entre 0 y 1, el menor valor representa el método con menor costo, es decir, a medida que el valor normalizado se acerque a cero, mejor será su favorabilidad. Y se igualan a los anteriores parámetros de la siguiente manera:

Cuadro 9. Conversión de valores en los parámetros económicos.

Valor normalizado	Escala numérica
Mayor valor (cercano a 1)	1
Valores intermedios	3
Menor valor (cercano a 0)	5

**5.4.5. Sección 5. Importancia de los parámetros:** La última sección de la herramienta se basa en conocer la importancia que el usuario desea darle a cada parámetro en específico, esto con el fin de dar una respuesta más acertada a sus preferencia y necesidades. Simplemente es necesario ingresar los valores teniendo en cuenta que entre los tres deben sumar 100%, sin embargo, si el usuario ingresa los datos en alguna otra escala, se encuentra la herramienta de normalizar, para que todos los datos tomen sus valores correspondientes de forma equitativa.

Figura 14. Registro de porcentajes dados por el usuario – Sección 5.

Datos de ponderación

Aspectos Ambientales (%)

Aspectos Operacionales

Aspectos Económicos (%)

*La suma de los 3 aspectos debe ser igual a 100. En caso de requerir, puede normalizar la suma dando click en el botón correspondiente*

**5.4.6. Sección 6. Módulo de respuesta:** Finalmente, para obtener la respuesta de la herramienta multicriterio, se toman los valores finales de cada sección y se multiplican por la importancia ingresada por el usuario. El método que arroje el software será el que obtenga un mayor puntaje, esto quiere decir que es el que mejor se acopla a las condiciones que se tienen como a las preferencias del usuario u operador.

## 6. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta la importancia e impacto de los residuos aceitosos, es necesario tener un conocimiento completo y adecuado de estos y de los diferentes mecanismos de disposición, con el fin de contar con las herramientas necesarias para su correcto manejo.
- Se evidencio la falta de normatividad nacional de manera más específica para el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos, así como la escasez de conocimiento y apropiación del tema por parte de expertos de la industria.
- La herramienta desarrollada presenta una forma sencilla e interesante para seleccionar el método de disposición más adecuado de los residuos aceitosos, a partir de información básica, sencilla pero fundamental, integrando factores ambientales, operacionales y económicos, que se desarrollaron a partir de la recopilación, investigación y análisis de las diferentes opciones que han sido aplicadas.
- Es importante resaltar que la herramienta C&P ofrece una orientación para la selección del método de disposición final de residuos aceitosos, sin embargo, no debe ser tomada como ultimátum; es decir, fue creada con la intención de ser un soporte y facilitar la toma de decisiones, y su resultado deber ser analizado y avalado por expertos para verificar su coherencia.
- Aunque se conocen mecanismos muy eficientes de disposición, no sólo biodegradables, si no químicos y térmicos también, ninguno de ellos se puede considerar como panacea, pues siempre es necesario la adición de uno o más de los métodos para cumplir a cabalidad la cadena de gestión que finalice en un producto reducido al máximo sin ningún tipo de impacto al ambiente.

## 7. RECOMENDACIONES

- Se requiere implementar una reglamentación clara y concreta y a su vez, incrementar y reforzar el estricto seguimiento y vigilancia de los procesos que generen este tipo de residuos, para asegurar el correcto uso y disposición de los mismos dentro de los parámetros adecuados desde el inicio hasta el final de cada proyecto.
- Es necesario capacitar a los profesionales, no sólo los encargados del área ambiental, si no todos aquellos implicados en la toma de decisiones a lo largo de los procesos de la industria, haciendo énfasis en la importancia e impacto de todos los residuos generados.
- Se recomienda seguir investigando en el tema para cubrir falencias que todavía ningún método lograr tratar de forma completa y efectiva, como los metales pesados y crudos extra-pesados.
- Se recomienda la imposición de multas implacables y contundentes, proporcionalmente mayor a los costos de tratamientos de disposición, para que las empresas se inclinen por el tratamiento y disposición final de los residuos de la manera adecuada, en lugar de pagar las multas laxas que se cobran hoy en día (figura 15).
- Así como es importante el tratamiento y disposición de los residuos líquidos, es de vital importancia prestar atención a los residuos sólidos, ya que representa un porcentaje mayor de residuos generados (figura 16).

Figura 15. Comparación de imposición de multas.

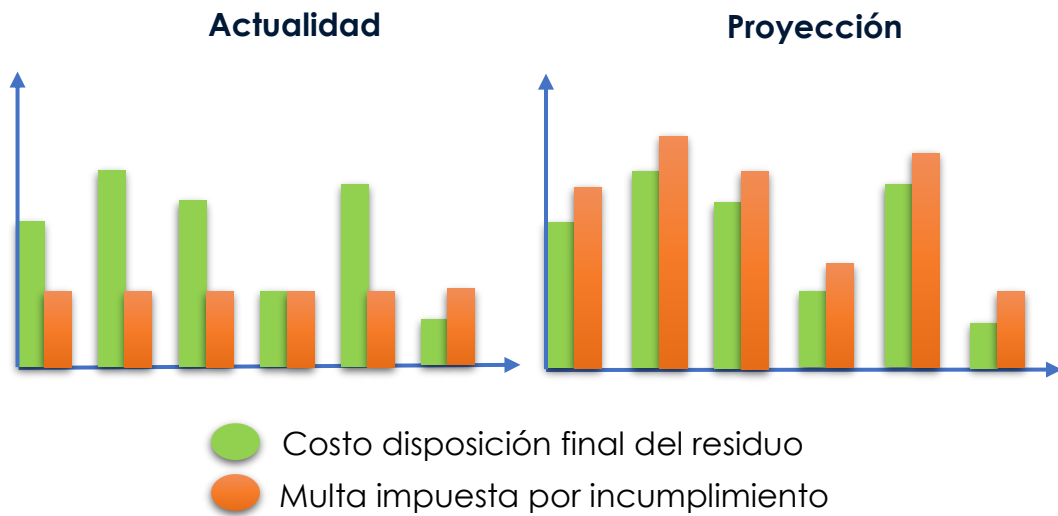
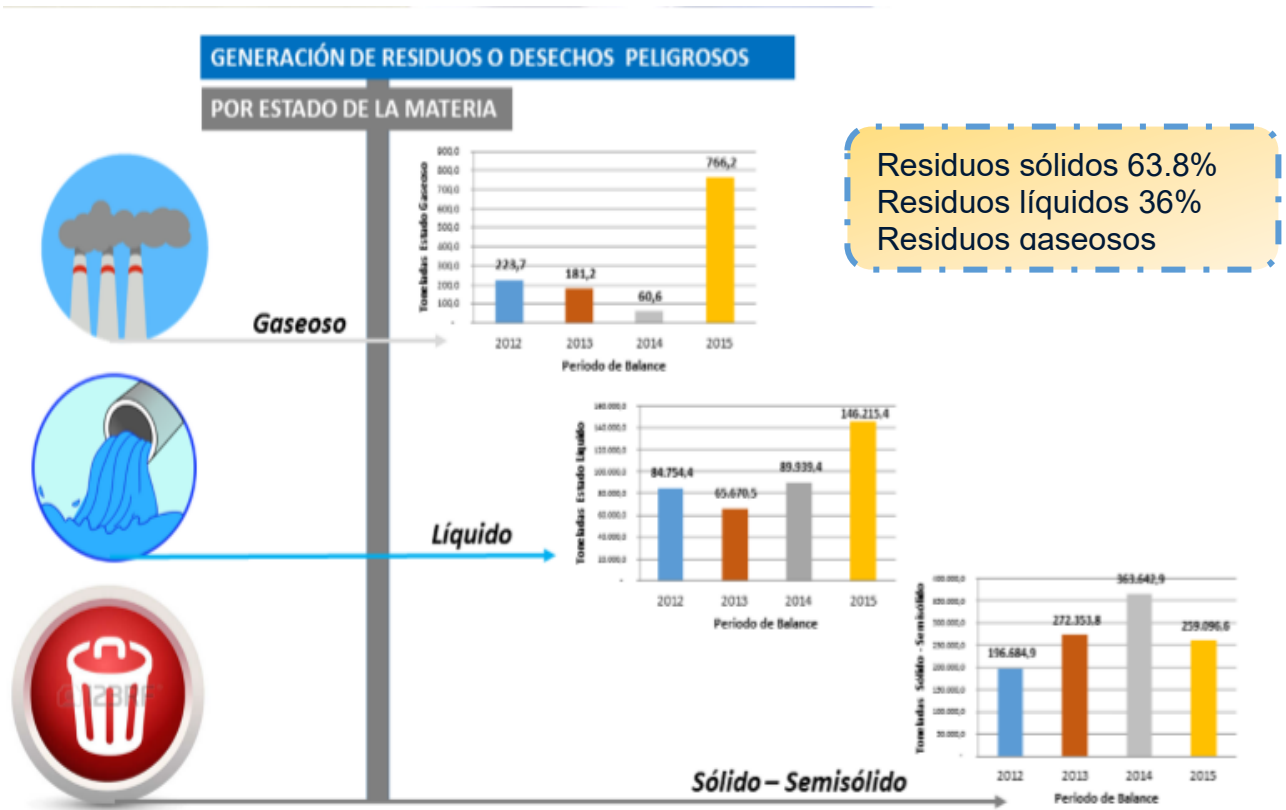


Figura 16. Cantidad de residuos peligrosos generados por estado de la materia, en el periodo 2012-2015.



Fuente: IDEAM, Informe Nacional - Generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia, 2014-2015. Bogotá, D. C., 2015. 22 p.

## BIBLIOGRAFIA

“Colombia está inundada de residuos peligrosos” [En línea]. En: Semana Sostenible. Marzo 07, 2017. (Recuperado en 10 de junio de 2017). Disponible en: <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/residuos-peligrosos-en-colombia-un-grave-problema/37263>

ECOPETROL S.A. Método para la fluidización de borras y recuperación de hidrocarburos de tanques de almacenamiento de hidrocarburos. Inventores: OLAYA, Humberto, *et al.* Fecha de publicación del documento. Fecha de solicitud: 1 de diciembre de 2008. Colombia, patente de investigación. WO2009068993A1. 4 de junio de 2009. Disponible en <https://www.google.com/patents/WO2009068993A1?cl=es>

ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY. Best Practice Note: Landfarming. ISBN 978 1 74359 607 4. EPA, april, 2014. Disponible en: <http://www.epa.nsw.gov.au/resources/clm/140323landfarmbpn.pdf>

ESTADOS UNIDOS. Code of Federal Regulations. . Chapter I - Environmental Protection Agency. Subchapter I - Solid Wastes. Title 40 - Protection of Environment. Part 261 - Identification and listing of hazardous waste. 261.31 - Hazardous wastes from non-specific sources. (01, julio, 2012). Disponible en <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2012-title40-vol27/xml/CFR-2012-title40-vol27-part261.xml#seqnum261.32>

ESTADOS UNIDOS. Estado de Louisiana. Norma Louisiana, departamento de recursos naturales. Departamento administrativo del Estado. Junio de 2010. Disponible en: [http://www.dnr.louisiana.gov/assets/OC/43XIX\\_June2010.pdf](http://www.dnr.louisiana.gov/assets/OC/43XIX_June2010.pdf)

FERRERA-CERRATO, Ronald, *et al.* Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. Agosto de 2006. Revista *Latinoam Microbiología* 2006; 48 (2): 179-

187. (Recuperado en 13 de mayo de 2017). Disponible en: <http://www.medigraphic.com/pdfs/lamico/mi-2006/mi062s.pdf>

HU Guangji, LI Jianbing y ZENG Guangming. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review. En: Journal of Hazardous Materials, ELSEVIER. 2013. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389413005487>

IDEAM, Informe Nacional - Generación y manejo de residuos o desechos peligrosos en Colombia 2013 [En línea]. Bogotá, D. C., 2015. 80 p. Disponible en [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022967/informenacional\\_generacionmanejo\\_respel2013.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022967/informenacional_generacionmanejo_respel2013.pdf)

IDEAM, Informe Nacional Generación y Manejo de residuos o desechos Peligrosos en Colombia 2014 y 2015 [En línea]. Bogotá, D.C., 2016. 96 p. Disponible en:

<http://www.andi.com.co/Ambiental/Documents/Informe%20Nacional%20de%20Residuos%20Peligrosos%20%202014%202015.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE PETROLEOS (ICP). Tendencias de biorremediación para la industria petrolera. [Diapositivas]. Sf. 82 diapositivas, color. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxi.pdf>

MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE EN COLOMBIA. Sistema de información ambiental de Colombia (SIAME). Bogotá, D.C. Calidad del aire Cía Ltda, 1999, pp. 217. Disponible en:

[http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/HIDROCARBUROS/Gu%C3%ADa%20de%20manejo%20Ambiental%20para%20proyectos%20de%20Perforaci%C3%B3n%20de%20Pozos%20de%20petr%C3%B3leo%20y%20gas.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/HIDROCARBUROS/Gu%C3%ADa%20de%20manejo%20Ambiental%20para%20proyectos%20de%20Perforaci%C3%B3n%20de%20Pozos%20de%20petr%C3%B3leo%20y%20gas.pdf)

PNUMA. Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. [Convenio de Basilea]. Marzo 22 de 1989. Disponible

en:

<http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-s.pdf>

REMEDATION TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX AND REFERENCE GUIDE. [Datos gubernamentales]. Disponible en:

<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-42.html>

SUÁREZ HERNÁNDEZ, Lina. Desarrollo de un método químico para recuperación de crudo a partir de las borras generadas en los procesos de mantenimiento de tanques y tuberías en distritos de producción petroleros de Colombia. Monografía Magister en Ingeniería Ambiental. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2011.

TORRES CERVERA, Karina. Análisis de los impactos ambientales generados por el tratamiento y disposición final de los residuos aceitosos (borras) generados en los distritos de producción de hidrocarburos. Monografía Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas. Instituto de Estudios Ambientales, 2014.

VARGAS GALLEGOS, Paola Andrea; CUELLAR, René y DUSSAN, Jeny. Biorremediación de residuos del petróleo. Diciembre de 2004. Revista *Hipótesis sobre Apuntes Científicos*, Uniandinos, Vol.2, n (4), 42-49. (Recuperado en 15 de junio de 2017). Disponible en:

<http://hipotesis.uniandes.edu.co/hipotesis/images/stories/ed04pdf/Biorremediacion.pdf>

VOLKE SEPÚLVEDA, Tania Lorena. Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo. [Proyecto de investigación]. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Noviembre 2003, pp. 1-30. Disponible en:

<http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcnica/composteo2003>

REMEDATION TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX AND REFERENCE GUIDE. [Datos gubernamentales]. Disponible en:

<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-42.html>

## ANEXOS

### Anexo A. Encuesta ambiental

Esta encuesta se desarrolla con el fin de definir criterios ambientales y obtener la opinión de expertos en el área, para el desarrollo de una herramienta software en el manejo de residuos aceitosos en la industria petrolera. Los criterios a evaluar se han elegido a partir de una revisión bibliográfica sobre los métodos de disposición de residuos aceitosos. Con el fin de ponderar las alternativas, por favor indique la importancia que considere deben tener estos criterios al momento de elegir el método de disposición (0-100). Además, para cada uno de estos criterios evalúe a partir de su experiencia el nivel de impacto ambiental que se le puede asociar a cada uno de los métodos de disposición según corresponda.

Criterio	Importancia criterio*	Descripción	Valoración			
	0: No relevante 100: Muy relevante		Método de disposición			
			Landfarming	Landfill	Compostaje Biopilas	Bioslurry
Emisión de volátiles		Emisión de componentes livianos y demás contaminantes a la atmósfera				
Ecosistema		Afectación sobre el ecosistema presente en el lugar de la disposición, como flora y fauna				
Contaminación de aguas		Riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas				
Presencia comunidades		Impacto social sobre las comunidades cercanas, como el efecto que puede tener sobre la salud de sus habitantes				
Consumo Energía		Energía total requerida para cada método.				
Suelo		Impacto sobre el suelo donde se depositan los residuos y efectos secundarios sobre estos.				

\*Si no se asigna un valor de importancia a cada criterio se otorgará un valor de 100 a todos los criterios, dando a entender que todos tienen el mismo peso en la decisión.

\*\*Si considera que algún factor ambiental fue omitido en la tabla anterior, escríbalo a continuación junto con su valoración.

\*\*\*Se debe considerar la normatividad vigente que aplica a la disposición de residuos peligrosos.

Criterio	Importancia	Descripción	Landfarming	Landfill	Compostaje/Biopilas	Bioslurry

## Anexo B. Escenarios operacionales

A continuación, se encuentran los parámetros operativos de los tratamientos de disposición final de borras con los posibles escenarios que se puedan presentar en cada caso, siendo estos altamente favorables (AF), favorables (F) y desfavorables (D) con su respectiva descripción para cada criterio en específico. Con el fin de verificar la información plasmada, agradecemos hacer una revisión minuciosa y realizar las modificaciones que considere pertinentes o agregar información en caso de ser necesario.

Tratamiento	Escenario	Criterios				
		Área disponible	Tipo de crudo / Contaminantes	Volumen a tratar	Topografía	Climatología
Landfarming	D	Espacio muy reducido	Crudos muy pesados, aromáticos. Crudos muy livianos, con alta tasa de volatilidad. Presencia de metales pesados.	No aplica	Lugares con gradientes escalonados o terrenos montañosos no serán viables. Así como tampoco suelos muy permeables.	Climas con alto índice de pluviosidad, nubosidad y humedad en el ambiente.
	F	Espacio limitado pero apto para modificaciones	Cantidades limitadas de componentes pesados y recalcitrantes. Crudo liviano-mediano.	Es el tratamiento con mayor capacidad de tratar grandes cantidades de residuos.	Suelos planos o áreas con posibilidad de modificar para el desarrollo del tratamiento.	Alta luminosidad y radiación solar favorecen la oxigenación y biodegradación del residuo.
	AF	Espacio amplio disponible para la aplicación del tratamiento.	Crudos dulces, mediano, bajo contenido de sólidos y orgánicos.		Suelos planos, no permeables, que conserven horizontalidad	
Landfill	D	Espacio muy reducido	Altas contenidos de cadenas largas de HCs, crudos asfaltenos y	No aplica	Suelos muy permeables que no sirvan de sello. Planicies que conlleven a	No aplica

			aromáticos. Presencia de metales pesados.		excavación para creación de las celdas.	
	<b>F</b>	Espacio limitado pero apto para modificaciones	Cantidades limitadas de componentes pesados y recalcitrantes.	Igual capacidad de tratar grandes cantidades de residuos como landfarming.	Suelos escalonados con posibilidad de adecuar para el desarrollo y creación de celdas.	Climas cálidos con buena luminosidad y bajo índice de pluviosidad.
	<b>AF</b>	Espacio amplio disponible para la aplicación del tratamiento.	Crudos dulces, livianos y medianos con bajo contenido de sólidos y orgánicos.		Suelos poco permeables.	
<b>Compostaje / Biopilas</b>	<b>D</b>	No hay espacio	Crudos aromáticos con varios anillos bencénicos. Presencia de metales pesados.	Grandes cantidades de residuos a tratar.	Zonas boscosas, montañosas, suelos no permeables.	Climas con alto índice de pluviosidad, nubosidad y humedad en el ambiente.
	<b>F</b>	Espacio limitado	Contenido de TPHs limitado. Crudos medianos.	Cantidades limitadas, pero aun dentro de los parámetros según área disponible	Zonas menos heterogéneas, con espacio considerable para la aplicación del tratamiento.	Alta luminosidad y radiación solar favorecen la oxigenación y biodegradación del residuo.
	<b>AF</b>	Espacio amplio disponible para la aplicación del tratamiento.	Ausencia de compuestos pesados, aromáticos y metales pesados.	Cantidades menores	Espacio amplio, plano y suelos permeables.	
<b>Bioslurry</b>	<b>D</b>	No aplica	Altos contenidos de metales pesados.	Grandes cantidades de residuo a tratar	Áreas montañosas donde no se pueda implementar el sistema	Al ser un sistema cerrado, el aspecto climatológico no afectará de manera importante
	<b>F</b>	Es el tratamiento que menor área	Al ser un sistema controlado	Cantidades considerables	Áreas planas	

		necesita, por lo tanto, se requiere mínimo espacio para la implementación del sistema.	operacionalmente, maneja óptimamente los compuestos pesados y recalcitrantes.	con la opción de implementación de más bioreactores		el desarrollo del proyecto.
	<b>AF</b>			Bajas cantidades de residuos	Áreas planas con buena horizontalidad	

## Anexo C. Importancia criterios operacionales

En la siguiente tabla se encuentra la explicación de los parámetros operacionales establecidos, con el fin de determinar la importancia o peso que tiene cada criterio.

CRITERIO	IMPORTANCIA CRITERIO*	EXPLICACIÓN CRITERIO
	<i>0: No relevante 100: Muy relevante</i>	
<b>Área disponible</b>		Hace referencia al espacio de las locaciones necesarias o disponibles para cada método de disposición, es decir el parámetro que afecta directamente la capacidad de tratamiento o almacenamiento.
<b>Tipo de crudo/contaminante</b>		Hace referencia al tipo de crudo del cual proviene el residuo aceitoso a tratar, presencia de contaminantes (halógenos, grupos nitro, aromáticos, metales pesados, orgánicos) teniendo en cuenta cualquier tratamiento que se le haya realizado y que pueda afectar sus contaminantes finales, como adición de químicos entre otros, que pueden ser tóxicas para los microorganismos que realizan la biodegradación e inhiben su crecimiento.
<b>Volumen a tratar</b>		Hace referencia al volumen total de residuo aceitoso; dicho residuo es el volumen resultante de tomar la borra o sólido aceitoso y realizarle los procedimientos necesarios para la extracción del HC, hasta reducirlo al mínimo volumen posible con HC no recuperable.
<b>Topografía</b>		Hace referencia a la topografía del terreno que se tiene para la disposición final del residuo, este parámetro afectará la viabilidad de los diferentes métodos disponibles.

## Anexo D. Sección Ingreso de datos

C&P | Soluciones Ambientales



**Datos del campo de estudio**

Nombre del Campo

Ubicación

Compañía

Nombre de Usuario

**Datos operacionales**

Disponibilidad de Terreno  [?]

Tipo de crudo Fuente  [?]

Volumen a tratar  [?]

Topografía  [?]

¿ El lugar de disposición cuenta con alta radiación solar y bajos índices de pluviosidad ?  [?]

Duración estimada de la biodegradación  [?]

## Anexo E. Ingreso de datos operacionales

C&P | Soluciones Ambientales

Nombre del Campo

Ubicación

Compañía

Nombre de Usuario

**Datos operacionales**

Disponibilidad de Terreno  [?]

Tipo de crudo Fuente  [?]

Volumen a tratar  [?]

Topografía  [?]

¿ El lugar de disposición cuenta con alta radiación solar y bajos índices de pluviosidad ?  [?]

Duración estimada de la biodegradación  [?]

**Datos Económicos**

¿Existe estudio de suelo?  [?]

¿Existe alguna adecuación?  [?]

**Datos de ponderación**

## Anexo F. Ingreso de datos económicos

C&P | Soluciones Ambientales

Disponibilidad de Terreno  [?]

Tipo de crudo Fuente  [?]

Volumen a tratar  [?]

Topografía  [?]

¿ El lugar de disposición cuenta con alta radiación solar y bajos índices de pluviosidad ?  [?]

Duración estimada de la biodegradación  [?]

Atrás

Siguiente

Datos Económicos

¿Existe estudio de suelo?  [?]

Atrás

¿Existe alguna adecuación?  [?]

Siguiente

Datos de ponderación

Aspectos Ambientales (%)  [?] Normalizar [?]

Aspectos Operacionales (%)  [?] Atrás

Aspectos Económicos (%)  [?] Finalizar

*La suma de los 3 aspectos debe ser igual a 100. En caso de requerir, puede normalizar la suma dando click en el botón correspondiente*

## Anexo G. Ingreso de datos de ponderación

C&P | Soluciones Ambientales

Disponibilidad de Terreno  [?]

Tipo de crudo Fuente  [?]

Volumen a tratar  [?]

Topografía  [?]

¿ El lugar de disposición cuenta con alta radiación solar y bajos índices de pluviosidad ?  [?]

Duración estimada de la biodegradación  [?]

Atrás

Siguiente

Datos Económicos

¿Existe estudio de suelo?  [?]

¿Existe alguna adecuación?  [?]

Atrás

Siguiente

Datos de ponderación

Aspectos Ambientales (%)  [?] Normalizar [?]

Aspectos Operacionales (%)  [?] Atrás

Aspectos Económicos (%)  [?] Finalizar

*La suma de los 3 aspectos debe ser igual a 100. En caso de requerir, puede normalizar la suma dando click en el botón correspondiente*



**Método seleccionado: Compostaje**

A partir de los datos obtenidos, que pueden ser visualizados en la zona inferior de este documento, se determina que el método mas apropiado a ser aplicado, según la información económica, ambiental y técnica es el método de Compostaje

**Información general del campo**

Nombre del Campo	Casabe
Ubicación	Yondo, Antioquia
Compañía	Ecopetrol
Nombre de Usuario	Camila Hernandez

**Información de Datos Operacionales**

Disponibilidad de Terreno	Alto
Tipo de Crudo Fuente	Pesado
Volumen a tratar	Alto
Topografía	Plano
Radiación y Pluviosidad	No
Tiempo	1 a 6 Meses

**Información Económica**

¿Existe estudio de suelos?	Si
¿Existe alguna Adecuación?	Excavación de suelo

**Información de Datos Operacionales**

Aspectos Operacionales (%)	33.3333%
Aspectos Ambientales (%)	33.3333%
Aspectos Económicos (%)	33.3333%



## Compostaje

Es un proceso biológico anaeróbico que convierte materia orgánica en un material más estable con un contenido menor de materia orgánica degradable, dando así lugar a una menor fitotoxicidad hacia las plantas. El compostaje se ha practicado para reducir el volumen y el contenido de agua de la materia prima, destruir patógenos y los componentes sulfurosos y nitrogenados que generan olores.

El compostaje de residuos petroleros ha recibido mayor atención como un sustituto del landfarming, puesto que éste último normalmente requiere grandes áreas de suelo. Se refiere a biopilas, a la conversión de material de desecho en pilas usualmente de 2-4 m de altura, por degradación por micro organismos endógenos y exógenos. La elección del tipo de sistema de biopilas depende principalmente de las condiciones climáticas y de la composición de compuestos orgánicos volátiles presentes en el suelo contaminado. Generalmente las biopilas se diseñan como sistemas cerrados, ya que éstas permiten mantener la temperatura y evitar la saturación de agua debido a lluvias, además de disminuir la evaporación de agua y de compuestos orgánicos volátiles. La eficiencia del biotratamiento puede ser mejorada ajustando la humedad, con bombeo de aire, y la adición de agentes de volumen y nutrientes. Entre estos agentes se incluyen paja, aserrín y astillas de madera, u otro material orgánico. La adición de los agentes de volumen a resultado a un aumento de la porosidad en las biopilas de residuos, conllevando a mejorar la distribución de aire y humedad en la matriz.

Adicionalmente, este tratamiento es ambientalmente amigable ya que el compostaje puede ser conducido en tanques de tratamiento y las emisiones de VOCs pueden ser controladas con unidades de colección auxiliares. También es muy fácil de diseñar e implementar, y puede ser diseñado para acoplarse a diferentes condiciones.