

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL MONTAJE E INSTALACIÓN DE  
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL AGUA DE  
PRODUCCIÓN EN EL CAMPO TOLDADO.**

**JHON JAIRO ASCENCIO CHILATRA.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS DE PETRÓLEOS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL MONTAJE E INSTALACIÓN DE  
UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL AGUA DE  
PRODUCCIÓN EN EL CAMPO TOLDADO.**

**JHON JAIRO ASCENCIO CHILATRA**

**Trabajo de Grado bajo modalidad de monografía, presentado como requisito  
para optar al título de Especialista en Producción de Hidrocarburos**

**Director**

**Ing. Laura Indira Carrero**

**Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS DE PETRÓLEOS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **DEDICATORIA**

El trabajo de grado va dedicado especialmente a mi mamá “Anastacia” (Q.E.P.D). Por ser la persona que con su ejemplo dedicación y esfuerzo, formo en mí una persona inteligente; capaz de superarlos obstáculos y adversidades que se presente en la vida personal y profesional.

A Dios por ser esa luz de esperanza. Que desde lo más alto del mundo espiritual ha de guiarme por los caminos de la sabiduría y la verdad.

Jhon Jairo Ascencio Chilatra.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco inmensamente a Dios y hermanos que han sido las personas que no han dejado de creer en mí, apoyándome incondicionalmente en los momentos más difíciles de mi vida.

Expreso mi mayor gratitud y agradecimiento a mi hermano Varoky quien ha sido mi ventor incondicional, que ha creído y confiado en mis capacidades profesionales durante todos estos años ha visto en mí el crecimiento personal y profesional.

También agradezco a todas las persona que me han apoyado en los momentos más difíciles de mi vida y que no han dejado de creer y confiar en mí.

A todos muchas gracias...

Jhon Jairo Ascencio Chilatra.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	16
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE CAMPO TOLDADO .....	16
1.2 RESEÑA HISTÓRICA DEL CAMPO.....	17
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	20
2.1 DESHIDRATACIÓN DE CRUDOS.....	20
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE CRUDO EN LA ESTACIÓN TOLDADO. ....	23
2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TRATAMIENTO AGUA DE PRODUCCIÓN EN LA ESTACIÓN TOLDADO. ....	24
2.4 SISTEMA TRATAMIENTO QUÍMICO .....	27
<b>3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA TOMADA EN LAS PISCINAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN</b> .....	29
3.1 PRIMERA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA. ....	29
3.2 SEGUNDA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA. ....	32
<b>4. ESTUDIO DE TIPOS DE TRATAMIENTOS PARA RESIDUOS SÓLIDOS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO TOLDADO.</b> .....	36
4.1 TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN SITU.....	36
4.1.1 Bioventeo.....	36
4.1.1.1 Aplicabilidad. ....	37
4.1.1.2 Requerimiento Técnico.....	37
4.1.1.3 Datos Requeridos.....	38
4.1.1.4 Datos de rendimiento .....	39
4.1.1.5 Costos.....	39
4.2 BIORREMEDIACIÓN.....	40
4.2.1 Biorremediación In-situ. ....	40
4.2.2 Biorremediación Ex-situ. ....	40
4.2.3 Aplicabilidad.....	41
4.2.4 Limitaciones.....	41
4.2.5 Información Requerida.....	42
4.2.6 Datos de rendimiento .....	42
4.2.7 Costos.....	43
4.3 TRATAMIENTO BIOLÓGICO EX-SITU .....	43
4.3.1 Biopilas .....	43
4.3.1.1 Costos.....	46
4.3.2 Compostaje.....	46
4.3.2.1 Costos.....	49

4.4	TRATAMIENTO DE DESHIDRATACIÓN LODO ACEITOSO IN SITU – TRICANTE	50
4.4.1	Descarga de sólidos.....	51
4.4.2	Descarga de líquidos. ....	51
4.4.3	Alimentación. ....	52
4.4.4	Tornillo sinfín.....	52
4.4.5	Tambor. ....	53
4.4.6	Ventajas.....	53
4.4.7	Beneficios. ....	54
4.4.8	Costos.....	54
4.5	TRATAMIENTO TÉRMICO EX-SITU.....	54
4.5.1	Desorción Térmica.....	54
4.5.2	Aplicabilidad.....	57
4.5.3	Limitaciones.....	58
4.5.4	Datos de rendimiento.....	58
4.5.5	Costos.....	59
4.6	TRATAMIENTO FISICO QUIMICO EX-SITU.....	60
4.6.1	Separación.....	60
4.6.1.1	Aplicabilidad.....	62
4.6.1.2	Limitaciones.....	62
4.6.1.3	Datos de Rendimiento.....	63
4.6.2	Lavado de Suelos.....	63
4.6.2.1	Costos.....	65
4.6.2.2	Análisis de costos.....	66
4.7	TRATAMIENTO TÉRMICO IN-SITU.....	66
4.7.1	Tratamiento térmico In situ.....	67
4.7.1.1	Incineración.....	67
<b>5.</b>	<b>PLANTA SELECCIONADA PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE SÓLIDOS ACEITOSOS.....</b>	<b>70</b>
<b>6.</b>	<b>EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA.....</b>	<b>73</b>
6.1	EVALUACIÓN TÉCNICA.....	73
6.1.1	PASOS PARA EL MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA TRICANTER EN LA ESTACIÓN TOLDADO.....	75
6.1.2	Mantenimiento de Equipo.....	77
6.1.3	Costos Operativos.....	79
<b>7.</b>	<b>EVALUCIÓN ECONÓMICA.....</b>	<b>81</b>
7.1	FLUJO DE CAJA NETO (FCN).....	81
7.2	VALOR PRESENTE NETO (VPN).....	81
7.3	RELACIÓN COSTO BENEFICIO (RCB).....	81
7.4	TASA INTERNA DE RETORNO (TIR):.....	82
7.5	ANÁLISIS DE INVERSIÓN.....	83

7.5.1 CAPEX. (Capital Expenditures o inversiones en capital).....	83
7.6 ANÁLISIS DE COSTOS.....	83
7.6.1 OPEX. (Operational Expenditures o costos de operación). ....	83
7.7 ANÁLISIS DE INGRESOS.....	85
7.8 DIAGRAMA TIEMPO / VALOR .....	87
7.9 CONCLUSIONES DIAGRAMA TIEMPO / VALOR .....	88
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>89</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ubicación Campo Toldado .....	16
<b>Figura 2.</b>	Producción del Campo. ....	19
<b>Figura 3.</b>	Micrografía de una Emulsión Agua en Petróleo Crudo.....	21
<b>Figura 4.</b>	Diagrama Proceso de Crudo Campo Toldado.....	24
<b>Figura 5.</b>	Diagrama Proceso de Tratamiento del Agua de Producción.....	26
<b>Figura 6.</b>	Diagrama Proceso Punto de Inyección Facilidades y Pozos.....	27
<b>Figura 7.</b>	Toma de Muestra en Piscinas Tratamiento del Agua Residual Asociada a la Producción de Campo Toldado. ....	30
<b>Figura 8.</b>	Caracterización Muestra sólidos Aceitosos. ....	30
<b>Figura 9.</b>	Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos. ....	31
<b>Figura 10.</b>	Caracterización Muestra sólidos Aceitosos. ....	31
<b>Figura 11.</b>	Caracterización Muestra sólidos Aceitosos. ....	32
<b>Figura 12.</b>	Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos. ....	32
<b>Figura 13.</b>	Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos. ....	33
<b>Figura 14.</b>	Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos. ....	33
<b>Figura 15.</b>	Diagrama de Proceso.....	36
<b>Figura 16.</b>	Proceso del Tratamiento Biopilas. ....	44
<b>Figura 17.</b>	Proceso del Tratamiento Compostaje. ....	47
<b>Figura 18.</b>	Proceso del Tratamiento. ....	50
<b>Figura 19.</b>	Separación de Fluido y de Sólido. ....	51
<b>Figura 20.</b>	Componentes Centrifuga Tricanter y Decanter. ....	52
<b>Figura 21.</b>	Elementos Reemplazables de la Protección Anti-Desgaste Centrifuga Tricanter y Decanter.....	53
<b>Figura 22.</b>	Proceso Térmico. ....	55
<b>Figura 23.</b>	Equipo Empleado para la Separación. ....	61
<b>Figura 24.</b>	Proceso Lavado de Suelos.....	65
<b>Figura 25.</b>	Tratamiento de Suelos por Incineración. ....	68
<b>Figura 26.</b>	Registro Fotográfico Piscinas Tratamiento de Agua de Producción..	74
<b>Figura 27.</b>	Montaje e instalación de la Planta de Tratamiento Tricanter.....	74
<b>Figura 28.</b>	Diagrama Tiempo / Valor.....	87

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Propiedades de los Fluidos y del yacimiento Campo Toldado. ....	18
<b>Tabla 2.</b>	Proceso Tratamiento Crudo Campo Toldado.....	23
<b>Tabla 3.</b>	Proceso Tratamiento de Agua de Producción.....	25
<b>Tabla 4.</b>	Dosificación de Productos Químicos.....	28
<b>Tabla 5.</b>	Resultados de Diferentes Muestras. ....	34
<b>Tabla 6.</b>	Costos Estimados por el Tratamiento de Residuos por Bioventeo. ....	39
<b>Tabla 7.</b>	Costos estimados por el tratamiento de Suelos por Compostaje.....	49
<b>Tabla 8.</b>	Costo de Tratamiento Térmico Ex- Situ. ....	60
<b>Tabla 9.</b>	Costo Por Lavado de Suelos. ....	66
<b>Tabla 10.</b>	Cuadro Comparativo con Propuesta Tricanter para el Tratamiento de Sólidos Aceitosos de Campo Toldado.....	71
<b>Tabla 11.</b>	Preoperacional Planta de Tratamiento Tricanter.....	77
<b>Tabla 12.</b>	Rutinas de Mantenimiento Equipos Planta Tricanter. ....	78
<b>Tabla 13.</b>	Proyección de Operación Bomba Centrifuga Tricanter.....	79
<b>Tabla 14.</b>	Costo Personal Operación Planta Tricanter.....	80
<b>Tabla 15.</b>	Costo Consumo de Energía Equipo.....	80
<b>Tabla 16.</b>	Costos de Producción de un Barril de Crudo. ....	84
<b>Tabla 17.</b>	Proyección Producción Neta Campo Toldado. ....	85
<b>Tabla 18.</b>	Proyección Costo Barril de Petróleo - Campo Toldado.....	85
<b>Tabla 19.</b>	Pronóstico Total de Producción por Barril de Petróleo.....	86
<b>Tabla 20.</b>	Costo de inversión Proyecto Planta Tricanter Campo Toldado.....	86
<b>Tabla 21.</b>	Flujo de Caja Neto del Proyecto.....	87

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> PISCINAS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE CAMPO TOLDADO SATURADAS CON BORRAS ACEITOSAS.....	94
<b>ANEXO B .</b> LIMPIEZA DE PISCINAS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA REALIZADA POR PERSONAL DE PRODUCCIÓN .....	96
<b>ANEXO C.</b> CARACTERIZACIÓN SÓLIDOS ACEITOSOS PISCINAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA ASOCIADA A LA PRODUCCIÓN DE TOLDADO....	98
<b>ANEXO D</b> FICHA TÉCNICA CENTRIFUGAS TRICANTER Y DECANTER.....	100

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL MONTAJE INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN EN CAMPO TOLDADO.

**AUTOR:** JHON JAIRO ASCENCIO CHILATRA.

**PALABRAS CLAVES:** Plantas de tratamiento, Biorremediación, Borrás aceitosas, Floccs, *Lifting Cost*.

### **DESCRIPCIÓN:**

El aumento de la dosis de química en cabeza de pozos y facilidades de superficie para mejorar el proceso de tratamiento del petróleo y del agua residual de producción. Incremento la generación de borras aceitosas en las piscinas de "Oxidación y Aireación"; debido a la condición de colmatación de sólidos aceitosos, se aumentó la frecuencia de limpieza de las piscinas de tratamiento del agua asociada a la producción del Campo.

Estas limpiezas programadas están generando: Un elevado sobre costo, en los procesos de biorremediación, transporte y horas extras generadas por el personal de producción al realizar la actividad.

Al no cumplir con los parámetros de calidad del vertimiento, el campo sería cerrado y/o penalizado por parte de entes ambientales "Coortolima y Coorcuencas", de continuar con esta situación o condición, Campo Toldado no será rentable para la operadora "ECOPETROL S.A" por su elevado *Lifting Cost* y costos de operación.

Para reducir costos operativos, minimizar riesgos y peligros del personal de producción al realizar limpieza de piscinas y con el fin de continuar cumplimiento con los parámetros de calidad del agua vertida es necesario buscar una alternativa viable que optimice el proceso actual del tratamiento del residuo sólido aceitoso en Campo Toldado.

---

\* Monografía de Especialización.

\*\* Facultad de Ingeniería Físico Químicas. Escuela Ingeniería de Petróleos. Director Msc. Laura Indira Carrero

## ABSTRACT

**TITLE:** ECONOMIC TECHNICAL STUDY FOR ASSEMBLY AND INSTALLATION OF A TREATMENT PLANT SOLID WASTE WATER PRODUCTION FIELD TOLDADO

**AUTHOR:** JHON JAIRO ASCENCIO CHILATRA.

**KEYWORDS:** Treatment plants, Bioremediation, oil, sediments, Floccs y Lifting Cost.

### **DESCRIPTION:**

Increasing doses chemistry head wells and surface facilities to enhance the treatment process oil and waste water production. Increase the generation of oily sediments in pools of "Oxidation and Aeration"; due to silting condition of oily solids, the frequency of cleaning of the pools of water treatment associated with increased production of the Field.

These scheduled cleanings are generating: A high on cost, Bioremediation processes, transportation and overtime generated by production personnel to perform the activity.

Failure to comply with the quality parameters of the dumping, the field would be closed and / or penalized by environmental authorities "Coortolima and Coorcuencas" continuing with this situation or condition, Golf Toldado not be profitable for the operator "ECOPETROL S.A" Lifting its high cost and operating costs.

To reduce operating costs, minimize risks and dangers of the production staff to make pool cleaning and in order to continue compliance with the quality parameters of water discharged is necessary to find a viable alternative to optimize the current process of treating oily solid residue Field Toldado.

---

\* Monograph Specialization.

\*\* Physicochemical Faculty of Engineering. Petroleum Engineering School. Director Msc. Indira Laura Carrero.

## INTRODUCCIÓN

Ante el incremento en la generación de sólidos “borras aceitosas” en las piscinas de “Oxidación y Aireación”(Ver **Anexos A**) del proceso del tratamiento del agua de producción campo Toldado y el inminente riesgo de posible cierre del campo por comunidades indígenas y entes ambientales, por incumplir con los parámetros de calidad del agua vertida a fuente hídrica, se hace necesaria la búsqueda de plantas, alternativas o soluciones para la optimización y reducción de costos para el tratamiento y manejo de borras aceitosas hoy existente en el campo.

El siguiente estudio, presenta el resultado de la investigación y evaluación de una alternativa para el tratamiento y manejo de las borras aceitosas, bajo el análisis técnico económico que pretende sugerir una alternativa de mejora para el proceso.

La primer parte del estudio, resume la historia y ubicación del campo, además hacer una breve descripción del proceso del tratamiento de crudo y agua de producción del mismo.

La segunda parte del estudio presentan resultados de la caracterización de la muestra “borra aceitosa” tomada en fondo en las piscinas “Oxidación y Aireación” de tratamiento del agua de producción de Campo Toldado. (Ver **Anexo C**)

La tercera y cuarta parte del estudio presentan la investigación y selección de una alternativa para el tratamiento de borras aceitosas generadas en el campo de acuerdo al resultado de la caracterización de la muestra tomada en las piscinas.

Finamente se presenta la viabilidad del estudio técnico económico para el montaje de la planta de tratamiento de residuos sólidos generados, reduciendo los sobre costos del tratamiento de Biorremedación y optimizando el proceso de limpiezas de piscinas (Ver **Anexo B**) y disminuyendo el empleo de horas hombre en la realización de la actividad., Aportando una reducción considerable en el “*Lifting Cost*” y costos operativos para la sostenibilidad, rentabilidad y operación del Campo.

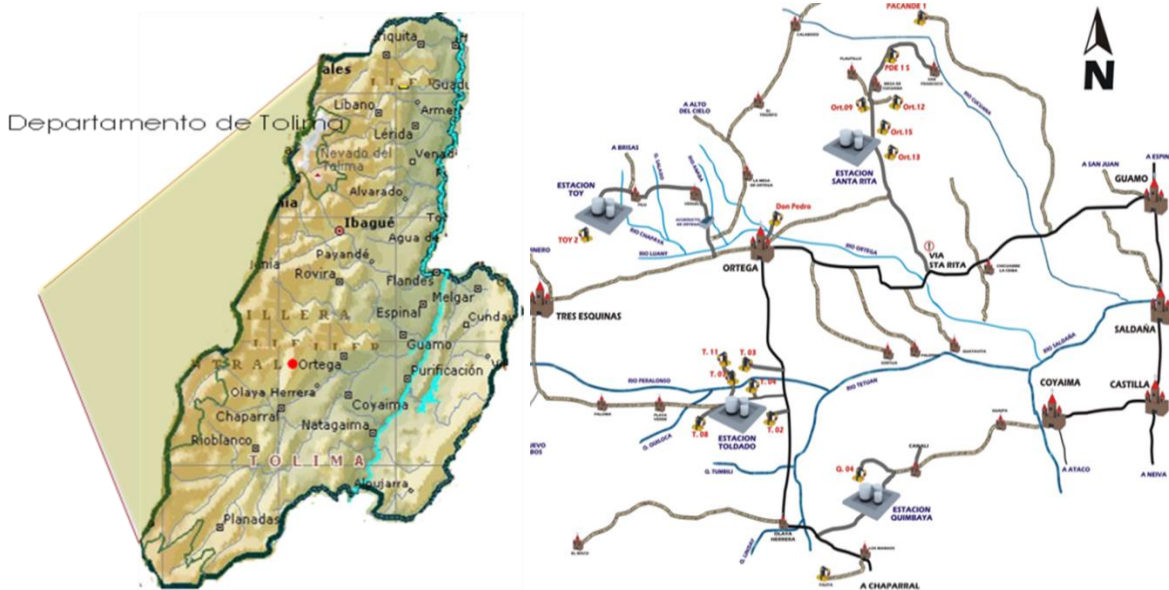
# 1. GENERALIDADES

Antes de entrar en detalle del Estudio Técnico Económico Para el Montaje e Instalación de Una Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos en Campo Toldado se hace una breve descripción de la ubicación e historia del Campo donde se va desarrollar el proyecto, a la vez es imperante conocer el tratamiento químico y el proceso del tratamiento de crudo como del agua asociada a la producción del Campo Toldado.

## 1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE CAMPO TOLDADO

EL campo de producción Toldado pertenece a la Superintendencia de Operaciones Huila Tolima (SOH). Se encuentra localizado en Colombia - Sur Oriente del Tolima - municipio de Ortega, a 12 Km de la vía que conduce de Ortega-Chaparral en la vereda Pocará – En el resguardo Indígena de Pocará y a 240 Km de Bogotá.<sup>1</sup>

Figura 1. Ubicación Campo Toldado



Fuente: Ecopetrol S.A. Presentación de la Coordinación de Producción Tolima 2014. Diapositiva 5.

<sup>1</sup> ECOPETROL S.A, Presentación Gerencia Regional SurSuperintendencia de Huila – Tolima Coordinación de Producción Tolima 2014.

## 1.2 RESEÑA HISTÓRICA DEL CAMPO

Campo Toldado fue descubierto con la perforación del pozo Toldado-01 en diciembre de 1987, el cual fue completado el 20 enero de 1.988, El inicio de la explotación oficial del Campo Toldado se dio en octubre 24 de 1988, mediante Resolución 0005 de mayo 12 de 1989, otorgada por el Ministerio de Minas y Energía. A la fecha se han perforado ocho pozos de los cuales cinco son productores de petróleo y un pozo abandonado por salir seco actualmente los pozos (Toldado 04 y Toldado 05) son usados como pozos de inyección de agua.

La producción inicial del campo fue de 2600 BOPD, de 20°API. Por el área del CPI, se perfora el pozo Ortega 01, en 1951, el cual tuvo una producción inicial de 450 BOPD de 29° API. Posteriormente entre las décadas de los años 50, 60 y 70 se fueron perforando los pozos desde Ortega 02 hasta el Ortega 15.

El campo fue operado por Ecopetrol hasta febrero del 2001. El 18 de diciembre de 2000 <sup>2</sup>se firma entre Ecopetrol y Hocol el Contrato de Producción Incremental área Ortega (CPI Ortega). En marzo de 2001 entra a operarlo Hocol hasta julio de 2002.

---

<sup>2</sup> ECOPETROL S.A, Gerencia Regional SurSuperintendencia de Huila – Tolima Coordinación de Producción Tolima, 2011.

**Tabla 1.** Propiedades de los Fluidos y del yacimiento Campo Toldado.

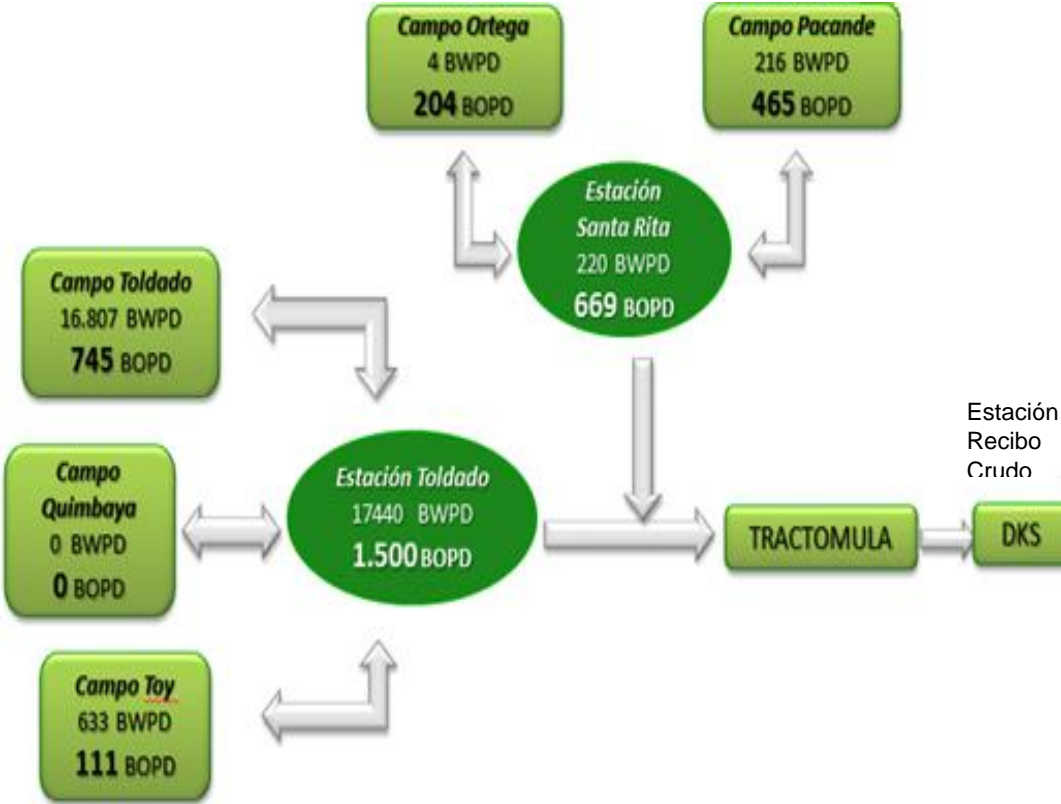
<b>CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO</b>	
FORMACIONES PRODUCTORAS	CABALLO SUPERIOR E INFERIOR, TETUAN Y MONSERRATE.
TIPO DE TRAMPA	ESTRUCTURAL.
ESTRUCTURA	ANTICLINAL ASIMÉTRICO LIMITADO EN FLANCO POR FALLAS INVERSAS.
PROFUNDIDAD	5560' - 6080' MD.
LITOLOGÍA	ARENISCAS Y CALIZAS DE TETUAN.
ESPESOR TOTAL/ESPESOR NETO	300-400 PIES/180-250 PIES.
POROSIDAD	13-18%
PERMEABILIDAD	23-407 Md
TEMPERATURA DE YACIMIENTO	146°F
VISCOSIDAD DE ACEITE	26.2 Cp @ Pi
PRESIÓN DE BURBUJA	1070 PSI @ 4500´
PRESIÓN INICIAL	2780 PSI @ 4500´
GRAVEDAD API DEL CRUDO	20.06 – 28
MECANISMOS DE PRODUCCIÓN	EMPUJE DE AGUA Y GAS EN SOLUCIÓN
METODO DE PRODUCCIÓN	BOMBEO MECÁNICO, ELECTROSUMERGIBLE Y PCP

**Fuente:** Ecopetrol S.A. Presentación de la Coordinación de Producción Tolima 2014. Diapositiva 7.

La producción de crudo gas y agua de Campo Toldado lo aportan los siguientes cuatro campos: Pacande, Ortega, Toldado y Toy, con un total de 13 pozos activos y dos pozos de inyección de agua y Campo Quimbaya, el cual contaba con “tres pozos” actualmente se encuentra fuera de línea, por evaluación económica del campo.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> ECOPETROL S.A, Presentación esquema general de operación 2015.

Figura 2. Producción del Campo.



Fuente: Ecopetrol S.A. Esquema General de Operación 2015. Diapositiva 4.

## 2. MARCO TEÓRICO

En la industria del sector hidrocarburo en los procesos de “separación crudo del agua” y en el tratamiento del agua asociada a la producción interviene un factor importante como es la inyección de productos químicos en cabeza de pozo y en diferentes puntos de las facilidades de superficie “líneas de producción, *Manifold* y separador de producción, *Gun barrel* y tanques. El resultado de estos tratamientos es la generación de sólidos o borras aceitosas.

En los dos últimos años se incrementó la inyección de productos químicos al proceso de tratamiento de clarificación del agua de producción de Campo, para mejorar la calidad del agua y cumplir con los monitoreos y seguimientos trimestrales realizados por la comunidad y entes ambientales, verificando “mediante toma de muestra y análisis” los parámetros de calidad del agua vertida a la fuente hídrica. Al presentar esta condición se generan grandes volúmenes de sólidos en el sistema de tratamiento de agua de Campo Toldado., El promedio mensual de borras aceitosas generadas por el tratamiento químico en el proceso de clarificación de agua de producción del campo es de aproximadamente 1635 Bls, con costos adicionales que se asocian a la limpieza y mantenimiento temprana de las piscinas de Oxidación y Aireación, así como costos por el transporte, tratamiento y disposición de este tipo de desechos contaminantes que son dispuestas a Biorremediación.

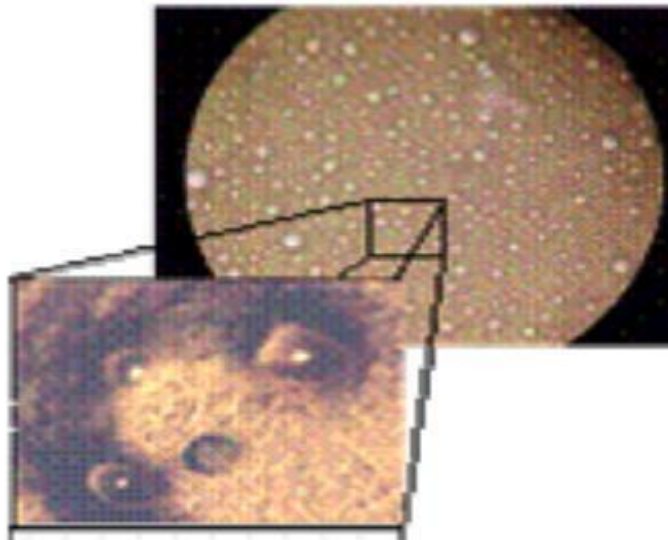
Antes de iniciar con la descripción específica del estudio a continuación se describe el proceso de tratamiento de deshidratación del crudo y de agua de Campo Toldado.

### 2.1 DESHIDRATACIÓN DE CRUDOS

La deshidratación de crudos es el proceso mediante el cual se separa el agua asociada con el crudo, ya sea en forma emulsionada o libre, hasta lograr reducir su contenido a un porcentaje previamente especificado. Generalmente, este porcentaje es inferior al 1 % de agua.

Una parte del agua producida por el pozo petrolero, llamada agua libre, se separa fácilmente del crudo por acción de la gravedad, tan pronto como la velocidad de los fluidos es suficientemente baja. La otra parte del agua está íntimamente combinada con el crudo en forma de una emulsión de gotas de agua dispersadas en el aceite, la cual se llama emulsión agua/aceite (W/O), como se detalla en la **Figura 3**.

**Figura 3.** Micrografía de una Emulsión Agua en Petróleo Crudo.



**Fuente:** TUSO, Jair Alexander, Estudio de Factibilidad para la Implementación de Nuevas Tecnologías de Tratamiento de agua de Producción en Campo Rubiales”. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos .Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería 2014. 17 p.

¿Dónde y cómo se producen las emulsiones de agua en el petróleo?

El agua y el aceite son esencialmente inmiscibles, por lo tanto, estos dos líquidos Coexisten como dos líquidos distintos. La frase “aceite y agua no se mezclan” expresa la mutua insolubilidad de muchos hidrocarburos líquidos con el agua. Las solubilidades de hidrocarburos son bajas, pero varían desde 0,0022 ppm para el tetradecano hasta 1.760 ppm para el benceno en agua. La presencia de doble enlace carbono-carbono (por ejemplo alquenos y aromáticos) incrementan la solubilidad del agua. El agua está lejos de ser soluble en hidrocarburos saturados

(por ejemplo: parafinas o alcanos) y su solubilidad disminuye con el incremento del peso molecular de los hidrocarburos.

Durante las operaciones de extracción del petróleo, la mezcla bifásica de petróleo crudo y agua de formación se desplazan en el medio poroso a una velocidad del orden de 1 pie/día, lo que es insuficiente para que se forme una emulsión.

Sin embargo al pasar por todo el aparataje de producción durante el levantamiento y el transporte en superficie (bombas, válvulas, codos, restricciones, etc.) se produce la agitación suficiente para que el agua se disperse en el petróleo en forma de emulsión W/O estabilizada por las especies de actividad interfacial presentes en el crudo. Las emulsiones formadas son macro-emulsiones W/O con diámetro de gota entre 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ .

Existen tres requisitos esenciales para formar una emulsión:

- Dos líquidos inmiscibles, como el agua y el aceite.
- Suficiente agitación para dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas.
- Un agente emulsionante para estabilizar las gotas dispersas en la fase continúa.

En los campos petroleros las emulsiones de agua en aceite (W/O) son llamadas, emulsiones directas, mientras que las emulsiones de aceite en agua (O/W) son llamadas emulsiones inversas. Esta clasificación simple no siempre es adecuada, ya que emulsiones múltiples o complejas (o/W/O o w/O/W) pueden también ocurrir. Además, esta clasificación es muy particular de la industria petrolera, y que en general las emulsiones O/W son denominadas emulsiones normales y las W/O son las inversas<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> MARFISI, Shirley. SALAGER, Jean Louis. Tratamiento, Deshidratación de crudo. Portal estrucplan{en línea}. Disponible en (<https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3110>).

## 2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE CRUDO EN LA ESTACIÓN TOLDADO.

Las facilidades de la estación Toldado tienen como objetivo recibir los fluidos que vienen de los pozos que llegan por líneas de producción y carro tanque de los pozos; Toldado y Toy. En la estación se realiza el tratamiento de separación crudo del agua asociada a la producción.

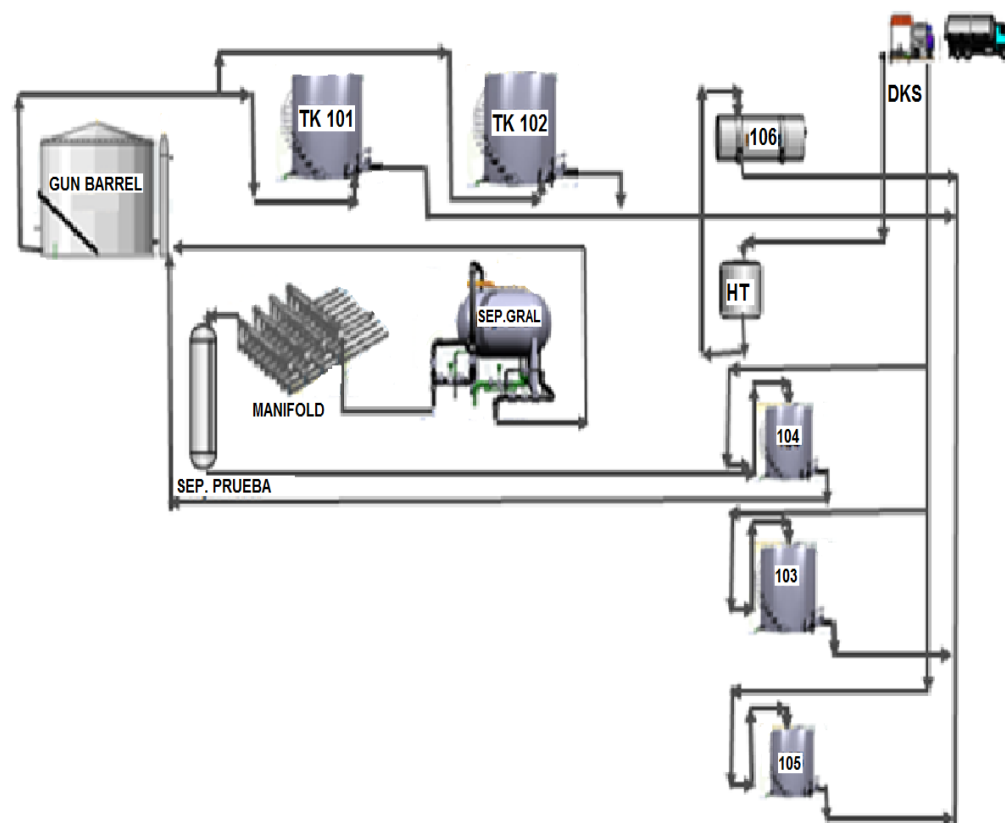
**Tabla 2.** Proceso Tratamiento Crudo Campo Toldado.

EQUIPO	FUNCIÓN
MANIFOLD	RECIBE LA PRODUCCIÓN DE LOS POZOS TOLDADOS CON UN %BSW VARIABLE POR SER LA SUMATORIA DE TODOS LOS POZOS
SEPARADOR TRIFASICO DE PRODUCCIÓN	ESTA VASIJA CERRADA RECIBE LA PRODUCCIÓN DEL MANIFOLD Y SE INYECTA QUÍMICA Y TRABAJA A UNA PRESIÓN DE OPERACIÓN DE 50 PSI, CON EL TIEMPO DE RETENCIÓN INICIA LA SEPARACIÓN DE LAS TRES FASES EL FLUIDO "AGUA, CRUDO Y GAS" EL CRUDO SALE CON UN 0.6%BSW.
GUN BARREL	EL CRUDO QUE SALE DEL SEPARADOR, ENTRA AL GUN BARREL A TRAVÉS DE UN COLECTOR CENTRAL QUE LO DISTRIBUYE POR UN SISTEMA DE ORIFICIOS, ENTRANDO EN CONTACTO CON EL COLCHÓN DE AGUA CALIENTE DEL FONDO, OCURRIENDO ASÍ UN LAVADO DE FLUIDOS. EL CRUDO POR TENER MENOR DENSIDAD QUE EL AGUA ASCIENDE Y SE ACUMULA EN LA PARTE SUPERIOR DEL TANQUE FORMANDO UNA CAPA QUE POR REBOSE PASA AL TANQUE DE ALMACENAMIENTO. EL AGUA POR SU PARTE DESCENDE Y SALE A TRAVÉS DE UNA VÁLVULA NEUMÁTICA CONTROLADORA DE NIVEL HACI EL SKIMMING TANK EL CRUDO SALE CON UN 0,3%BSW.
TANQUE DE ALMACENAMIENTO RECIBO DE PRODUCCIÓN	ALMACENA EL CRUDO TRANSPORTADO POR CARRO TANQUE PROVENIENTE DE CAMPO TOY, PARA SU RESPECTIVO TRATAMIENTO. EL CRUDO TRATADO SE TRANSFIERE CON UN 0.5%BSW AL TANQUE DE FISCALIZACIÓN.
TANQUE DE FISCALIZACIÓN	RECIBE EL CRUDO QUE REBOSA DEL GUN BARREL Y DEL CRUDO TRANSFERIDO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO, EL CRUDO SE MIDE Y SE FISCALIZA BAJO CONDICIONES PARA VENTA. LUEGO SE DIRECCIONA EL FLUIDO HACIA LAS BOMBAS DE DESPACHO DEL CARGADERO.
BOMBA DE TRANSFERENCIA	SE EMPLEA EL EQUIPO PARA TRANSFERIR EL CRUDO DE CAMPO TOY ALMACENADO Y TRATADO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO AL TANQUE DE FISCALIZACIÓN
BOMBAS DE DESPACHO DE CRUDO A CARGADERO	EQUIPOS UTILIZADOS PARA DIRECCIONAR EL CRUDO DE VENTA HACIA EL CARGADERO PARA REALIZAR EL RESPECTIVO CARGUE DE TRACTO CAMIONES.

**Fuente:** Ecopetrol S.A. Manual de operaciones de la Estación Toldado.

Mediante el proceso de separación primaria de agua y deshidratación de crudo, éste último se lleva a condiciones de calidad aptos para el despacho de fluidos; BSW de 0,5% y 20 PTB de sal y finalmente se almacena en tanques de fiscalización para su posterior fiscalización y venta. El crudo es despachado mediante tracto mulas a la estación de recibo de crudo de venta en Campo DKS.

**Figura 4.** Diagrama Proceso de Crudo Campo Toldado.



**Fuente:** Ecopetrol S.A, Presentación Coordinación Tolima 2013. Diapositiva 7.

### 2.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TRATAMIENTO AGUA DE PRODUCCIÓN EN LA ESTACIÓN TOLDADO.

El proceso de tratamiento de agua de producción es dirigido a clarificar el agua separada en el sistema de deshidratación del crudo con el fin de obtener los parámetros requeridos (grasas y aceites < 3 ppm, sólidos suspendidos totales < 3

ppm) para el vertimiento a la fuente hídrica,<sup>5</sup>a fin de dar cumplimiento a los requerimientos de la norma de vertimientos vigentes por la resolución 0631 del 17 de marzo de 2015.

**Tabla 3.** Proceso Tratamiento de Agua de Producción.

EQUIPO	FUNCIÓN
SKIMMING TANK	SU FUNCIÓN PRINCIPAL ES REDUCIR EL NIVEL DE GRASA Y ACEITES PRESENTES EN EL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO. EL AGUA QUE SE OBTIENE DEL SEPARADOR GENERAL DE PRODUCCIÓN, DEL GUN BARREL Y DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO INGRESA AL TANQUE POR LA PARTE SUPERIOR EN DONDE BAJO EL PRINCIPIO DE SEPARACIÓN GRAVITACIONAL Y POR DENSIDAD LAS PARTÍCULAS DE CRUDO ASCIENDEN Y FORMAN UNA PELÍCULA EN LA PARTE SUPERIOR, QUE ES EVACUADA PARA RECIRCULACIÓN EN LA ESTACIÓN POR LA LÍNEA API. POR SU PARTE EL AGUA CON MENOR CANTIDAD DE TRAZAS DE ACEITES ES ENVIADA AL SEPARADOR API Y A LAS PISCINAS DE OXIDACIÓN Y AIREACIÓN PARA SU TRATAMIENTO Y POSTERIOR VERTIMIENTO.
SEPARADOR API	LA FUNCIÓN DEL SEPARADOR API ES REMOVER LA CANTIDAD DE GRASAS Y ACEITES QUE LLEVE EL AGUA ASOCIADA, EL AGUA ENTRA AL SEPARADOR EL CUÁL CUENTA CON CUATRO COMPARTIMENTOS, EN ESTOS COMPARTIMENTOS SE RETIRAN LA MAYOR PARTE DE LAS GRASA.
PISCINAS DE OXIDACIÓN	SUMINISTRA EL TIEMPO DE RETENCIÓN DEL AGUA PARA SEDIMENTAR LOS SÓLIDOS, SEPARA POR GRAVEDAD LAS GRASAS Y ACEITES QUE NO FUERON RETENIDOS EN LA SALIDA DEL SEPARADOR API. ADICIONALMENTE EL AGUA RESIDUAL ES OXIGENADA PARA LUEGO ENVIARLA A LA PISCINA DE AIREACIÓN: DE ESTE PROCESO NO DEBEN SALIR TRAZAS DE ACEITES.
PISCINAS DE AIREACIÓN	MECANISMOS QUE COLABORA CON LA OXIGENACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DISMINUYENDO LA TEMPERATURA PARA SE ENVIADA POSTERIORMENTE A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN DONDE SE CONSIGUE LA TEMPERATURA ADECUADA PARA VERTER EL AGUA DE PRODUCCIÓN
TORRE DE ENFRIAMIENTO	ES EL EQUIPO EN DONDE SE LE DISMINUYE LA TEMPERATURA AL AGUA DE PRODUCCIÓN QUE SE VA A VERTER.

**Fuente:** Ecopetrol S.A. Manual de operaciones Estación Toldado.

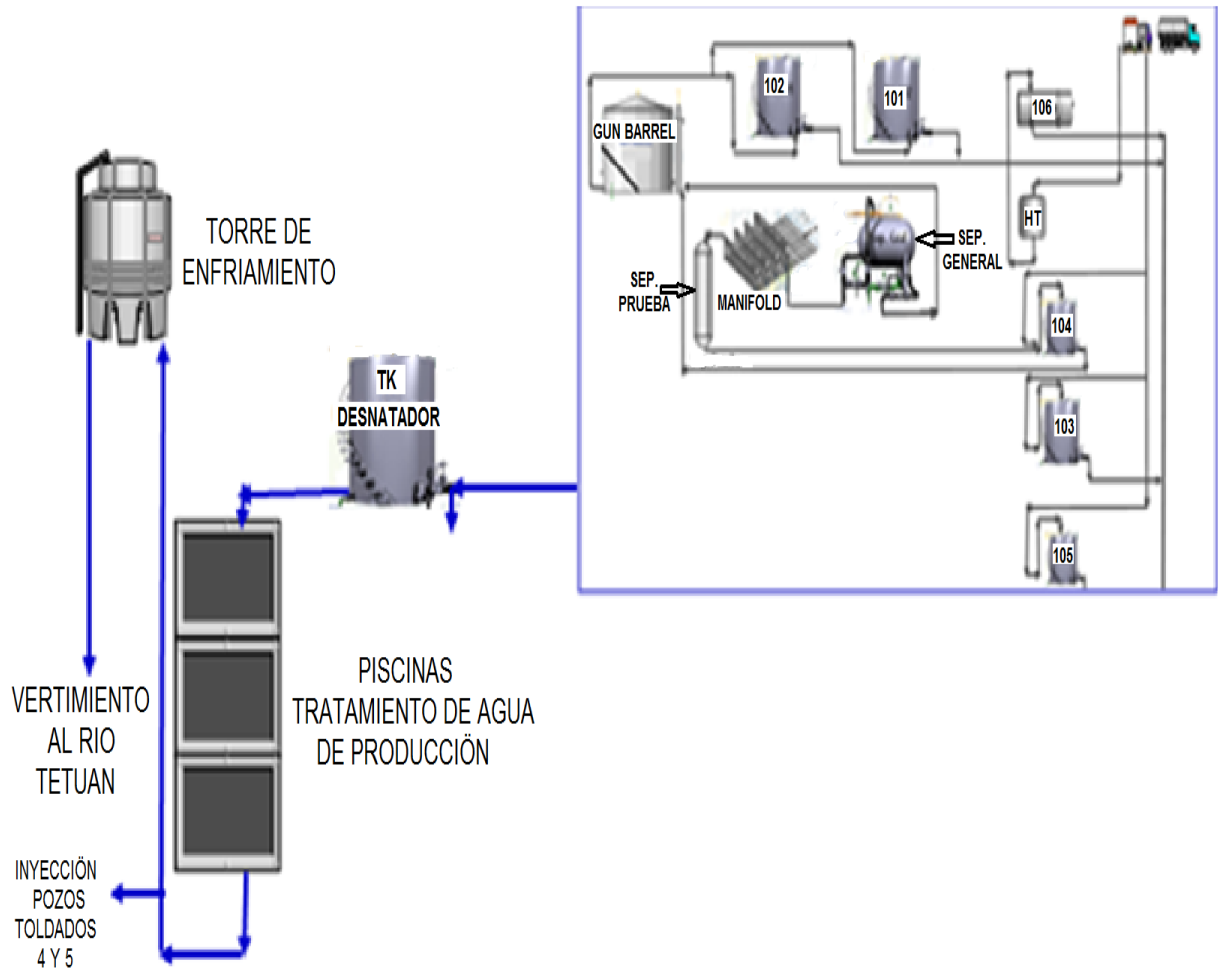
El proceso de tratamiento de las aguas de producción de Campo Toldado, inicia con el fluido acuoso a la salida de agua del separador trifásico al Skimming Tank o tanque desnatador, donde también se lleva a cabo la separación de agua, crudo y aceites sobrenadantes por gravedad. Las características de la tubería de la salida del tanque son de 4” con reducción a 2”, la cual tiene una válvula donde el caudal expulsado es inducido.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> ECOPETROL S.A, Manual de operaciones Estación Toldado p. 24.

<sup>6</sup> *Ibíd.*, p. 24

Posteriormente el agua pasa al tanque separador (API), con el fin de remover aceites y sólidos suspendidos, el caudal es inducido; finalmente pasa a las piscinas de oxidación y de aireación respectivamente, donde se terminan de llevar a cabo los procesos de remoción, sedimentación y degradación de la materia orgánica presente.<sup>7</sup>

**Figura 5.** Diagrama Proceso de Tratamiento del Agua de Producción.



**Fuente:** Ecopetrol S.A, Presentación Coordinación Tolima 2013, Diapositiva 8.

Para que se lleve a cabo el proceso de separación eficientemente en cada uno de los equipos y/o vasijas, se dosifican productos químicos que agilizan las separaciones de los fluidos de acuerdo a la calidad final deseada tanto para el crudo como para el agua.

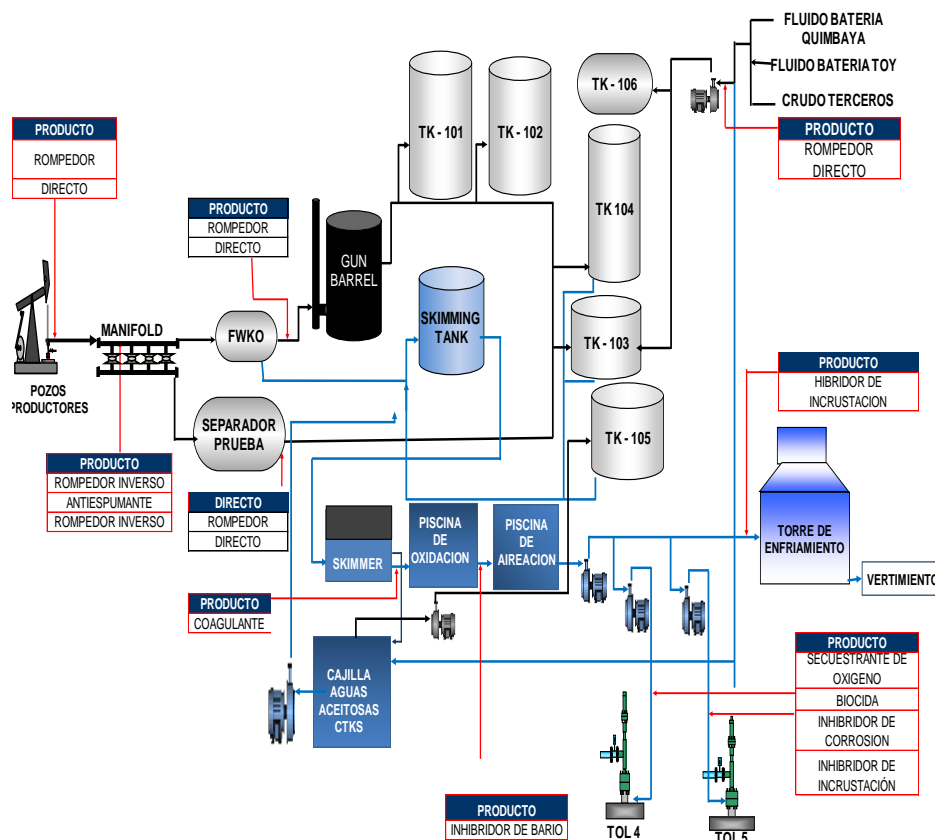
<sup>7</sup> *Ibíd.*, p. 24-25

## 2.4 SISTEMA TRATAMIENTO QUÍMICO

Con la aplicación y dosificación adecuada de productos químicos, de acuerdo a pruebas de botellas realizadas en el laboratorio, se asegura la deshidratación del crudo necesaria para el negocio y la calidad del agua de vertimiento dentro de los parámetros exigidos de acuerdo a la reglamentación ambiental.

Descripción del Proceso: El sistema de tratamiento químico en la Estación de Producción Toldado involucra la aplicación de los productos químicos tanto para el tratamiento del crudo como la del agua.

**Figura 6.** Diagrama Proceso Punto de Inyección Facilidades y Pozos.



**Fuente:** Clariant Proceso de Tratamiento Químico Toldado.

Los productos químicos utilizados en el proceso de deshidratación del crudo se aplican en cabeza de pozo y en el Manifold de la estación. Para el sistema de clarificación del agua los productos se aplican desde la salida de los separadores generales hasta el final del sistema. Cabe notar que es un sistema dinámico, que

permite realizar diversos tratamientos dependiendo de las necesidades que se tengan durante el proceso. En la **Figura 6** se detalla el tratamiento de la Estación Toldado.

**Tabla 4.** Dosificación de Productos Químicos.

PUNTOS DE APLICACIÓN	PRODUCTO	%DILUCIÓN	DESCRIPCIÓN	CONSUMO (GLP)
MANIFOLD	PHASETREAT1 2436	NA	ROMPEDOR DE EMULSIÓN	4,5
MANIFOLD	DEFOAMERS	50%	ANTIESPUMANTE	2,5
SALIDA SEPARADOR	DISMULGAN 3377	100%	CLARIFICADOR	6,5
MANIFOLD	CARTARETIN F 29	7%	ROPEDOR INVERSO	13
ENTRADA PISCINA DE AIREACIÓN	SULFATO DE ALUMINIO	100%	CONTROL DE BARIO	15
ENTRADA PISCINA DE OXIDACIÓN	FLOCTREAT 9512	100%	COAGULANTE	32
POZO TOLDADO 1	SCALETREAT 2803 RF	100%	INHIBRIDOR DE INCRUSTACIÓN	3
BAUTIZO GUN BARREL	SCALETREAT 2807	100%	LIMPIEZA DE GUN BARREL	5
SUCCIÓN BOMBA DE INYECCIÓN	CORRTREAT 7395	100%	INHIBRIDOR DE CORROSIÓN	2,5
ENTRADA TORRE/SUCCIÓN BOMBAS DE INYECCIÓN	SCALETREAT 2803 RF	100%	INHIBRIDOR DE INCRUSTACIÓN	4
SUCCIÓN BOMBA DE INYECCIÓN	TROS TC 1001	100%	SECUESTRANTE DE OXIGENO	4,5
SUCCIÓN BOMBA DE INYECCIÓN	TROS TC 2416	100%	BIOCIDA	1
POZO TOLDADO 8	CORRTREAT 7395	100%	INHIBRIDOR DE CORROSIÓN	5
POZO TOLDADO 11	PHASETREAT 12436	NA	ROMPEDOR DE EMULSIÓN	1
POZO TOLDADO 3	PHASETREAT 12436	NA	ROMPEDOR DE EMULSION	0,5
POZO TOLDADO 3	SCALETREAT 2803 RF	100%	INHIBRIDOR DE INCRUSTACIÓN	1,5

**Fuente:** Clariant proceso de tratamiento químico Toldado.

### **3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA TOMADA EN LAS PISCINAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.**

Conforme a la necesidad actual, para el tratamiento y disposición final al desecho aceitoso almacenado en las piscinas del tratamiento del agua de producción de Campo Toldado.

Se solicitó a la empresa BerakahEnergy S.A.S y AMG DE COLOMBIA LTDA, realizar las caracterizaciones de las muestras (borras-aceitosas); el resultado obtenido de las caracterizaciones, fue la cuantificación en porcentaje del (lodo, crudo y agua); con los datos obtenidos se quiere plantear un tratamiento adecuado para la remoción y detoxificación de sólidos inmerso en el crudo y la disposición de sólidos, que garantice un tratamiento acorde a las normas ambientales para su correcta disposición y la reducción de sobre costos.

A continuación se describen dos resultados de pruebas de laboratorio realizados a muestra de sólidos tomados en las piscinas de tratamiento de agua de producción de Campo Toldado,

#### **3.1 PRIMERA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA.**

Se realizó prueba a nivel de laboratorio, para lo cual se tomaron cuatro (4) muestras de borras del fondo y superficie de las dos piscinas de almacenamiento.

La muestra fue tomada cuando se había retirado alrededor del 10 % del agua superficial presente en las piscinas de tratamiento de agua de producción.

**Figura 7.** Toma de Muestra en Piscinas Tratamiento del Agua Residual Asociada a la Producción de Campo Toldado.



**Fuente:** BerakahEnergy S.A.S. Reporte caracterización, Marzo 2015.

En la imagen de la **Figura 8.** Se aprecia la disminución de las moléculas de la interface dando como resultado la separación definida de cada fase.

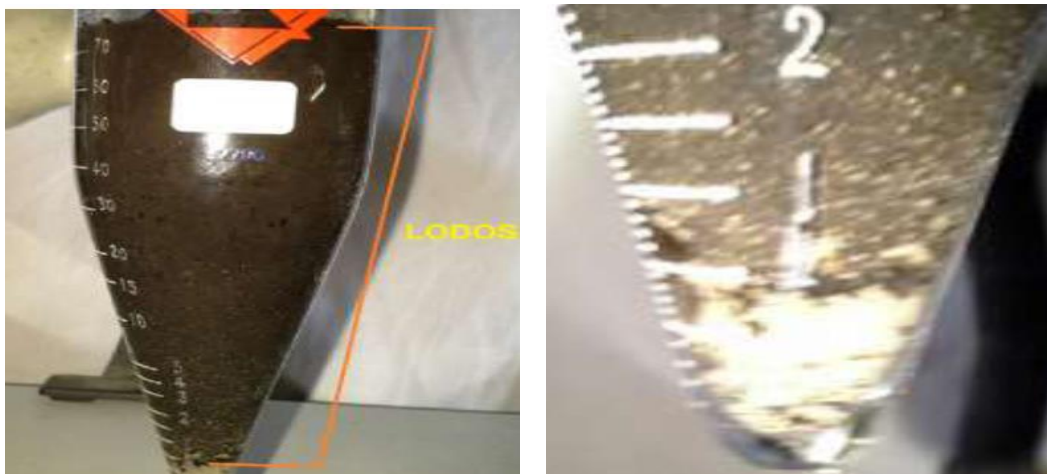
**Figura 8.** Caracterización Muestra sólidos Aceitosos.



**Fuente:** BerakahEnergyS.A.S. Reporte caracterización, Marzo 2015, Pág. 7.

En la imagen de la **Figura 9.** Se aprecian sedimentos generados del proceso de floculación en el tratamiento de las aguas, las cuales fueron sometidas a tratamiento posterior para la oxidación de material orgánico, metales pesados y la detoxificación de hidrocarburo residuales.

**Figura 9.** Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos.



**Fuente:** BerakahEnergy S.A.S. Reporte caracterización, Marzo 2015, Pág. 7.

En la imagen de la **Figura 10**. Se observan los sólidos obtenidos del proceso de separación y detoxificación, previo al proceso de deshidratación térmica.

**Figura 10.** Caracterización Muestra sólidos Aceitosos.



**Fuente:** BerakahEnergy S.A.S. Reporte caracterización, Marzo 2015, Pág. 9.

Material resultante del proceso de deshidratación térmica, dando como resultado la reducción del volumen de sólidos en un porcentaje aproximado del 50%.

**Figura 11.** Caracterización Muestra sólidos Aceitosos.

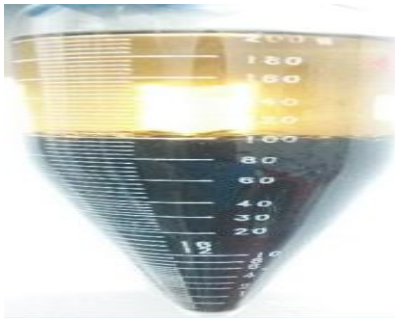


**Fuente:** BerakahEnergy S.A.S. Reporte caracterización, Marzo 2015, Pág. 10.

### **3.2 SEGUNDA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA.**

Después de agitar la muestra en el recipiente, se dispone el 50% en el tubo centrifuga y el otro 50% con varsol.

**Figura 12.** Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos.



**Fuente:** AMG DE COLOMBIA LTDA. Reporte caracterización, Octubre 2015, Pág. 1.

Después de agitar la muestra en la centrifuga durante 10 minutos, existe una separación de un 80% de BSW. En la **Figura 13** se observa la caracterización.

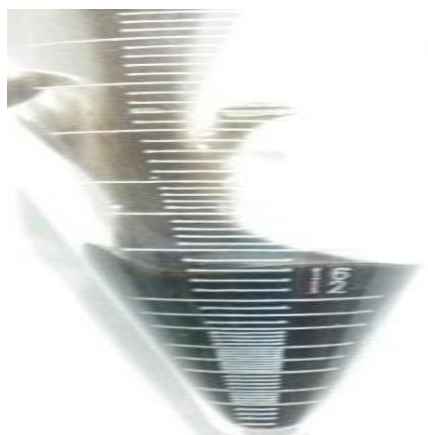
**Figura 13.** Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos.



**Fuente:** AMG DE COLOMBIA LTDA. Reporte caracterización, OCTUBRE 2015, Pág. 2.

En la **Figura 14.** Se aprecia la muestra con el 80% de BSW, se adiciono 1.5% de *BIOFLUID*, esta se somete a una agitación para lograr la homogenización entre *BIOFLUID* con la borra, posterior a este se centrifugo decantando agua y sólidos, obteniendo en el fondo un 16% de un hidrocarburo de alto peso molecular (asfáltenos).

**Figura 14.** Caracterización Muestra Sólidos Aceitosos.



**Fuente:** AMG DE COLOMBIA LTDA. Reporte caracterización, OCTUBRE 2015, Pág. 2.

**Tabla 5.** Resultados de Diferentes Muestras.

VOLUMEN	ANÁLISIS INICIAL (CENTRIFUGADO)			ANÁLISIS RETORTA		
	AGUA (%V/V)	CRUDO (%V/V)	LODO (%V/V)	AGUA (%V/V)	CRUDO (%V/V)	SÓLIDOS (%V/V)
230	20	3	77	78	2	20
234	30	5	65	92	1	7
250	40	4	56	94	1	5
230	35	5	60	90	1	9
234	20	3	77	92	2	6
234	10	8	82	92	1	7
250	25	3	72	92	2	6
240	30	6	64	94	1	5
230	25	6	69	94	1	5
224	20	3	77	77	1	22
230	30	5	65	92	2	6
230	40	5	55	90	1	9
234	20	4	76	82	2	16
240	18	3	79	93	1	6
234	13	3	84	91	1	8
230	40	8	52	81	1	18
240	13	2	85	76	2	22
234	30	1	69	76	2	22
224	20	6	74	92	2	6
230	20	3	77	84	2	14

**Fuente:** AMG DE COLOMBIA LTDA, Informe resultado muestra de borras, Bogotá Octubre 2015.

En conclusión, los análisis realizados para cuantificar el contenido de los lodos mediante procesos de separación, detoxificación, deshidratación térmica y destilación, identifican el volumen real asociado de hidrocarburo o agua presente en una muestra de lodo base agua.

Se evidencia claramente una diferencia sustancial en los porcentajes de cada una de las fases, este particular como consecuencia de la presencia de sólidos humectados y floculados que afectan la lectura real de las fases cuando el análisis se realiza a través de retorta. Se requiere deshidratar el sólido aceitoso.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> AMG DE COLOMBIA LTDA, Informe resultado muestra de borras, Bogotá Octubre 2015

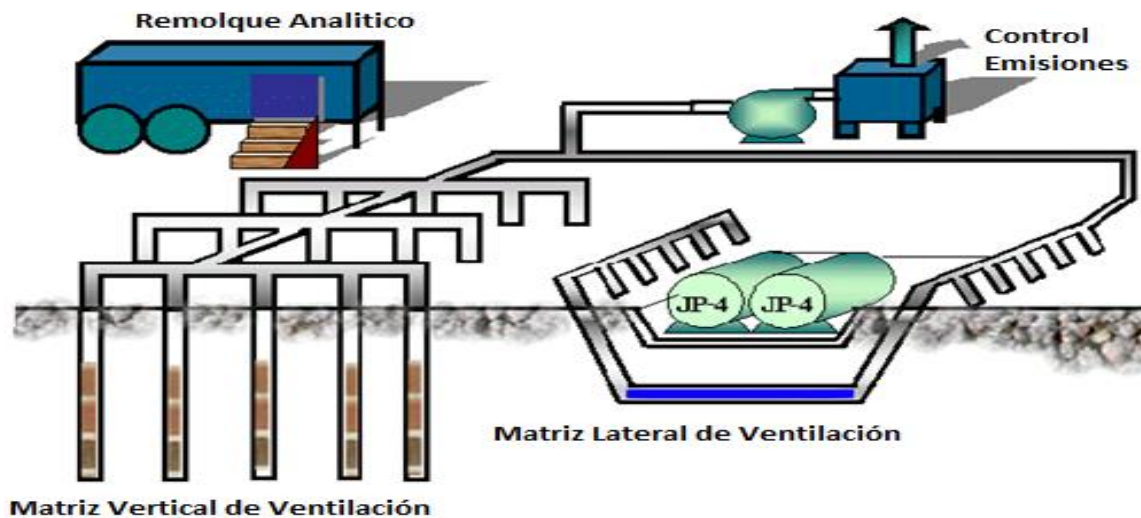
## 4. ESTUDIO DE TIPOS DE TRATAMIENTOS PARA RESIDUOS SÓLIDOS DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO TOLDADO.

En Campo Toldado se están generando sólidos y sedimentos aceitosos en las piscinas de tratamiento del agua asociada a la producción de petróleo, en búsqueda de mejorar el proceso de tratamiento de sólido, se describen diferentes tipos tratamientos empleados en la industria de hidrocarburos.

### 4.1 TRATAMIENTO BIOLÓGICO IN SITU

#### 4.1.1 Bioventeo

Figura 15. Diagrama de Proceso.



**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011. 72 p.

En este proceso el oxígeno es llevado al suelo contaminado no saturado por el movimiento de aire forzado (ya sea extracción o inyección de aire) para aumentar las concentraciones de oxígeno y estimular la biodegradación.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Op. cit., p. 73

El bioventeo es una tecnología nueva y prometedora que estimula la biodegradación natural in situ de compuestos degradables aeróbicamente en el suelo, proporcionando oxígeno a los microorganismos del suelo existentes.

En contraste con la extracción al vacío de vapores del suelo, bioventeo utiliza las bajas tasas de flujo de aire para proporcionar sólo el oxígeno suficiente para mantener la actividad microbiana.

El oxígeno es el elemento químico más comúnmente suministrado a través de inyección de aire para tratamiento de residuos en el suelo. Además de la degradación de los residuos de combustible, los compuestos volátiles se biodegradan en forma de vapores, que se mueven lentamente a través del suelo biológicamente activo. Bioventeo es una tecnología a largo plazo que varía desde algunos meses hasta varios años.<sup>10</sup>

#### **4.1.1.1 Aplicabilidad.**

Técnicas de bioventeo se han utilizado con éxito para remediar suelos contaminados por petróleo, solventes no clorados, algunos pesticidas, conservantes de la madera y otros productos químicos orgánicos. no puede degradar los contaminantes inorgánicos.

La biorremediación se puede utilizar para cambiar el estado de valencia de sustancias inorgánicas y causar la adsorción, captación, acumulación y la concentración de sustancias inorgánicas en micro o macro-organismos.<sup>11</sup>

#### **4.1.1.2 Requerimiento Técnico.**

- Los vapores pueden acumularse en basamento dentro del radio de influencia de los pozos de inyección de aire. Este problema puede aliviarse mediante la extracción de aire cerca de la estructura de interés.

---

<sup>10</sup> *Ibíd.*, p. 73

<sup>11</sup> *Ibíd.*, p. 73

- Muy Bajo contenido de humedad del suelo puede limitar la biodegradación y la eficiencia del bioventeo.
- Monitoreo de gases en superficie puede ser requerido.
- Las bajas temperaturas pueden retardar la remediación, a pesar de que se ha demostrado la remediación tiene éxito en climas extremadamente fríos.

#### 4.1.1.3 Datos Requeridos.

- **Primero:** El aire debe ser capaz de pasar a través del suelo en cantidades suficientes para mantener las cantidades aeróbicas.
- **Segundo:** Los microorganismos naturales degradadores de hidrocarburos deben de estar presentes en concentraciones lo suficientemente grande para obtener ratas razonables de biodegradación.

Las pruebas iniciales se han diseñado para determinar tanto la permeabilidad de suelo al aire de respiración en in situ.

Las tasa de degradación de hidrocarburos casi siempre son estimados a partir de las tasas de utilización de oxígeno mediante una simple relación estequiométrica con el supuesto de que toda pérdida de oxígeno se debe a la mineralización de los hidrocarburos por los microbios, simple relación estequiométrica, no se tiene en cuenta para la producción de biomasa y las relaciones de oxidación de inorgánicos.<sup>12</sup>

El oxígeno sirve como terminal receptora de electrones no sólo en la degradación de materia orgánica, sino también en la oxidación y la reducción de compuestos inorgánicos por microorganismos que obtienen energía mediante la oxidación química.

---

<sup>12</sup> Ibíd., p. 74

#### 4.1.1.4 Datos de rendimiento

El bioventeo es cada vez más común, y la mayoría de sus componentes están disponibles. El bioventeo se muestra cada vez más y recibe una mayor aceptación por los consultores en el área de biorremediación.

Como con todas las tecnologías biológicas el tiempo para remediar un lugar utilizado es altamente dependiente de especificaciones del suelo y propiedades químicas del medio contaminado

#### 4.1.1.5 Costos.

- El área de superficie es el costo primario.
- El impacto del número de pozos inyección/extracción que son instalados. El número de pozos instalados incrementa con el área de superficie.
- Los tipos de suelo o que contienen arena y grava producen significativamente más bajos costos al reducir el número de pozos de inyección / extracción que necesitaban ser instalado.

#### Análisis de costos

La **Tabla 6** se presentan los costos estimados para aplicar bioventeo en sitios que varían en tamaño y complejidad.

**Tabla 6.** Costos Estimados por el Tratamiento de Residuos por Bioventeo.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	BIOVENTEO			
	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	ESCENARIO D
RELACIÓN DE PARAMETROS	SITIO PEQUEÑO		SITIO GRANDE	
	FÁCIL	DIFÍCIL	FÁCIL	DIFÍCIL
	COSTO (USD) POR PIE CUBICO	\$ 26	\$ 27	\$ 2
COSTO (USD) POR METRO CUBICO	\$ 928	\$ 970	\$ 79	\$ 109

**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO, Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011.

Otros factores que afectan el costo de bioventeo incluye el tipo de contaminante y su concentración, permeabilidad del suelo, número y espaciamiento de pozos, tasa de bombeo y tratamiento de gas de salida.

## **4.2 BIORREMEDIACIÓN**

Las operaciones llevadas a cabo en la industria petrolera generan materiales tóxicos y nocivos al medio ambiente, debido a esto el hombre en su sabiduría ha llevado a cabo procesos para mitigar, controlar y arreglar los medios contaminados, estos procesos tienen como fin la biorremediación, la cual hace referencia al uso de sistemas biológicos para acelerar el proceso natural de biodegradación: los sistemas más utilizados son microorganismo y plantas.<sup>13</sup>

Estas degradaciones ocurren en la naturaleza; sin embargo, la velocidad de estas es muy baja. Mediante una adecuada manipulación, sistemas biológicos pueden ser optimizados para aumentar la velocidad de cambio o degradación y así emplearlos en sitios altamente contaminados. En general las manipulaciones involucran producción e inmovilización de enzimas en determinados soportes y cambios genéticos a algunas cepas bacterianas.

La biorremediación puede ser utilizada en dos técnicas:

### **4.2.1 Biorremediación In-situ.**

Se intenta acelerar el proceso en el mismo ambiente modificando las condiciones ambientales o por inoculación microbiana. Esta última se está convirtiendo en un método de aplicación masiva por su menor costo referente a otros métodos de limpieza. Se trata de acelerar los procesos naturales de degradación mediante el suministro de oxígeno y nutrientes durante cierto periodo.

### **4.2.2 Biorremediación Ex-situ.**

Esta técnica consiste en extraer el contaminante y degradarlo en otro sitio en condiciones controladas de laboratorio.

---

<sup>13</sup> Ibíd., p.75

Esta técnica genera un costo económico mayor, por lo cual muchas veces es sometida a evaluación para determinar su aplicación.

#### **4.2.3 Aplicabilidad.**

Las técnicas de biorremediación han sido utilizadas con éxito en las remediación de suelos, lodos y aguas contaminadas con petróleo, solventes, pesticidas y otros químicos orgánicos. Estudios a escala han demostrado la efectividad de la degradación microbiana anaeróbica de nitrotoluenos en suelos contaminados con diferentes residuos. La biorremediación es especialmente efectiva para la remediación de bajos niveles de residuos y conjuntamente con remoción en la fuente.

Los tratamientos de biorremediación a menudo no requieren calor, relativamente requieren ingresos no muy costosos, como nutrientes, y usualmente no generan residuos que requieran tratamiento adicional para disposición. Además cuando se lleva a cabo tratamientos In-situ estos no requieren excavación de contaminantes, comparado con otras tecnologías, tales como desorción térmica e incineración.

Mientras la biorremediación no puede degradar contaminantes inorgánicos, la biorremediación puede ser utilizada para cambiar el estado de valencia de los inorgánicos y causar adsorción, inmovilización sobre partículas del suelo, precipitación, acumulación y concentración de inorgánicos en micro o macro-organismos. Estas técnicas, aun son experimentales, son prometedoras para estabilizar y remover compuestos inorgánicos del suelo.<sup>14</sup>

#### **4.2.4 Limitaciones.**

Factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad de estos procesos incluye:

- Los objetivos de limpieza no pueden alcanzarse si la matriz del suelo impide el contacto entre contaminante-micro-organismo.

---

<sup>14</sup> *Ibíd.*, p. 75

- La circulación de aguas a través de suelo puede incrementar la movilidad del contaminante y necesitar tratamiento para aguas subterráneas.
- Alta concentración de metales pesados, largas cadenas de hidrocarburos, o sales inorgánicas pueden ser microorganismos tóxicos.
- La biorremediación es lenta a bajas temperaturas
- Concentraciones de peróxido de hidrogeno mayores a 100 o 200 ppm en aguas subterráneas inhibe la actividad de microorganismos.
- Sistemas de tratamiento en superficie, tales como *air stripping* o adsorción de carbón, pueden requerirse para tratar el agua extraída antes de re inyección o disposición.

Muchos factores pueden ser controlados con buenas prácticas de ingeniería. El tiempo necesario para el tratamiento está entre 6 meses a 5 años y depende de muchos factores específicos del lugar a tratar.<sup>15</sup>

#### **4.2.5 Información Requerida.**

Las características que se deben determinar incluye la profundidad y el área de extensión contaminada; la concentración de los contaminantes, tipo de suelo y propiedades (ejemplo; contenido orgánico, textura, pH, permeabilidad, capacidad de retención de agua, contenido de humedad y nivel de nutrientes); competencia por oxígeno (ejemplo; potencial de redox); la presencia o ausencia de sustancias que son tóxicas para los microorganismos, y habilidad de los microorganismos en el suelo para degradar contaminantes.<sup>16</sup>

#### **4.2.6 Datos de rendimiento**

La principal ventaja del proceso In-situ es que permite que el suelo tratado no se excave ni se transporte en menor perturbación en medio a tratar.

Ahorrar costos significativos en los métodos que implican la excavación y el transporte. También, tanto agua subterránea y suelos contaminados pueden ser tratados simultáneamente, proporcionando ventajas adicionales en costos.

---

<sup>15</sup> *Ibíd.*, p. 76

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 77

El proceso In-situ generalmente requieren largos periodos de tiempo, sin embargo, hay menos certeza sobre la uniformidad del tratamiento debido a la variabilidad inherente a las características del suelo, del acuífero y la dificultad en el seguimiento de los procesos.

Los tiempos de remediación tardan a menudo años, dependiendo principalmente de la rata de degradación específica de los contaminantes, características del sitio, clima. Menos de un año puede ser necesario para limpiar algunos contaminantes, pero componentes con alto peso molecular pueden tomar mucho tiempo para degradar.

#### **4.2.7 Costos.**

Los costos típicos para una mayor gama de biorremediación oscilan en el rango de \$ 30USD a \$ 100USD por metro cúbico (\$ 20USD a \$ 80USD por yarda cúbica) de tierra. Los factores que afectan el costo incluyen el tipo de suelo y la química.

### **4.3 TRATAMIENTO BIOLÓGICO EX-SITU**

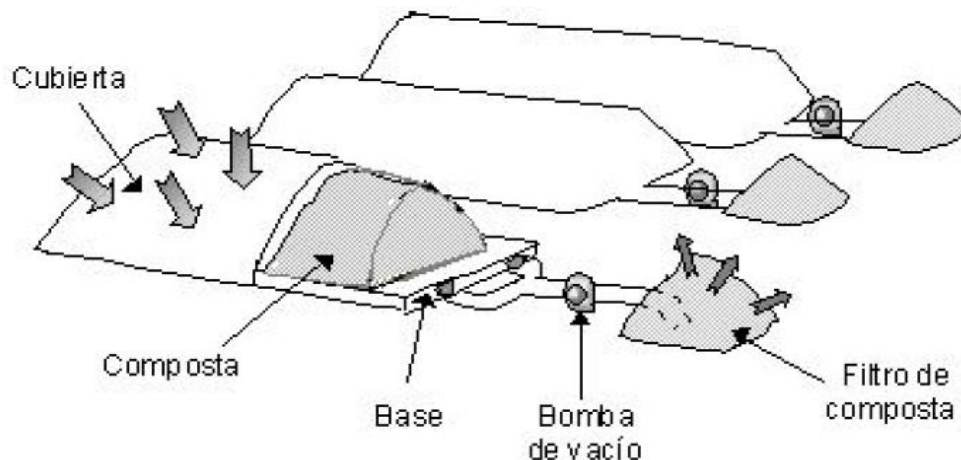
#### **4.3.1 Biopilas**

Las biopilas constituyen una tecnología de biorremediación ex-situ en la cual el suelo contaminado con hidrocarburos es extraído y dispuesto en un área de tratamiento o piscina previamente excavada para su descontaminación con microorganismos.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Ibíd., p. 86

**Figura 16.** Proceso del Tratamiento Biopilas.



**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011.86 p

Esta tecnología es empleada cuando la sustancia contaminante (residuos aceitosos líquidos) es demasiado volátil para ser tratado por la técnica de *landfarming*, ya que las emisiones gaseosas serían demasiado altas, y también es empleada cuando se desea acelerar el proceso de biorremediación, por medio del monitoreo y control de factores influyentes tales como el oxígeno y el pH.

La zona de tratamiento incluye sistemas de recolección de lixiviados y un sistema de aireación que cuenta con una serie de tuberías que son colocadas durante la construcción. Este sistema de tuberías está conectado a un soplador de presión negativa o de vacío, que fuerza al oxígeno presente en la atmósfera a pasar a través de la pila de suelo. También son controlables otros parámetros como la temperatura, el pH, los nutrientes y por su puesto la humedad. Existente en el mercado aditivo químico específicos cuyas propiedades nutritivas pueden estimular el proceso de biorremediación. De esta manera se tiene un alto grado de control sobre el proceso y el medio.

La implementación de las biopilas como mecanismos de tratamiento y disposición final de residuos aceitosos es una tecnología que se puede caracterizar como de

corto plazo, la duración de las operaciones y el mantenimiento del proceso se pueden llevar a cabo en pocas semanas o pocos meses.

Las acumulaciones de material en el suelo no deben ser superiores a los 3 metros de altura, puesto que estas pilas deben ser cubiertas por impermeables para controlar la volatilización de los compuestos orgánicos más volátiles, que posteriormente deberán ser tratados antes de su emisión a la atmósfera.

El tratamiento de los residuos aceitosos y los suelos contaminados por hidrocarburos se aplica fundamentalmente para la eliminación de hidrocarburos que tiende a desprender sus componentes de mayor volatilidad.

Los primeros pasos en la preparación de un diseño para el tratamiento biológico de suelos contaminados por hidrocarburos son:

- Caracterización del sitio.
- Muestreo y caracterización del suelo.
- Caracterización de contaminantes.
- Estudios de tratabilidad de campo o laboratorio.
- Pruebas pilotos y demostraciones sobre terreno.

La caracterización del sitio, del suelo y de los residuos aceitosos contaminantes será utilizado para:

- Identificar y cuantificar contaminantes.
- Determinar los requerimientos para la excavación.
- Identificar los problemas de seguridad.
- Disposición de la maquinaria que realiza el tratamiento y manejo del residuo aceitoso.

Los estudios de laboratorio y tratabilidad del residuo aceitoso en el campo son necesarios para identificar:

- La proporción de los nutrientes que promueven la actividad microbiana.
- El potencial de los subproductos tóxicos de la degradación.

- El porcentaje de reducción y el nivel más bajo de concentración de contaminantes.
- La tasa de degradación.

Existen algunos factores que pueden limitar la aplicabilidad y efectividad en el proceso que pueden ser:

- Se requiere la excavación de los suelos contaminados por el residuo aceitoso (hidrocarburo).
- Los procesos de tratamiento estático pueden dar lugar a un trato menos uniforme que los procesos que involucran periodos de mezcla.
- Si no se realizan las pruebas de tratabilidad, no pueden determinarse las tasas adecuadas de biodegradabilidad del residuo aceitoso intervenido.

#### **4.3.1.1 Costos.**

El costo del empleo y desarrollo de este método de tratamiento depende del volumen y tipo de contaminante, como principal ventaja es que no necesita de muchos operadores para su realización, el costo típico de este tratamiento esta por el valor de USD\$ 130 a USD\$ 260 por metro cubico.

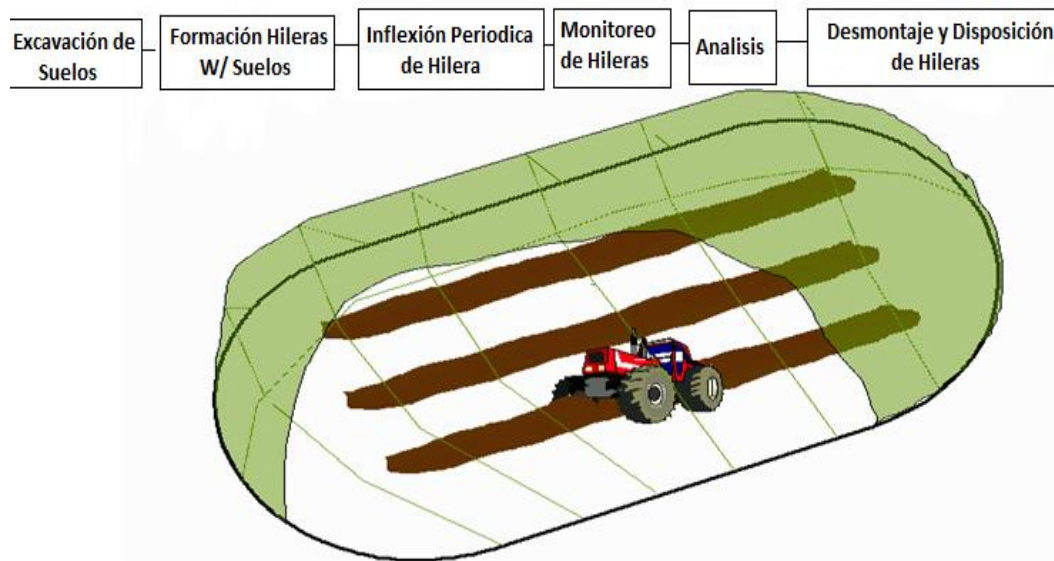
#### **4.3.2 Compostaje.**

El compostaje de suelos contaminados por residuos aceitosos es un proceso biológico controlado en el que los contaminantes orgánicos como los hidrocarburos halógenos policíclicos son convertidos en sustancias inofensivas por los microorganismos aerobios, dando lugar a un producto final estabilizado llamado compost, que es empleado eficazmente en la agricultura, como abono fertilizante.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> *Ibíd.*, p. 89

**Figura 17.** Proceso del Tratamiento Compostaje.



**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011. 89 p.

El suelo contaminado es excavado y trasladado a la zona de tratamiento. Esta consiste en una pista impermeabilizada con ajuste de las pendientes hacia un sumidero para el control de los lixiviados, los cuales son inyectados en el suelo, generando un ciclo semicerrado de circulación de agua.

Durante el proceso es necesario mantener unas determinadas condiciones para obtener unos buenos resultados:

- **Aireación:** Es un factor fundamental a controlar, ya que los microorganismos aerobios van necesitar una tasa de oxígeno determinada para lograr la biodegradación de los contaminantes.
- **Temperatura:** Se generan condiciones termófilas debido al calor producido por los microorganismos en la degradación del material orgánico. El rango de temperatura óptimo de trabajo entre 54°C y 65°C.

- **Humedad:** Los microorganismos necesitan de una hidratación adecuada para su correcto desarrollo. Una excesiva hidratación del suelo restringe el movimiento del aire en el subsuelo y reduce la disponibilidad de oxígeno. El rango ideal de hidratación del suelo es de 20 a 30% en peso.
- **pH:** Las pilas de compostaje deben someterse en un rango de pH entre 6 y 8 para asegurar y mantener el crecimiento de la población bacteriana.
- **Nutrientes:** Los microorganismos requieren de una fuente de carbono para el crecimiento celular, lo pueden obtener del contaminante (hidrocarburo) o puede ser adicionado como aditivo.
- **Cantidad de microorganismo:** Normalmente en la pila de suelo contaminado existen microorganismos suficientes para realizar el proceso, pero puede ser necesario inocularlos o añadir estiércol, esta adición garantiza el aumento de la población microbiana y la adición de nutrientes.<sup>19</sup>

Existen tres diseños posibles del proceso de compostaje:

1. **Pilas estáticas aireadas:** El suelo se apila en montones que se airean mediante soplantes o bombas de vacío que están distribuidas en el interior de las pilas.
2. **Pilas mecánicamente agitadas:** El suelo se coloca en reactores donde se mezcla mecánicamente para conseguir la aireación.

---

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p. 90

3. **Ventana de compostaje:** Es la alternativa más rentable y la más utilizada. El suelo se coloca en montones que se mezclan periódicamente con equipos móviles.<sup>20</sup>

Los siguientes factores pueden limitar la efectividad del proceso:

- La disponibilidad espacial es necesaria para el método de tratamiento.
- La excavación del suelo es necesaria y puede causar la liberación incontrolada de compuestos orgánicos volátiles.
- Aumento del volumen de material a tratar por la adición de nueva capas, para acelerar y ratificar el proceso de degradación.

#### 4.3.2.1 Costos.

El costo para la implementación de este tratamiento de suelo que a su vez es un método para el tratamiento, descomposición y disposición final de material aceitoso depende de la cantidad de material contaminante y principalmente del diseño empleado en el proceso.<sup>21</sup>

**Tabla 7.** Costos estimados por el tratamiento de Suelos por Compostaje.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	COMPOSTAJE			
	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	ESCENARIO D
	SITIO PEQUEÑO		SITIO GRANDE	
	FÁCIL	DIFÍCIL	FÁCIL	DIFÍCIL
CADA 3 Ft3 PROCESADOS	13	14	24	24
COSTOS (USD) DE COMPOSTAJE m3	\$ 259	\$ 345	\$ 249	\$ 321
COSTO (USD) TOTAL POR CADA METRO CUBICO	\$ 489	\$ 578	\$ 481	\$ 555
COSTO (USD) POR 100 YARDAS CUBICAS	\$ 488,988	\$ 577,588	\$ 489,682	\$ 554,982

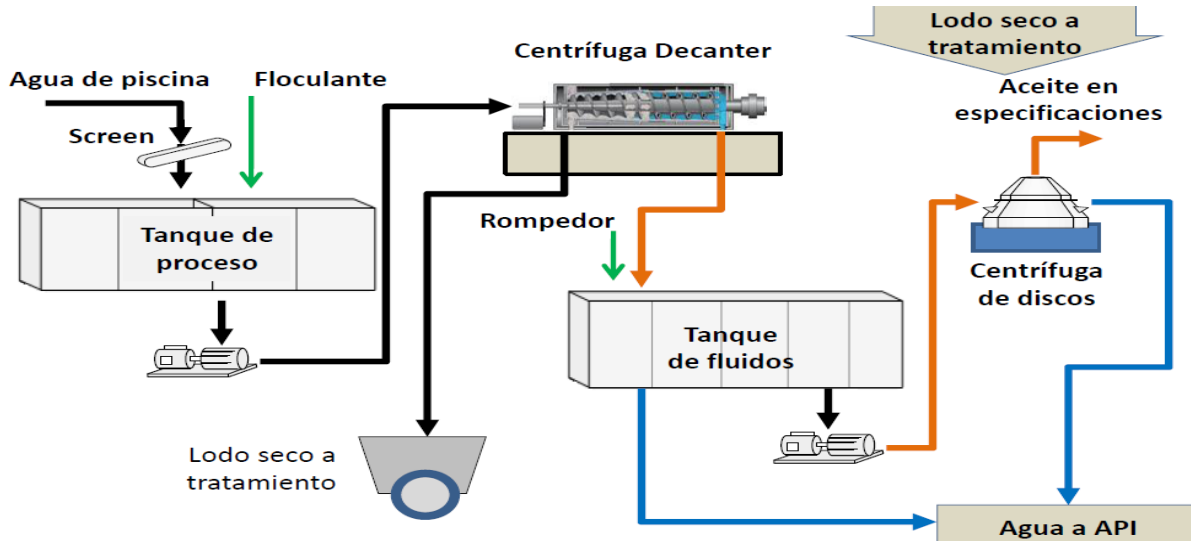
**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011 . 89 p.

<sup>20</sup> Ibíd., p. 90

<sup>21</sup> Ibíd., p. 90

#### 4.4 TRATAMIENTO DE DESHIDRATACIÓN LODO ACEITOSO IN SITU – TRICANTE

Figura 18. Proceso del Tratamiento.



**Fuente:** Petrolabin Proceso de tratamiento deshidratación de lodos, Propuesta de tratamiento. [PDF].

El tratamiento de deshidratación de lodo aceitoso con planta Tricante consiste en succionar el fluido almacenado en una piscina, el equipo utilizado en el proceso es una centrifuga Tricante y decantadora, que a través de la centrifugación logra la separación de las tres fases; (agua, lodo y aceite) de manera eficiente incluyendo la deshidratación de los lodos, minimizando así los volúmenes de los mismos a tratar, el agua es separada y el crudo recuperado se retornaría al proceso de tratamiento de crudo y los lodos son transportados y depositados en la planta de tratamiento para su disposición final<sup>22</sup>.

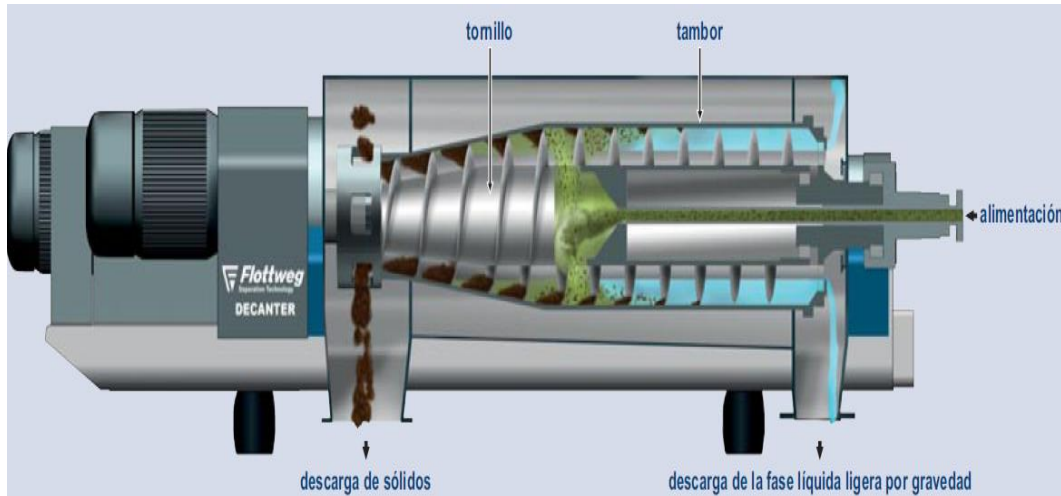
El objetivo principal de la planta es deshidratar el sólido aceitoso, recuperar un porcentaje mínimo de aceite y en desechar otros componentes como sólidos de manera eficiente.

La planta Tricante maneja un caudal teórico de 300 (Gpm) y realiza la separación de sus mezclas tres fases, es decir, la separación simultánea de dos fases

<sup>22</sup> FLOTTWEG SEPARATION TECHNOLOGY, Tricante para procesos de separación en tres fases. {En línea}. Disponible en (<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/tricanterr/>).

líquidas no miscibles con diferentes densidades y una fase sólida la cual es la más pesada de todas las fases.

**Figura 19.** Separación de Fluido y de Sólido.



**Fuente:** FLOTTWEG SEPARATION TECHNOLOGY, Tricanter para procesos de separación en tres fases. {En línea}. Disponible en (<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/tricanter/>).

#### **4.4.1 Descarga de sólidos.**

Los sólidos son expulsados a través de las puertas de salida (ubicadas en la parte cónica final del tambor) y son recogidos en el colector de sólidos que forma una parte de la carcasa de la máquina. Desde allí caen libremente de la máquina<sup>23</sup>.

#### **4.4.2 Descarga de líquidos.**

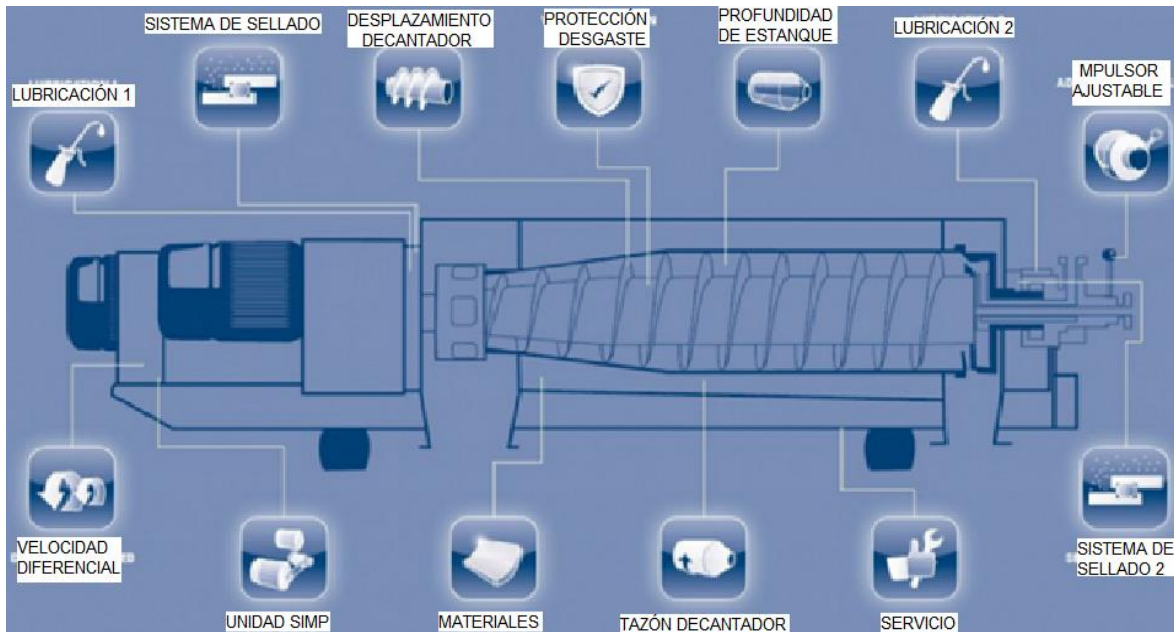
El líquido clarificado fluye hacia la parte cilíndrica final y desde ahí es descargado a través de salidas hacia la carcasa del tambor. En estas salidas se encuentran anillos de regulación con los cuales se puede ajustar fácil y precisamente la profundidad de la laguna en el tambor. El líquido es recolectado en un colector central y luego es descargado por gravedad.<sup>24</sup>

La tecnología involucra un tren de tratamiento a partir de la adición o inyección de un polímero que permite la separación de las fases y la detoxificación de los elementos y compuestos contaminantes.

<sup>23</sup> *Ibíd.*, p. 8

<sup>24</sup> *Ibíd.*, p. 8

**Figura 20.** Componentes Centrifuga Tricanter y Decanter.



**Fuente:** FLOTTWEG SEPARATION TECHNOLOGY, Tricanter para procesos de separación en tres fases. {En línea}. Disponible en (<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/tricanter/>).

#### 4.4.3 Alimentación.

El producto a ser separado se introduce a través de un tubo de alimentación central y es conducido a la zona de alimentación del tornillo sinfín. Desde ahí, el producto es acelerado suavemente (en dirección circunferencial) y se dirige e ingresa en el tambor centrífugo a través de las puertas de distribución<sup>25</sup>.

#### 4.4.4 Tornillo sinfín.

El tornillo sinfín gira a una velocidad diferencial relativamente superior a la del tambor y transporta los sólidos depositados en la pared del tambor hacia la parte cónica y final del tambor. La velocidad diferencial determina el tiempo de permanencia de los sólidos en el tambor.

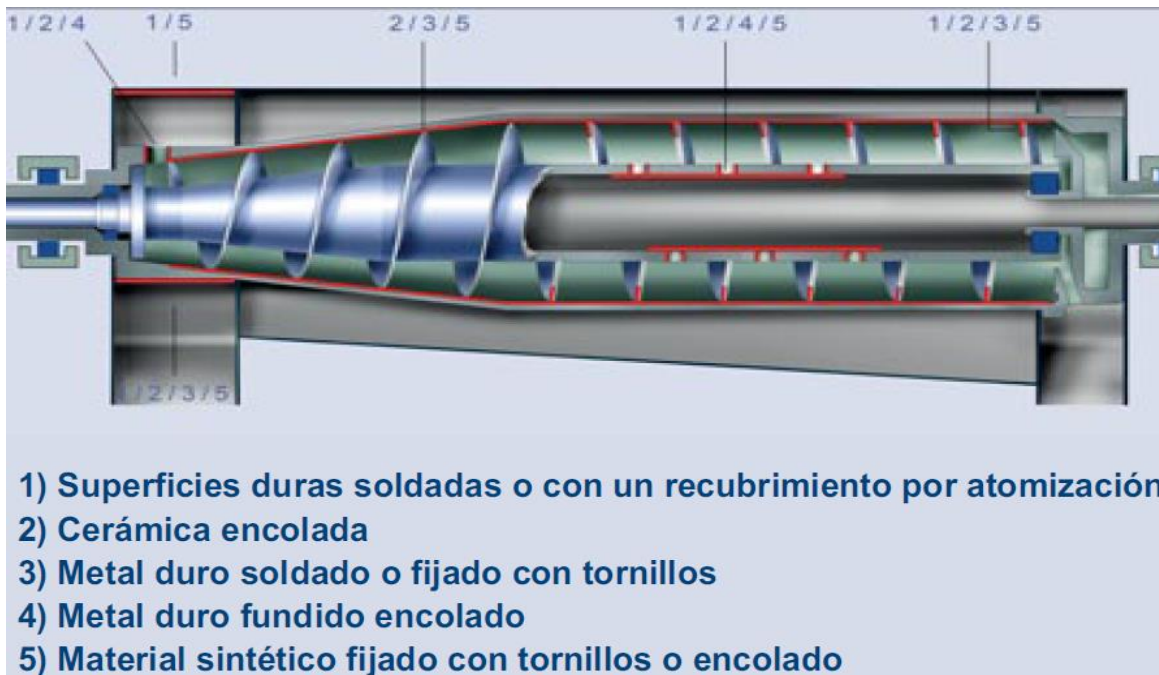
El tiempo de permanencia es una variable importante para el secado de los sólidos que se quiere alcanzar y puede ser ajustada automáticamente cambiando la velocidad diferencial del tornillo sinfín para obtener, de esta manera, la separación óptima y deseada.

<sup>25</sup> Ibíd. p. 8

#### 4.4.5 Tambor.

El tambor tiene una forma cónica y cilíndrica y gira a una velocidad determinada según las necesidades de la aplicación. En el tambor, la suspensión alcanza la velocidad completa formando una capa concéntrica en la pared del tambor. Los sólidos contenidos en el producto son depositados en la pared del tambor por efecto de la fuerza centrífuga.<sup>26</sup>

**Figura 21.** Elementos Reemplazables de la Protección Anti-Desgaste Centrifuga Tricanter y Decanter.



**Fuente:** FLOTTWEG SEPARATION TECHNOLOGY, Tricanter para procesos de separación en tres fases. {En línea}. Disponible en (<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/tricanter/>).

#### 4.4.6 Ventajas.

- Reducción considerable y eliminación de emisiones que contienen hidrocarburos así como de peligroso para la salud humana.
- La cantidad de los residuos separados es tan sólo entre el 10% y el 20% del volumen inicial de los lodos y se obtiene un alto contenido en materia seco.

<sup>26</sup> Ibíd. p. 8.

- El aceite recuperado se puede reutilizar como aceite de valor. La reducción de los lodos del 90 % <sup>27</sup> reduce considerablemente los gastos de transporte y disposición.
- Reducidos costos de personal gracias a la operación continua y automática

#### **4.4.7 Beneficios.**

1. Disminución de los costos en el proceso de tratamiento del sólido aceitoso, el lodo deshidratado es eliminando el 100 % del agua.
2. Ahorro de transporte en Tracto-camiones, ya que se utilizan Volquetas Selladas el cual económicamente el transporte será de menor costo.
3. El agua y el crudo recuperación del agua y el crudo que serían devueltos a la Operación de forma inmediata, obteniendo beneficios económicos por la recuperación del Oíl.

#### **4.4.8 Costos.**

El costo por el empleo de la planta Tricante para el tratamiento de sólidos. Es por tarifa de servicio que está sujeto al volumen a tratar, la movilización y desmovilización de equipos le corresponde a la empresa operador que contrata el servicio. El costo normal oscila en el rango de US\$ 16,4 por barril a tratar.

### **4.5 TRATAMIENTO TÉRMICO EX-SITU**

#### **4.5.1 Desorción Térmica**

La desorción térmica<sup>28</sup> es un proceso de separación física y no está diseñado para destruir compuestos orgánicos.

---

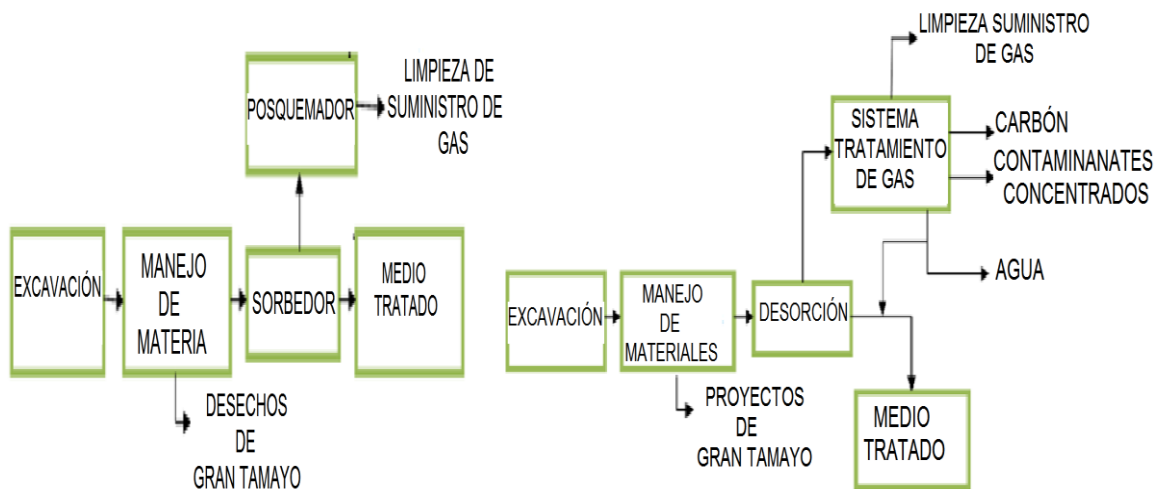
<sup>27</sup> *Ibíd.*, p. 10

<sup>28</sup> COOPER Kay, Remediación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química. {En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).

Los desechos se calientan para volatilizar el agua y los contaminantes orgánicos. Un sistema de gas portador o de vacío transporta el agua volatilizada y los compuestos orgánicos al sistema de tratamiento de gas.

Las temperaturas de cama y tiempos de residencia diseñada en estos sistemas volatilizar los contaminantes seleccionados.

**Figura 22.** Proceso Térmico.



**Fuente:** COOPER Kay, Remediación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química. {En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).

Dos diseños de desorción térmica comunes son el secador rotatorio y el tornillo térmico. Los secadores rotatorios son cilindros horizontales que pueden ser indirectos- o fuego directo.

El secador es normalmente inclinado y girado. Para las unidades térmicas de tornillo, tornillo o sinfines transportadores huecos se utilizan para transportar el medio a través de un canal cerrado.

El aceite caliente o el vapor circulan a través de la barrena para calentar indirectamente el medio. Todos los sistemas de desorción térmica requieren un tratamiento del gas de escape para eliminar las partículas y contaminantes. Las

partículas se eliminan mediante equipos de eliminación de partículas convencional, tales como depuradores húmedos o filtros de tela.

Los contaminantes se eliminan a través de condensación seguida por adsorción de carbono, o son destruidos en una cámara de combustión secundaria o un oxidante catalítico. La mayoría de estas unidades son transportables.

Tres tipos de desorción térmica están disponibles y brevemente descritos de la siguiente manera:

- **Fuego directo:** El fuego se aplica directamente sobre la superficie de los medios contaminados. El propósito principal del fuego es para de sorber los contaminantes del suelo aunque algunos contaminantes pueden ser oxidados térmicamente.
- **Caldeo indirecto:** Un secador rotativo de combustión directa calienta una corriente de aire que, por contacto directo, de sorber el agua y los contaminantes orgánicos del suelo.
- **Indirecto climatizada:** Es un proceso que utiliza desorción climatizada indirecto seguido de un tratamiento de gas lavador de alta energía, que elimina con éxito > 99 % de los PCB del suelo contaminado.

Los procesos de desorción térmica se pueden clasificar en dos grupos: desorción térmica a alta temperatura (HTTD) y desorción térmica a baja temperatura (LTTD).

➤ **Alta temperatura de desorción térmica (HTTD)**

HTTD es una tecnología a gran escala en el que los desechos se calientan a 320 a 560°C (600 a 1 000 ° F). HTTD se utiliza con frecuencia en combinación con la incineración, la solidificación / estabilización, o decloración, dependiendo de las condiciones específicas del sitio. La tecnología ha demostrado que puede producir un nivel de concentración de contaminantes final por debajo de 5 mg / kg para los contaminantes objetivo identificados.

➤ **Baja temperatura de desorción térmica (LTTD)**

En LTTD, los residuos se calientan a entre 90 y 320 ° C (200 a 600 ° F). LTTD es una tecnología a gran escala que se ha demostrado su eficacia para remediar la contaminación de hidrocarburos de petróleo en todo tipo de suelo.

El mismo equipo probablemente podría cumplir con los requisitos más estrictos con modificaciones menores, si es necesario suelo descontaminado conserva sus propiedades físicas. A menos que se calienta al extremo superior de la gama de temperaturas LTTD, componentes orgánicos en el suelo no están dañadas, lo que permite suelo tratado para retener la capacidad de soportar la futura actividad biológica.

**4.5.2 Aplicabilidad.**

Sistemas de desorción térmica tienen distintos grados de eficacia frente a todo el espectro de contaminantes orgánicos. Los grupos contaminantes para los sistemas de LTTD son VOCs no halogenados y combustibles. La tecnología se puede utilizar para tratar SVOCs en eficacia reducida.

Los contaminantes para HTTD son SVOCs, PAHs, PCBs y pesticidas; sin embargo, compuestos orgánicos volátiles y combustibles también pueden ser tratadas, pero el tratamiento puede ser menos rentable. Los metales volátiles pueden eliminarse mediante sistemas HTTD.

La presencia de cloro puede afectar a la volatilización de algunos metales, como el plomo. El proceso es aplicable para la separación de compuestos orgánicos a partir de residuos de refinería, residuos de alquitrán de hulla, residuos de tratamiento de madera, suelos de creosota contaminados, los suelos contaminados con hidrocarburos, residuos (radioactivos y peligrosos) mixtos, los residuos de procesamiento de caucho sintético, pesticidas y residuos de pintura.

### **4.5.3 Limitaciones.**

Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y eficacia del proceso incluyen:

Existen requisitos específicos de tamaño de partículas y de manipulación de materiales que pueden afectar a la aplicabilidad o el costo en sitios específicos.

La deshidratación puede ser necesaria para lograr niveles aceptables de contenido de humedad del suelo.

Alimentación altamente abrasiva puede potencialmente dañar la unidad procesadora; los metales pesados en la alimentación pueden producir un residuo sólido tratado que requiere estabilización.

Arcilla y limo suelos y suelos de contenido húmicos altos aumentan el tiempo de reacción como un resultado de la unión de contaminantes.

### **4.5.4 Datos de rendimiento.**

La mayoría de los componentes de hardware para sistemas de desorción térmica son fácilmente disponibles. Todos los sistemas de tratamiento térmico del suelo ex situ emplean sistemas de alimentación similares que consisten en un dispositivo de cribado para separar y eliminar los materiales mayores de 5 centímetros (2 pulgadas), una cinta transportadora para mover el suelo proyectado desde la pantalla a la primera cámara de tratamiento térmico, y una cinturón de peso para medir la masa de suelo. Equipos de reducción de tamaño puede ser incorporado en el sistema de alimentación, pero su instalación se evita por lo general para reducir al mínimo el apagado como resultado de un fallo del equipo.

Muchos proveedores ofrecen unidades LTTD montados en un solo remolque. Tasas de rendimiento del suelo son típicamente 13 a 18 toneladas métricas (15 a 20 toneladas) por hora para suelos arenosos y menos de 6 toneladas métricas (7 toneladas) por hora para suelos arcillosos cuando más de 10% del material pasa a una pantalla de 200 de malla.

Las unidades con capacidades que van desde 23 a 46 toneladas métricas (25 a 50 toneladas) por hora requieren cuatro o cinco remolques para el transporte y 2 días para la configuración.

El tiempo para completar la limpieza del 18200-tonelada métrica (20.000 toneladas) Sitio "estándar" usando HTTD es poco más de 4 meses.

Pilas de almacenamiento de suelos y equipos de alimentación son generalmente cubiertos como protección contra la lluvia para reducir al mínimo el contenido de humedad del suelo y manejo de materiales problemas.

Los suelos y sedimentos con contenido de agua mayor que 20 a 25% pueden requerir la instalación de una secadora en el sistema de alimentación para aumentar el rendimiento del desorbedor y para facilitar el transporte de la alimentación al dispositivo de desorción.

Alguna volatilización de los contaminantes se produce en la secadora, y los gases se dirigen a una cámara de tratamiento térmico

#### **4.5.5 Costos**

La siguiente tabla representa los costos estimados (por unidad común de medida) para aplicar la tecnología de desorción térmica en los sitios de diferente tamaño y complejidad.

En la **Tabla 8**. Se detalla el costo estimado que incluye características específicas del sitio y los elementos de costos significativos que contribuyeron a los costos finales.

**Tabla 8.** Costo de Tratamiento Térmico Ex- Situ.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	DESORCIÓN TÉRMICA			
	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	ESCENARIO D
	SITIO PEQUEÑO		SITIO GRANDE	
	FÁCIL	DIFÍCIL	FÁCIL	DIFÍCIL
COSTO (USD) POR PIE CUBICO	\$ 2	\$ 7	\$ 1	\$ 3
COSTO (USD) POR METRO CUBICO	\$ 81	\$ 252	\$ 44	\$ 110
COSTO (USD) POR YARDA CUBICA	\$ 75	\$ 232	\$ 40	\$ 101

**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011. 89 p

#### 4.6 TRATAMIENTO FISICO QUIMICO EX-SITU

A continuación se describen dos tratamientos Fisicoquímicos Ex - situ (separación y lavado de suelos) empleado en campos petroleros.

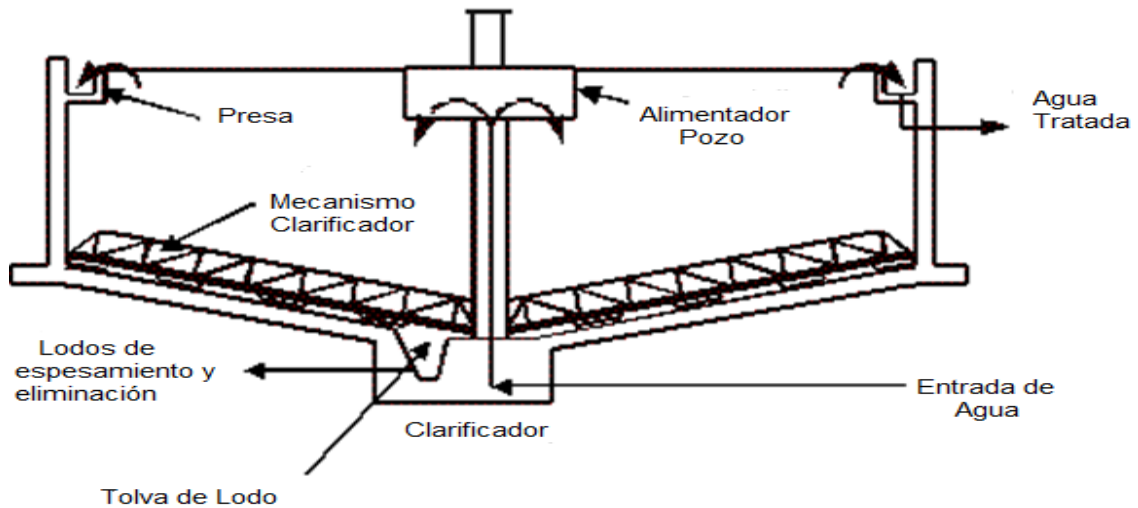
##### 4.6.1 Separación.

Esta técnica de proceso buscan para separar contaminantes de su medio (es decir, la, arena, material de suelo y / o la unión que los contiene La separación por gravedad es un proceso de separación sólido / líquido, que se basa en una diferencia de densidad entre las fases. El tamaño y la eficacia de la separación por gravedad Equipo depende de los sólidos y sedimentos , que es una función del tamaño de partículas , diferencia de densidad , la viscosidad del fluido , y la concentración de partículas ( sedimentación obstaculizada ) .

La separación por gravedad también se utiliza para la eliminación de fases de aceite inmiscibles, y para la clasificación donde se separan las partículas de diferentes tamaños. A menudo está precedida por coagulación y floculación para aumentar el tamaño de partícula, lo que permite la eliminación de partículas finas.<sup>29</sup>

<sup>29</sup> COOPER Kay, Remediación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química.{En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).

**Figura 23.** Equipo Empleado para la Separación.



**Fuente:** COOPER Kay, Remediación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química. {En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).

- **Separación magnética.**

La separación magnética se utiliza para extraer partículas radiactivas ligeramente magnéticas a partir de materiales huésped tales como agua, suelo, o aire. Todos los compuestos de uranio y plutonio son ligeramente magnéticos, mientras que la mayoría de los materiales son magnéticos.

El proceso opera mediante el paso de fluido o lodo contaminado a través de un volumen magnetizado. El volumen magnetizado contiene un material de matriz magnético tal como lana de acero, que extrae las partículas de contaminación ligeramente magnéticas de la suspensión.

- **Tamizado / Separación física.**

Tamizado y procesos de separación físicos utilizan diferentes tamices de tamaño y pantallas de concentrar eficazmente los contaminantes en volúmenes más pequeños.

La separación física: Se basa en el hecho de que la mayoría de los contaminantes orgánicos e inorgánicos tienden a unirse, ya sea química o físicamente, (es decir, arcilla y limo) fracción de un suelo. Las partículas de arcilla y limo del suelo son, a

su vez, unidos físicamente a las de arena y grava partículas más gruesas por compactación y adhesión.

Por lo tanto, la separación de las partículas de arcilla y limo fino de las partículas de suelo arena más gruesa y grava se concentraría eficazmente los contaminantes en un menor volumen de suelo que podrían luego ser tratada o dispuesto más.

#### **4.6.1.1 Aplicabilidad.**

Los grupos contaminantes para procesos de separación ex situ son SVOCs combustibles y sustancias inorgánicas (incluyendo radionúclidos). Las tecnologías se pueden utilizar en los COV y pesticidas seleccionados.

La separación magnética se utiliza específicamente sobre los metales pesados , radio nucleídos, y partículas radiactivas magnéticas, tales como compuestos de uranio y plutonio.

La separación física a menudo precede a tratamiento de extracción química basada en la suposición de que la mayor parte de la contaminación está ligada a la fracción más fina del suelo, que puede necesitar solo a tratar.

La separación también es útil cuando los contaminantes de metales pesados se producen en forma de partículas (por ejemplo, en rangos de armas pequeñas). Una de las ventajas de los procesos de separación física es que los altos caudales pueden alcanzarse con un equipo relativamente pequeña.

#### **4.6.1.2 Limitaciones.**

Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y eficacia de estos procesos incluyen:

- Alta arcilla y contenido de humedad aumentará el costo del tratamiento.

- Procesos de separación por gravedad se basan en una diferencia en los sólidos y densidades de fase líquida. Peso específico de las partículas afectará a resolver la eficiencia y velocidad de proceso. Además, la velocidad de sedimentación es dependiente de la viscosidad del fluido de suspensión, que debe ser conocido para estimar la eficacia del proceso y a los equipos de tamaño.
- Pueden ser necesarias medidas especiales para mitigar los problemas de olores, como resultado de lodos orgánicos que sufre condiciones sépticas.

#### **4.6.1.3 Datos de Rendimiento.**

La separación por gravedad y tamizado / separación física son a gran escala, tecnologías bien establecidas utilizados principalmente para el tratamiento de aguas residuales y el suelo contaminado, los sedimentos y lodos.

La separación magnética es una nueva técnica prometedora utilizada para eliminar los contaminantes de los suelos.

#### **4.6.2 Lavado de Suelos.**

Son vasados en su mayoría basados en técnicas de procesamiento de minerales, son ampliamente utilizados en el norte de Europa y América para el tratamiento de suelos contaminados.

El lavado del suelo es un proceso a base de agua para fregar suelos ex situ para eliminar los contaminantes. El proceso elimina los contaminantes de los suelos en una de las maneras *followingtwo*<sup>30</sup>

Disolviendo o suspendiendo en la solución de lavado (que puede ser sostenido por la manipulación química de pH durante un período de tiempo); o por concentrarlos en un menor volumen de suelo a través de la separación de partículas de tamaño,

---

<sup>30</sup> COOPER Kay, Remediación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química.{En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).

separación por gravedad, y el desgaste de lavado (similar a aquellas técnicas utilizadas en las operaciones de arena y grava).

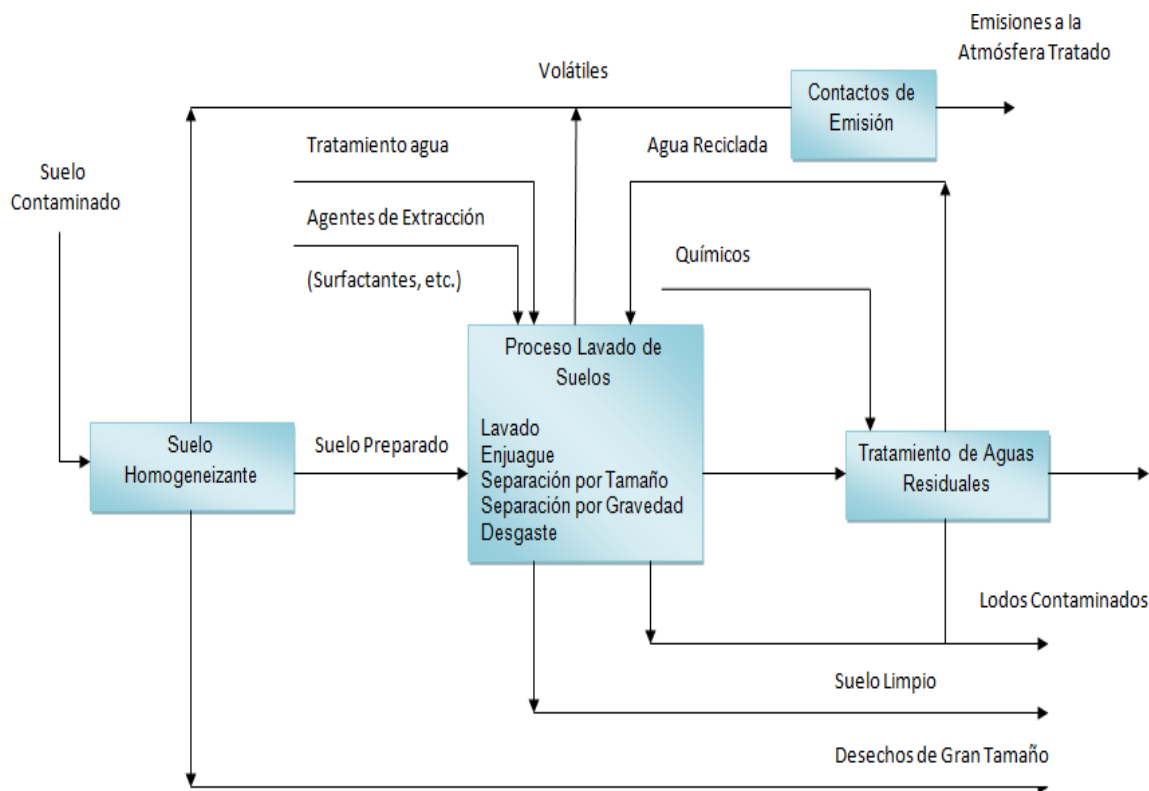
Sistemas de lavado de suelos que incorporan la mayoría de las técnicas de eliminación ofrecen la mayor promesa para su aplicación en suelos contaminados

El concepto de reducción de la contaminación del suelo mediante el uso de la separación de tamaño de partícula se basa en el hallazgo de que la mayoría de los contaminantes orgánicos e inorgánicos tienden a unirse, ya sea química o físicamente, a la arcilla, limo y partículas de suelo orgánicos. .

Los procesos de lavado que separan los finos (pequeñas) de arcilla y limo partículas de las partículas de arena y grava del suelo más gruesas se separan eficazmente y se concentran los contaminantes en un menor volumen de suelo que se puede tratar o desechar más.

La separación por gravedad es eficaz para la eliminación de partículas de gravedad específica altos o bajos, tales como compuestos que contienen metales pesados (plomo, óxido de radio, etc.). Desgaste de lavado elimina las películas de contaminantes adherentes a partir de partículas más gruesas. Sin embargo, el lavado de desgaste puede aumentar las multas en los suelos procesados. La fracción limpia, más grande puede ser de vuelta al sitio para su uso continuado.

**Figura 24.** Proceso Lavado de Suelos.



**Fuente:** COOPER Kay, Remedación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química. {En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).

El lavado del suelo se considera generalmente una tecnología de transferencia de los medios de comunicación. El agua contaminada generada a partir de lavado de suelos son tratados con la tecnología (s) adecuada para los contaminantes.

La duración del lavado del suelo suele ser corto y mediano plazo.

#### 4.6.2.1 Costos.

La información para el conductor costo y el costo de análisis fundamental se desarrolló en 2006 con el Acción Costo Ingeniería y Requerimientos de Remedación.

Principales factores de costo:

Economía de escala.

- Cantidad de material tratado tiene un gran impacto

Velocidad del procesador.

- También depende de la cantidad de residuos que se procesa.

#### 4.6.2.2 Análisis de costos.

La siguiente tabla representa los costos estimados (por unidad común de medida) para aplicar la tecnología de lavado de suelos en los sitios de diferente tamaño y complejidad. Una tabla más detallada estimación de costos que incluye características específicas del sitio y los elementos de costos significativos que contribuyeron a los costos finales se pueden ver haciendo clic en el enlace de abajo.

**Tabla 9.** Costo Por Lavado de Suelos.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	LAVADO DE SUELOS	
	ESCENARIO A	ESCENARIO B
	SITIO PEQUEÑO	SITIO GRANDE
	FÁCIL	DIFÍCIL
RELACIÓN DE PARAMETROS		
COSTO (USD) POR PIE CUBICO	\$ 5	\$ 2
COSTO (USD) POR METRO CUBICO	\$ 187	\$ 70
COSTO (USD) POR YARDA CUBICA	\$ 142	\$ 53

**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011.102 p.

#### 4.7 TRATAMIENTO TÉRMICO IN-SITU

A continuación se describe el tratamiento térmico (In situ) empleado para el manejo de residuos sólidos aceitosos generados en los procesos de la industria petrolera.

#### **4.7.1 Tratamiento térmico In situ**

Es un proceso de tratamiento que emplea como principio la aplicación de altas temperaturas facilitando la evaporación y eliminación del sólido contaminado.

A continuación se describe el tratamiento térmico In situ por incineración:

##### **4.7.1.1 Incineración.**

El suelo se quema a temperaturas entre 870 y 1200 °C en presencia de oxígeno para volatilizar y, posteriormente, destruir por oxidación térmica, compuestos halogenados y otros compuestos orgánicos refractarios principalmente, mientras que los metales no son destruidos.<sup>31</sup>

A menudo es necesario combustible adicional para iniciar la oxidación.

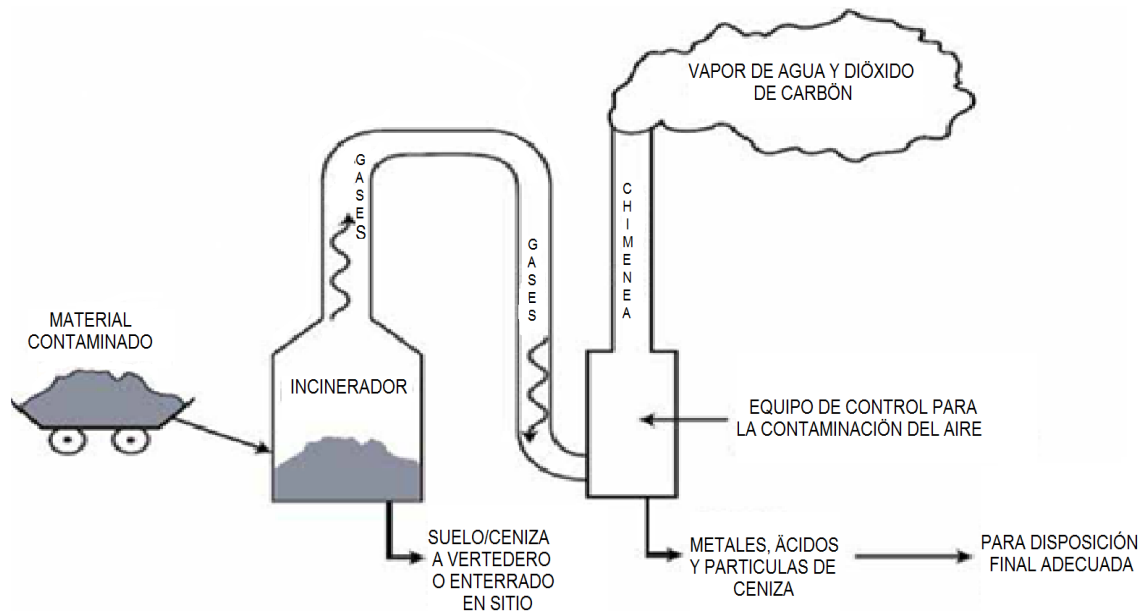
No se trata de una incineración común, sino que se trata de superponer al efecto clásico de la incineración la posibilidad de hacer reaccionar en la fase gaseosa, a elevadas temperaturas, el hidrógeno con los contaminantes orgánicos moléculas más pequeñas y ligeras, y menos tóxicas.

El proceso se lleva a cabo in-situ, es decir, se excava el suelo y se lleva a los incineradores. Los gases residuales procedentes de la combustión generalmente requieren ser tratados para eliminar cualquier metal, ácido o partícula de ceniza remanente.

---

<sup>31</sup> CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO, Jhon Anderson. Op. cit., p. 102.

**Figura 25.** Tratamiento de Suelos por Incineración.



**Fuente:** CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011. 108 p.

Tales desechos son nocivos y deben desecharse en forma adecuada en un vertedero autorizado. Los otros gases más limpios, como el vapor de agua y el dióxido de carbón, se liberan al aire a través de una chimenea.

El suelo o la ceniza remanente después de la incineración se pueden eliminar en un vertedero o enterrar en el sitio. La cantidad de material que requiere eliminación es muy inferior a la cantidad inicial de material contaminado. A continuación se muestra un esquema del funcionamiento del proceso:

Los tipos de incineradores más comúnmente empleados son:

- **Combustor de lecho circulante:**

Utiliza aire a alta velocidad para arrastrarla fuente alimento con los residuos y crear una zona de combustión sumamente turbulenta que destruya los hidrocarburos tóxicos. Esta turbulencia produce una temperatura uniforme alrededor de la cámara de combustión, de unos 760-870 °C, inferior a la de los

incineradores convencionales. En el CBC se mezcla completamente el material durante la combustión.

La mezcla eficaz y la temperatura de combustión baja reducen gastos de operación y las emisiones potenciales de gases como el óxido de nitrógeno (NOx) y el monóxido de carbono (CO).

- **Lecho fluidizado:**

Utiliza aire a alta velocidad para difundir y suspender las partículas. Funciona a temperaturas mayores a 870 °C. Otras unidades experimentales, como la unidad infrarroja, usa una resistencia eléctrica para calentar elementos o tubos, que a su vez calientan el material que pasa por la cámara sobre una cinta transportadora y funciona en temperaturas similares (mayores a 870 °C).

- **Combustión infrarroja:**

La tecnología de combustión infrarroja es un sistema de tratamiento térmico móvil que utiliza barras de carburo de silicio calentadas eléctricamente para elevar la temperatura de los compuestos orgánicos hasta la de combustión.

Los residuos se alimentan a la cámara primaria sobre la cinta transportadora y son expuestos al calor infrarrojo radiante (1000 °C) proporcionado por las barras de carburo de silicio. Un soplante proporciona aire en determinados puntos del recorrido seleccionados con anterioridad para controlar la tasa de oxidación. Cualquier residuo que quede sin quemar es incinerado en un dispositivo de postcombustión.

- **Hornos rotatorios:**

El horno rotatorio es un cilindro ligeramente inclinado que gira y que sirve como una cámara de combustión y funciona a temperaturas de más de 1000 °C.

La eficiencia de destrucción de residuos peligrosos está en torno al 99,99 %, elevándose a cifra hasta 99,9999 % para los PCB (Bifenilos Policlorados).

## 5. PLANTA SELECCIONADA PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE SÓLIDOS ACEITOSOS.

Debido a la generación de borras aceitosas en las piscinas de tratamiento del agua asociada a la producción de Campo Toldado y por el sobre costo del proceso de tratamiento de residuos sólidos, se realiza estudio detallado de los diferentes tipos de tratamientos de residuos sólidos., La alternativa que puede ser aplicada para la deshidratación y tratamiento del sólido aceitoso es la “Planta Tricanter de Tres Fases” (Ver **Anexo C**).

Se selecciona la planta Tricanter por ser una tecnología que permite realizar un tratamiento Físico – Químico IN SITU, permitiendo la deshidratación del sólido aceitoso en sus tres fases” agua crudo y lodo” y permite evacuar un volumen aproximado de 700 a 1000 barriles por día de lodo sin necesidad de sacar de línea el sistema de tratamiento de agua del campo.

Al realizar la deshidratación del sólido aceitoso en sitio, reduce el recurso económico asignado para el proceso de (biorremediación, transporte y gastos operacionales), a la vez optimiza la limpieza de las piscinas del tratamiento del agua asociada a la producción de Campo Toldado.

**Tabla 10.** Cuadro Comparativo con Propuesta Tricanter para el Tratamiento de Sólidos Aceitosos de Campo Toldado.

	ACTIVIDAD	COSTO BIORREMEDIACIÓN M3 (USD)	COSTO TRANSPORTE (USD)	COSTO (USD) HORAS EXTRAS	COSTO TOTAL TRATAMIENTO (USD)
MÉTODO ACTUAL PARA EL TRATAMIENTO DE 5281 m3	LIMPIEZA DE PISCINAS TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN ,RETIRO DE SÓLIDOS, TRANSPORTE EN CARRO TANQUE Y BIORREMEDIACIÓN EN AIPE	TARIFA ALTA (> 20.000 mgHC/kgSuelo) TARIFA DE BIORREMEDIACIÓN TARIFA ALTA M3 (\$ 52,45) VOLUMEN BIORREMEIDIADO M3 (2503)  COSTO \$131.279,85	TRANSPORTE X BARRIL \$ 2,39	\$ 6.274	\$ 272.921
		\$ 187.360,26	BLS TRANSPORTADOS 33.217		
DESHIDRATACIÓN EN TOLDADO 1 Y BIODEGRADACIÓN EN TOLDADO 2 PARA EL TRATAMIENTO DE 5281 m3	LODOS A DESHIDRATAR Y RECUPERAR DE FONDO DE PISCINAS EN OPERACIÓN  LODOS A TRASPORTAR Y BIODEGRADAR ENTRE TOLDADO 1 Y TOLDADO 2	TARIFA ALTA (< 19.000 mgHC/kgSuelo) TARIFA DE BIORREMEDIACIÓN TARIFA BAJA M3 (\$ 20,19) VOLUMEN BIORREMEIDIADO M3 (2778) COSTO \$56.080			
		COSTO LODOS A DESHIDRATAR Y RECUPERAR FONDO DE PISCINAS EN OPERACIÓN M3 (\$ 73,38) VOLUMEN DESHIDRATADO M3 (3165) COSTO \$ 232.247,7	TRANSPORTE X BARRIL \$ 5,12	NO HAY COSTO VA INCLUIDO EN LAS TARIFAS DESHIDRATACIÓN Y TRATAMIENTO	\$ 411.321
NUEVO MÉTODO TRATAMIENTO DE SÓLIDOS PARA IMPLEMENTAR CON PLANTA TRICANTE PARA EL TRATAMIENTO DE 5281 m3	LIMPIEZA DE PISCINAS TRATAMIENTO DE AGUA DE PRODUCCIÓN , LODOS A DESHIDRATAR Y RECUPERAR DE FONDO DE PISCINAS EN OPERACIÓN-RETIRO DE SÓLIDOS, TRANSPORTE EN VOLQUETA HERMETICA Y BIORREMEDIACIÓN EN AIPE	LODOS A BIODEGRADAR EN TOLDADO 2 M3 (2116) TARIFA DE BIORREMEDIACIÓN M3 (\$ 52.42) COSTO \$ 110.920,72	BLS TRANSPORTADOS 13311		
		LA DESHIDRATACIÓN DE SÓLIDOS LA REALIZA LA CUADRILLA DE PRODUCCIÓN DE CAMPO TOLDADO OPERANDO LA PLANTA TRICANTE  TARIFA ALTA (> 20.000 mgHC/kgSuelo) TARIFA DE BIORREMEDIACIÓN TARIFA ALTA M3 (\$ 52,45) LODOS A BIODEGRADAR EN PISTA DE TRATAMIENTO DE AIPE M3 (2000)	TRANSPORTE X BARRIL \$ 19,83		\$ 150.644
		\$ 110.984,20	\$ 39.660,00		

Al comparar las tres alternativas propuestas, podemos apreciar que en la primera opción el costo es elevado en; transporte, biorremediación y genera un alto riesgo físico al personal, en la segunda opción (IN SITU) el costo del tratamiento es elevado, porque se debe contar con unos permisos ambientales para realizar la biorremediación en sitio “locación de Toldado 2”y adecuar una área para la instalación de equipos y la ejecución de los trabajos que implica el tratamiento de biorremediación.

Con el tercer método “Planta Tricanter” el costo de tratamiento es menor debido a la alta eficiencia del proceso por el principio de separación que realiza el equipo al solido aceitoso, ofreciendo una alta relación costo/capacidad y a la vez reduce los riesgos y peligros de las personas involucradas en la operación de la planta Tricanter para proceso de tratamiento de sólidos en Campo Toldado.

## 6. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

### 6.1 EVALUACIÓN TÉCNICA

La planta de tratamiento Tricanter se ubicara en la estación Toldado y va ser instalada paralela a las piscinas de tratamiento del agua asociada a la producción del Campo.

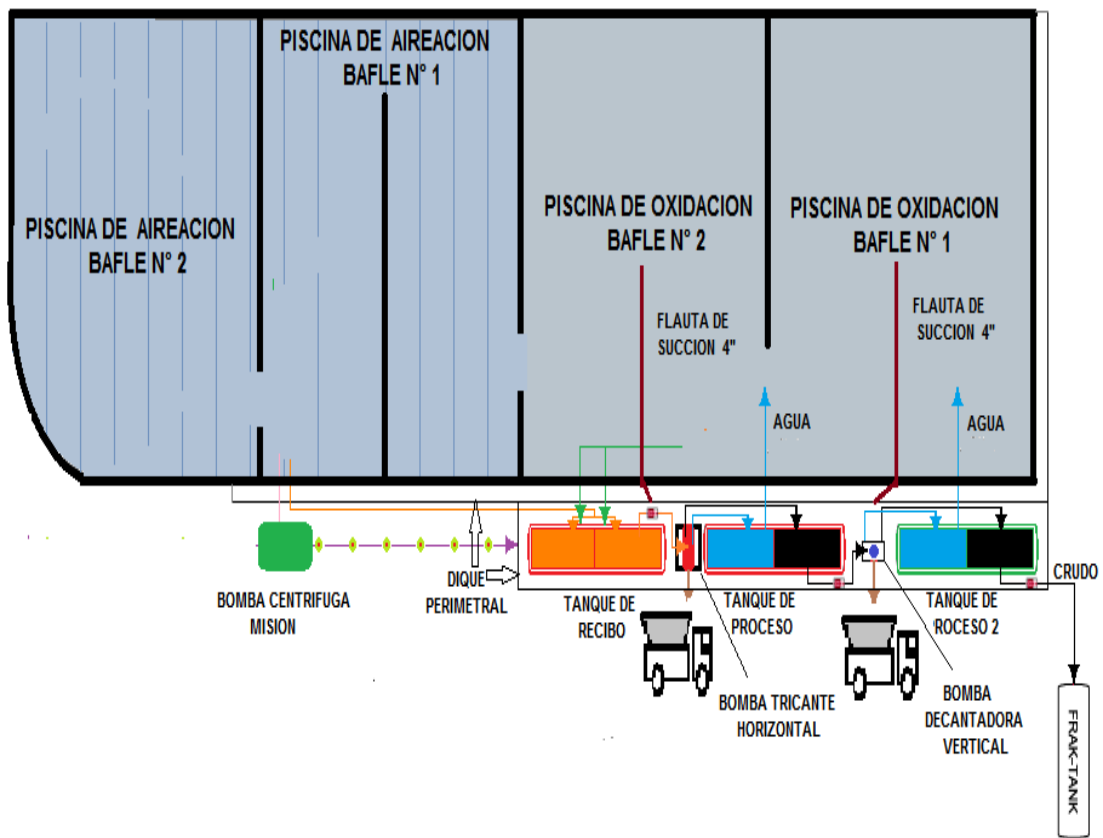
La determinación de instalar la planta de tratamiento Tricanter en paralelo por las siguientes razones:

- De esta manera se aprovecha las facilidades de superficie “Flautas de succión” instaladas en el fondo de las piscinas de Oxidación del tratamiento de agua de producción de la estación Toldado, las flautas de succión son tuberías de 4” SCH 40 que sirven para conectar el proceso y alimentar la Planta de tratamiento Tricanter (Ver **Figura 27**).
- Debido al espacio que ocupa la planta de tratamiento para la instalación de sus equipos y facilidades de superficie, la planta requiere de espacios libres en el área de proceso para el tránsito del personal de producción y de mantenimiento para realizar las diferentes actividades a la planta de tratamiento Tricanter.

**Figura 26.** Registro Fotográfico Piscinas Tratamiento de Agua de Producción.



**Figura 27.** Montaje e instalación de la Planta de Tratamiento Tricanter.



## **Equipos y personal requeridos para la operación de la planta:**

- 1 Tricanter (separación de 3 fases).
- Decanter vertical (separación de 3 fases).
- 2 Tanques escuadras (abiertos).
- Una bomba positiva (de engranajes).
- Adecuación civil menor en un área destinada para tal fin.
- Operador y (2) ayudantes (mínimo).
- 2 volquetas doble troques selladas.

### **6.1.1 PASOS PARA EL MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA TRICANTER EN LA ESTACIÓN TOLDADO.**

1. El proyecto iniciará con la construcción del dique perimetral para la contención de derrames de fluidos. Con las siguientes dimensiones: 30mts de longitud por 5 mts de ancho y 1 mts de alto.
2. Ubicación e instalación de tanques y bombas. “El izaje de los tanques lo realizara personal aliado del departamento de ingeniería”.
3. Construcción de líneas, prefabricados, conexiones eléctricas y alineación de equipos “tanque y bombas” el departamento de mantenimiento suministrara el personal de facilidades y CBM para realizar las actividades.
4. El Departamento de ingeniería solicitará a los proveedores de equipos inducción y capacitación para el personal de; Producción, mantenimiento y tratamiento químico para operación y mantenimiento preventivo de los equipos instalados en la planta de tratamiento de sólidos.
5. Para el arranque de la planta se realizará reunión en el pre arranque de la planta para realizar matriz de riesgos y procedimientos.

6. Personal de tratamiento químico para el día del arranque de la planta dosificará y ajustará el producto químico a utilizar para la inyección de química en el tanque de recibo de fluidos y verificará los parámetros de calidad del tratamiento de agua de producción.
7. Se realizará By Pass a la piscina de Oxidación y se deja en reposo “quieta” para que la borra aceitosa quede en fondo de la piscina.  
  
Luego se procede a conectar la bomba centrífuga misión para el achique del agua superficial, por un tiempo estimado de 4 horas.
8. Se realizará conexión de la planta Tricanter con las flautas de succión de 4” instaladas en la piscina para la prueba de operación y funcionamiento.
9. Personal de producción y tratamiento químico realizarán los respectivos ajustes a la prueba de operación y funcionamiento de la planta y realizarán informe de la prueba realizada.

Cuando inicie la operación de la planta de tratamiento de sólidos “Tricanter”. El proceso de tratamiento debe regirse a las; políticas, normas y procedimientos de la empresa Operadora del Campo, que permitan detectar y controlar desviaciones críticas en las condiciones de operación de los equipos de la planta ya que pueden llegar a ocasionar incidentes/accidentes que afecten la integridad de las personas o que causen daños al medio ambiente y/o atenten contra la integridad técnica de las propias instalaciones.

Por las razones expuestas anteriormente, antes de iniciar el proceso del tratamiento de sólidos aceitosos de Campo Toldado con la planta Tricanter, el personal de producción realizara reunión o charla operacional el de la planta. (Ver **Tabla 11**).

**Tabla 11.**Preoperacional Planta de Tratamiento Tricanter.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE SÓLIDOS TRICANTER			
INSPECCIÓN	ESTADO		OBSERVACIONES
	CONFORME	NO CONFORME	
FUGAS HIDRÁULICAS EXTERNA CENTRIFUGA TRICANTER Y DECANTER			
PARTE INTERNA TAMBOR CENTRÍFUGA TRICANTER Y DECANTER			
PARTE INTERNA TORNILLO SIN FIN CENTRÍFUGA TRICANTER Y DECANTER			
TORNILLERIA SOPORTE MOTOR ELÉCTRICO, CENTRÍFUGA TRICANTE Y DECANTER			
PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD TRICANTER Y DECANTER			
PRUEBA DE ARRANQUE DE MOTORES ELÉCTRICOS SIN CARGA			
PRUEBA DE VIBRACIONES-ARRANQUE EN VACIO BOMBA CENTRÍFUGA TRICANTER Y DECANTER			
VALVULAS POR FUGAS HIDRÁULICAS TUBERIA DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA			
NIVELES DE FLUIDO EN TANQUES DE PROCESO			
DIQUE PERIMETRAL			
NIVELES DE BOMBAS DE INYECCIÓN DE QUÍMICA			

### 6.1.2 Mantenimiento de Equipo.

Considerando la magnitud y la importancia del funcionamiento de la bomba centrífuga Tricanter en el proceso del tratamiento de sólidos, se realiza la planeación y programación de las rutinas del mantenimiento preventivo y predictivo, para la disponibilidad operativa del equipo. (Ver **Tabla 12**)

Para su normal operación y funcionamiento de la bomba centrífuga Tricanter es indispensable tener un óptimo estado del; motor eléctrico y de sus partes internas

(tornillo sin fin y del tambor) por ser componentes fundamentales de la Tricanter para realizar el principio de la separación del sólido aceitoso en su tres fases.

**Tabla 12.** Rutinas de Mantenimiento Equipos Planta Tricanter.

AREA	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN DE LA TAREA	FRENTE EJECUTOR	DURACIÓN ACTIVIDAD HRS
ESTACIÓN TOLDADO	PLANTA TRICANTER TRATAMIENTO DE SÓLIDOS	MENSUAL	INSPECCIÓN DE ACOMETIDAS ELECTRICAS Y POLOS A TIERRAS DE EQUIPO Y TANQUES DE PROCESO	ELÉCTRICO	2
			PRUEBAS A LOS MOTOR ELÉCTRICO Y PROTECCIONES.	ELÉCTRICO	3
		TRIMESTRAL	REVISIÓN ; ESTADO DE MANGUERAS , TENSIÓN DE CORREAS DE MOTORES ELÉCTRICOS,CORREAS BACK DRIVE	MECÁNICO	2
			REVISIÓN ESTADO DE RODAMIENTOS DEL ROTOR	MECÁNICO	3
			REALIZAR TOMA DE VIBRACIONES Y TERMOGRAFIA A EQUIPOS ELECTRICO Y MECANICOS	CONFIABILIDAD	3
			REVISIÓN ESTADO DE TAMBORES	MECÁNICO	1
			TOMA DE DATOS DE VARIADORES DE VELOCIDAD	ELÉCTRICO	1
		SEMESTRAL	TOMA DE MUESTRA DE ACEITE	INSTRUMENTACIÓN	1
			REVISION DE ESTADO DE VALVULAS DE LA PLANTA	INSTRUMENTACIÓN	2
			REVISIÓN BALANCEO DINAMICO DE LOS TORNILLOS SIN FIN DE LAS CENTRIFUGAS TRICANTER Y DECANTER	MECÁNICO	2
			REVISIÓN BALANCEO IMPULSOR AJUSTBLE CENTRIFUGAS TRICANTER Y DECANTER	MECÁNICO	1
			REVISIÓN SISTEMA DE SELLADO "RODAMIENTOS Y RETENEDORES" CENTRIFUGAS TRICANTER Y DECANTER	MECÁNICO	2

El mantenimiento predictivo y preventivo de los equipos de la Tricanter no genera ningún costo por que el personal de mantenimiento de Campo Toldado los realizara, Si la bomba centrifuga Tricanter requiere de mantenimiento correctivo antes de las 1.000 horas de operación, el departamento de ingeniería y mantenimiento de la Superintendencia de Operaciones Huila Tolima (SOH), solicitaran al proveedor; garantía del equipo, análisis de la fallan y capacitación al personal de mantenimiento de Campo Toldado.

Una forma de calcular el tiempo de vida media de los equipos es tomando el tiempo de las primeras 1.000 horas de trabajo de la planta tricanter este dato se toma por la vida útil que tiene los elementos internos reemplazables debido al desgaste que sufren las partes del equipo. Luego se realiza la proyección de

operación de la planta Tricanter en un año, el tiempo es en horas de trabajo del equipo (Ver **Tabla 13**). Con el primer y segundo dato los dividimos y obtenemos el tiempo estimado de vida media del equipo Tricanter que son 14 años.

**Tabla 13.** Proyección de Operación Bomba Centrífuga Tricanter.

ACTIVIDAD	TIEMPO EN REALIZAR LA ACTIVIDAD (HORAS)	FRECUENCIA DE LA ACTIVIDAD EN EL AÑO	TIEMPO DE OPERACIÓN DE LA BOMBA CENTRÍFUGA TRICANTER (HORAS)
DESHIDRTACIÓN DE SÓLIDOS ACEITOSOS DE LAS PISCINAS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA ASOCIADA A LA PRODUCCIÓN DE CAMPO TOLDADO CON PLANTA TRICANTE	18	4	72

### 6.1.3 Costos Operativos.

El método propuesto optimización el proceso de tratamiento de sólidos con la planta Tricanter y no generan horas extras del personal de producción por la actividad de operación del equipo. En las **Tabla 14** y **Tabla 15**, se relacionan los costos de operación de la planta tricanter para el tratamiento de sólidos aceitoso de Campo Toldado.

**Tabla 14.** Costo Personal Operación Planta Tricanter.

ESTACIÓN	ACTIVIDAD	FRECUENCIA DE LA ACTIVIDAD POR AÑO	PERSONAL DE PRODUCCIÓN REQUERIDO PARA REALIZAR LA ACTIVIDAD	ACTIVIDAD A REALIZAR	COSTO HORA HOMBRE (USD)	HORAS EMPLEADAS POR AÑO	COSTO TOTAL HORA HOMBRE (USD)
TOLDADO	OPERACIÓN PLANTA TRICANTER PARA EL TRAMIENTO DE SÓLIDOS ACEITOSOS	TRIMESTRAL	CAPATAZ DE CUADRILLA	OPERADOR PLANTA TRICANTER	\$ 3,82	72	\$ 274,80
			AUXILIAR DE PRODUCCIÓN	CONEXIÓN Y VERIFICACIÓN LÍNEA DE ALIMENTACIÓN DEL PROCESO CON PLAN TRICANTER	\$ 3,82	72	\$ 275,04
			TÉCNICO DE CUADRILLA	APOYO AL CAPATAZ Y REVISAS FUGAS HIDRÁULICAS DE EQUIPOS	\$ 2,58	72	\$ 185,76
			AUXILIAR DE CUADRILLA	APOYO AL AUXILIAR DE PRODUCCIÓN EN LA ACTIVIDAD	\$ 2,58	72	\$ 185,76
			AUXILIAR DE CUADRILLA	REVISAS NIVELES DE FLUIDO Y SÓLIDO EN TANQUES DE PROCESO	\$ 3,06	72	\$ 219,96
			TECNICO TRATAMIENTO QUÍMICO	DOSIFICACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS PARA LA SEPARACIÓN DEL SÓLIDO ACEITOSO	\$ 3,89	72	\$ 279,94
<b>COSTO TOTAL</b>							<b>\$ 1.421,25</b>

**Tabla 15.** Costo Consumo de Energía Equipo.

EQUIPO	CONSUMO DE ENERGÍA DE EQUIPO Kw/h	HORAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO POR AÑO	VALOR Kw/h (USD)	COSTO CONSUMO DE ENERGÍA (USD)
VARIADORES DE FRECUENCIA	140	72	\$ 0,157	\$ 1.578,528
MOTORES ELÉCTRICO	112	72	\$ 0,156	\$ 1.257,984
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>\$ 2.836,51</b>

## 7. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para realizar la evaluación económica del proyecto, se tienen en cuenta 3 indicadores importantes: Valor Presente Neto, Relación Costo-Beneficio y Tasa Interna de Retorno.

### 7.1 FLUJO DE CAJA NETO (FCN)

Representa la diferencia entre los ingresos del proyecto mensuales (provenientes de la producción de crudo) menos los egresos del proyecto.

### 7.2 VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Representa el valor del Flujo de caja neto (Ingresos – Egresos) del proyecto luego de terminado el tiempo de evaluación de este. Es sabido que el dinero sufre depreciaciones a lo largo del tiempo, en función de las tasas de interés del mercado, para lo cual se debe pasar a valor presente mediante la ecuación 1. En esta ecuación,  $i$  representa la tasa de oportunidad la cual es asumida 10%, y  $n$  representa el tiempo en meses.

**Ecuación 1.** Expresión matemática de Valor Presente Neto.

$$VPN = \frac{\text{Flujo de Caja Neto}}{(1 + i)^n}$$

**Fuente:** BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Valor Presente Neto. Capítulo 9. Fondo Educativo Panamericano. Octava Edición. p.197 [PDF].

### 7.3 RELACIÓN COSTO BENEFICIO (RCB)

Proviene del cociente de todos los ingresos acumulados del proyecto sobre todos los egresos acumulados del proyecto, tal y como lo muestra la **Ecuación 2**. Este valor simboliza de manera aproximada, cuánto dinero se recibe por cada unidad invertida.

Por ejemplo, si la RCB del proyecto es 1,45, significa que por cada peso invertido se están recuperando 1,45 pesos.<sup>32</sup>

**Ecuación 2.** Expresión Matemática Costo/Beneficio.

$$RCB = \frac{\Sigma \text{ Ingresos}}{\Sigma \text{ Egresos}}$$

**Fuente:** BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Costo Beneficio. Capítulo 12. Fondo Educativo Panamericano. Octava Edición. p.197 [PDF].

#### **7.4 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR):**

Es la tasa de descuento con la que el valor actual neto o valor presente neto (VPN) es igual a cero.

La TIR puede utilizarse como indicador de la rentabilidad de un proyecto: a mayor TIR, mayor rentabilidad; así, se utiliza como uno de los criterios para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión.

Para ello, la TIR se compara con una tasa mínima o tasa de corte, el coste de oportunidad de la inversión (si la inversión no tiene riesgo, el coste de oportunidad utilizado para comparar la TIR será la tasa de rentabilidad libre de riesgo).

Esta se puede calcular mediante el uso de la ecuación 3, o mediante métodos iterativos, variando  $i$  hasta que el VPN sea igual a 0.

**Ecuación 3.** Expresión matemática Tasa Interna de Retorno.

$$VPN = \Sigma \frac{FCN}{(1 + TIR)^n} = 0$$

**Fuente:** BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Tasa interna de retorno<sup>11</sup>. Fondo Educativo Panamericano. Octava Edición. p.197 [PDF].

---

<sup>32</sup> BACA. Guillermo. Ingeniería Económica. Costo Beneficio. Capítulo 12. Fondo Educativo Panamericano. Octava Edición. p.197 [PDF].

## 7.5 ANÁLISIS DE INVERSIÓN

En esta sección se presenta el análisis de inversión para el montaje de la planta de tratamientos de borras aceitosas para Campo Toldado.

- **CAPEX. (Capital Expenditures o inversiones en capital).**

Hace referencia a las inversiones realizadas por una empresa con el objetivo de mantener, adquirir o mejorar los activos no corrientes durante su vida útil.

Para efectuar la viabilidad del montaje de la planta de tratamientos de sólidos, se tienen en cuenta inversiones directas, materiales y costos fijo por administración, como se muestra en la **Tabla 16**.

## 7.6 ANÁLISIS DE COSTOS

A continuación se presenta el análisis de costos para el montaje de la planta de tratamiento de borras aceitosas en Campo Toldado.

- **OPEX. (Operational Expenditures o costos de operación).**

Hace referencia a los costos operativos es decir a los costos asociados al mantenimiento de equipos y gastos de funcionamiento necesarios para la producción y el funcionamiento del negocio a lo largo de su vida útil.

Para la viabilidad del montaje del proyecto se tienen en cuenta costos de operación como la producción de agua, mantenimiento de los pozos, entre otros.

**Tabla 16.** Costos de Producción de un Barril de Crudo.

<b>COSTO BARRILES DE PETRÓLEO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTO UNITARIO (USD/Bbl)</b>
<b>MANO DE OBRA DIRECTA E INDIRECTA</b>	
SALARIOS	\$2,21
PRESTACIONES SOCIALES	\$0,82
CAPACITACIONES	\$0,20
<b>Subtotal</b>	<b>\$3,23</b>
<b>SERVICIOS INDUSTRIALES</b>	
AGUA POTABLE	\$0,10
ELÉCTRICIDAD	\$4,00
<b>Subtotal</b>	<b>\$4,10</b>
<b>SERVICIO DE MANTENIMIENTO</b>	
MANTENIMIENTO	\$5,30
MATERIALES	\$2,19
<b>Subtotal</b>	<b>\$7,49</b>
<b>TRATAMIENTO QUÍMICO</b>	
CRUDO	\$1,00
AGUA	\$2,00
<b>Subtotal</b>	<b>\$3,00</b>
<b>OBRAS CIVILES Y BIORREMEDIACIÓN</b>	
TRATAMIENTO DE BORRAS	\$2,20
CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES	\$1,10
<b>Subtotal</b>	<b>\$3,30</b>
<b>TRANSPORTE DE FLUIDOS</b>	
Transporte de Fluidos	\$2,50
<b>OTROS</b>	
<b>Subtotal</b>	<b>\$2,50</b>
<b>TOTAL COSTO DE LEVANTAMIENTO (LIFTING COST)</b>	<b>\$21,12</b>

**Fuente:** ECOPETROL S.A., Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima, 2015. Modificado por el autor.

## 7.7 ANÁLISIS DE INGRESOS

De acuerdo al Banco de la República los ingresos hacen referencia a todas las entradas de dinero que recibe una persona, familia, empresa, organización, entre otras por realizar cierta actividad. Para este proyecto los ingresos corresponden a la venta de barriles, actualmente ECOPETROL S.A. tiene en cuenta el marcador de referencia Brent ya que el campo de estudio produce crudo pesado.

Adicionalmente es importante recalcar que el precio de venta del crudo producido para el Campo Toldado es de \$35,21 dólares por barril (\$USD/Bbl) precios establecidos por la compañía.

**Tabla 17.** Proyección Producción Neta Campo Toldado.

AÑOS	PRODUCCIÓN NETA	PRECIO DE REFERENCIA (USD \$)	TOTAL DE INGRESOS (USD \$)
1	547.500	35,21	\$ 19.277.475,00
2	543.850	35,21	\$ 19.148.958,50
3	540.200	35,21	\$ 19.020.442,00
4	536.550	35,21	\$ 18.891.925,50
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 76.338.801,00</b>

**Tabla 18.** Proyección Costo Barril de Petróleo - Campo Toldado.

				AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
Precio Venta Crudo:			USD\$ / Bbl	31	32	33,0	34,1
Costos Fijos por Administración:	100.000	USD\$/MES	USD\$ AÑO	1.200.000	1.238.640	1.278.524	1.319.693
Costos Variables:			USD\$ / Bbl	27,0	27,9	28,8	29,7
(de la producción y tratamiento del crudo)			USD\$ /Año	11.826.000	12.125.419	12.431.858	12.745.460

**Tabla 19.** Pronóstico Total de Producción por Barril de Petróleo.

			AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
Pronósticos de Producción Anual:		Bbls	547.500	543.850	540.200	536.550
Costo Anual Limpieza de piscinas y Biorremedacion de Borrás.	Sin Inflación	USD\$	90.000	450.000	500.000	600.000
Regalías:	20%	Bbls	109.500	108.770	108.040	107.310
Pronóstico Producción Anual Sin Regalías:		Bbls	438.000	435.080	432.160	429.240

**Tabla 20.**Costo de inversión Proyecto Planta Tricanter Campo Toldado.

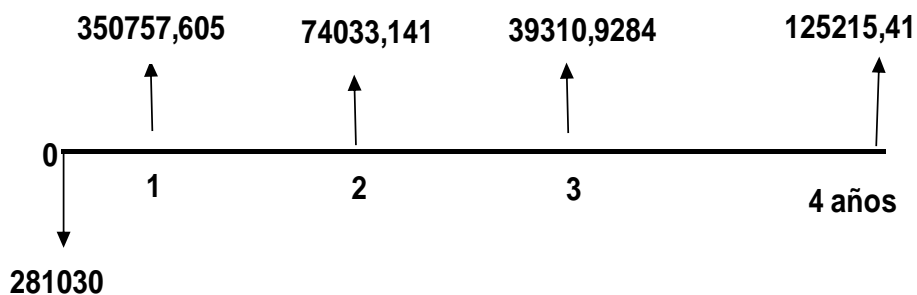
ACTIVIDAD	SUBACTIVIDAD	COSTO (USD \$)
<b>1. OBRAS CIVILES</b>	1.1 Construcción Dique perimetral planta de tratamiento Tricanter	\$ 36.100
	<b>TOTAL OBRAS CIVILES</b>	<b>\$ 36.100</b>
<b>2.2.COMPRAS DE EQUIPOS Y FACILIDADES DE PRODUCCIÓN</b>	2.1 Tanque de procesos N° 1 para recepción de fluidos	11.610
	2.2 Tanque de procesos N° 2 para recepción de fluido	11.610
	2.3 Bomba Centrífuga Tricanter.	60.000
	2.4 Bomba Centrífuga Decanter.	20.400
	2.5 Set de accesorios (Mangueras, acoples y conexiones eléctricas),	795
	<b>TOTAL FACILIDADES DE PRODUCCIÓN</b>	<b>\$ 104.415</b>
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>		<b>\$ 140.515</b>

**Tabla 21.** Flujo de Caja Neto del Proyecto.

Conceptos \ Años	0	1	2	3	4
Ventas Proyectadas		13.578.000	13.921.777	14.273.615	14.633.676
- Costos Variables		-11.826.000	-12.125.419	-12.431.858	-12.745.460
- Costos Fijos por Administración		-1.200.000	-1.238.640	-1.278.524	-1.319.693
- Costos Fijos por limpieza de piscinas y Biorremediación		-90.000	-464.490	-516.100	-619.320
- Depreciación 104.415		-26.104	-26.104	-26.104	-26.104
- Amortización por Inversión 36.100		-9.025	-9.025	-9.025	-9.025
<b>Utilidad Operativa</b>		<b>426.871</b>	<b>58.100</b>	<b>12.004</b>	<b>-85.925</b>
- Impuestos (25%) 25%		-106.718	-14.525	-3.001	21.481
Utilidad operativa después de Imp		320.153	43.575	9.003	-64.444
+ Depreciación		26.104	26.104	26.104	26.104
+ Amortización por Inversión		9.025	9.025	9.025	9.025
<b>Flujo de caja operativo</b>		<b>355.282</b>	<b>78.703</b>	<b>44.132</b>	<b>-29.315</b>
- Inversión	-140.515				
- Inversión incremental en capital de trabajo	-140.515	-4.525	-4.670	-4.821	
+ Recuperación capital de trabajo					154.531
<b>Flujo Neto del Proyecto</b>	<b>-281.030</b>	<b>350.758</b>	<b>74.033</b>	<b>39.311</b>	<b>125.215</b>
<b>Flujo de Caja Descontado</b>		311.286	58.309	27.477	77.673
<b>Acumulado</b>	-281.030	30.256	88.565	116.042	193.715
	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>
<b>Cuadro Resumen del flujo monetario del Proyecto</b>	<b>-281030</b>	<b>350757,6</b>	<b>74033,141</b>	<b>39310,928</b>	<b>125215,410</b>

## 7.8 DIAGRAMA TIEMPO / VALOR

**Figura 28.** Diagrama Tiempo / Valor.



TIR del Proyecto 58,28% Mayor a:  
 VPN del Proyecto 193.715 Es viable  
 VPN < 1 año. (254.178) Es viable porque la inversión se recupera menor a 1 año

## **7.9 CONCLUSIONES DIAGRAMA TIEMPO / VALOR**

El VPN del Proyecto es de US\$ 193.715 siendo viable, el TIR del Proyecto es de 58,28 % siendo MAYOR a la Tasa Mínima de Rendimiento.

El Periodo de Pago o Restitución, consiste en el tiempo que se demora el proyecto en recuperar la inversión del mismo. Este valor es menor a 1 año, El VPN al primer año es de USD 254.178.

## 8. CONCLUSIONES

Después de analizar la información, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Con la aplicación de la tecnología Tricanter, optimiza el tratamiento de sólidos aceitoso, reduce el costo de biorremediación, transporte y gastos operacionales, mejora las condiciones de calidad del agua vertida a la fuente hídrica.
- Con la (PLANTA TRICANTER) procesa un volumen alrededor de 700 a 1000 barriles de desechos diarios, con otras tratamientos o tecnologías necesitan de un mayor tiempo para la deshidratación del sólido y en algunos casos de años, incluyendo el tiempo de monitoreo y supervisión, lo que incurre en sobre costos operativos.
- Un punto a favor del tratamiento con Planta Tricanter es; que no elimina el hidrocarburo. Debido a la separación del sólido aceitoso en sus tres fases, con la recuperación del hidrocarburo en el mejor de los casos podría dar una rentabilidad. .
- Al entrar en funcionamiento y operación la planta Tricante habrá una disminución de riesgos y peligros laborales al personal que realiza la operación del equipo, Debido a la facilidad que se realiza en el proceso de deshidratación, cargue de sólido y limpieza de las piscinas de tratamiento del agua residual de producción.

## 9. RECOMENDACIONES

- En la búsqueda de continuar mejorando el proceso de tratamiento de sólidos de Campo Toldado, es importante revisar la dosificación y los productos químicos inyectados en pozos y facilidades de superficie para el tratamiento químico del crudo y del agua residual de producción, debido a la alta generación de sólidos aceitosos en las piscinas del tratamiento del agua de producción.
- Realizar el pre operacional establecido de la Planta Tricanter, para obtener un resultado óptimo en la función de separación de las tres fases del sólido aceitoso en el proceso de tratamiento de sólidos.
- Se recomienda capacitar al personal de mantenimiento de Campo Toldado. Para el mantenimiento tanto preventivo como correctivo de los equipos Tricanter y Decanter para que realicen “cambios de rodamientos, retenedores, alineación y balanceo dinámico del eje impulsor sin fin y del cambio de las partes internas del tambor por desgaste.

## BIBLIOGRAFIA

- AMG DE COLOMBIA LTDA, Informe resultado Muestra de Borrás.. [PDF]. Bogotá Octubre 2015.
- BACA. Guillermo. Fondo Educativo Panamericano. Ingeniería Económica. [PDF]. ed 8. [s.f]. [s.l]. [s.n]. 197 p.
- BerakahEnergy S.A.S.Reporte caracterización. [PDF]. Marzo 2015.
- CLARIANT, Informe proceso de tratamiento químico Toldado. [PDF].
- CASTELBLANCO Iván Fernando, NIÑO Jhon Anderson. Manejo y Tratamiento Actual de Residuos Aceitosos en la Industria Petrolera Colombiana. Trabajo de grado ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Químicas. Escuela de Ingenierías de Petróleos 2011.
- ECOPETROL S.A, Presentación Coordinación Tolima. .[PDF]. 2013.
- ECOPETROL S.A, Presentación Gerencia Regional Sur Superintendencia de Huila – Tolima Coordinación de Producción [PDF]. Tolima. 2014.
- ECOPETROL S.A, Presentación Esquema General de Operación. [PDF]. Tolima 2015.
- ECOPETROL S.A. Manual de operaciones de la Estación Toldado.[PDF]. Tolima.
- FLOTTWEG SEPARATION TECHNOLOGY, Tricanter para procesos de separación en tres fases, {en línea}, Disponible en (<https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/tricanter/>).

- FLOTTWEG SEPARATION TECHNOLOGY, CENTRÍFUGA DECANTADORA {en línea}, Disponible en ([https://www.flottweg.com/fileadmin/user\\_upload/data/pdf-downloads/Tricanter\\_ES.pdf](https://www.flottweg.com/fileadmin/user_upload/data/pdf-downloads/Tricanter_ES.pdf)).
- FRTR, Tecnologías de Biorremediación, Portal de Referencia, Ex Situ tratamiento Biológico {en línea}, Disponible en, (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-12.html>).
- FRTR, Tecnologías de Biorremediación, Portal de Referencia, Ex Situ Físico/Químico {en línea}, Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>), (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html>).
- Superintendencia de Operaciones Huila-Tolima. [PDF]. Bogotá. [s.n]. 2015. 29 p.
- COOPER Kay, Remediación tecnologías de detección, Ex Situ Física / Química. {En línea} . {8 de marzo de 2010}. Disponible en (<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-18.html>).
- UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Mérida, Venezuela, Jair Alexander Tusso Espinel “Estudio de Factibilidad para la Implementación de Nuevas Tecnologías de Tratamiento de agua de Producción en Campo Rubiales”. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga, 2014.

## ANEXOS

### ANEXO A. PISCINAS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA DE CAMPO TOLDADO SATURADAS CON BORRAS ACEITOSAS





**ANEXO B. LIMPIEZA DE PISCINAS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA  
REALIZADA POR PERSONAL DE PRODUCCIÓN**





**ANEXO C. CARACTERIZACIÓN SÓLIDOS ACEITOSOS PISCINAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA ASOCIADA A LA PRODUCCIÓN DE TOLDADO**





## ANEXO D.FICHA TÉCNICA CENTRIFUGAS TRICANTER Y DECANTER



**TECNOLOGÍA CENTRÍFUGA FLOTTWEG  
PARA EL PROCESAMIENTO DE LODOS QUE  
CONTIENEN HIDROCARBUROS**

Abra un nuevo y rentable pozo petrolífero



El procesamiento del petróleo crudo en refinerías y en plantas petroquímicas genera aguas residuales que contienen hidrocarburos. Para procesar estas aguas, hay que separarlas en sus componentes aceite, agua y sólidos. Debido a la incrementada importancia que presenta el aceite, el objetivo principal de la recuperación radica en recuperar la mayor cantidad de aceite y en desechar otros componentes como agua y sólidos de manera eficiente.

El primer paso que se realiza es la separación mediante separadoras estáticas. El aceite se concentra como capa flotante en la superficie, mientras los sólidos bajan hacia el fondo de los separadoras API como lodos. Debido a esto, se produce una fase líquida entre estos dos componentes. La capa flotante proveniente de la superficie y los lodos provenientes del fondo de la separadora estática explicada anteriormente, se juntan y son procesados como lodos aceitosos. De acuerdo con estos puntos, el Tricanter® Flottweg es el único que permite la separación continua de mezclas de tres fases en los componentes aceite, agua y sólidos en una sola etapa.

El pre-tratamiento del aceite utilizando un Tricanter® es decisivo para la eficiencia del proceso. La viscosidad del aceite es reducida mediante calentamiento, además es posible añadir polielectrolitos precipitantes para mejorar la separación de partículas finas. En primer lugar, la fase acuosa proveniente de la separadora API\* llega a una planta de flota-

ción donde los sólidos y el aceite restante son separados. Los sólidos flotantes que han sido separados y el aceite pueden ser procesados posteriormente junto con el lodo de aceite.

El tratamiento de aguas residuales se realiza en una depuradora mecánica – biológica. Este tratamiento genera lodos residuales, los mismos que deben quedar lo más secos posible a fin de reducir los costos de transporte, desechos o incineración. El Decanter Flottweg HTS ha sido diseñado y fabricado especialmente para cumplir con estos propósitos. No solo se utiliza para la alta deshidratación de lodos de aguas residuales sino que es la solución perfecta para ser usado en depuradoras comunales o industriales.

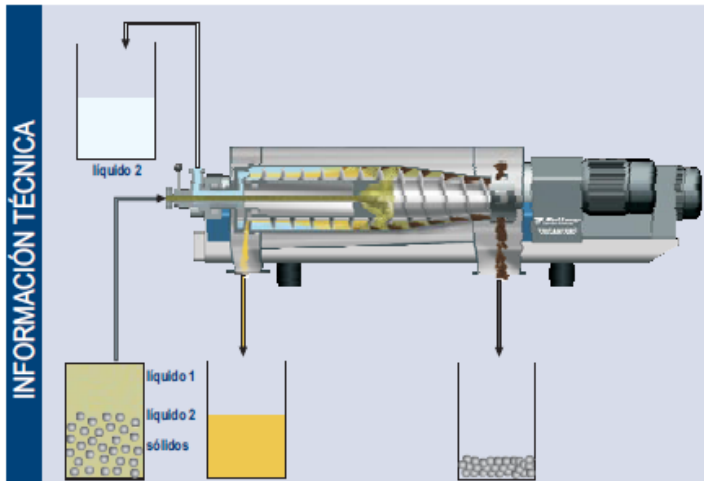
Para obtener una visión más detallada sobre la utilización de la Tecnología de Separación Flottweg en el procesamiento de aguas residuales que contienen hidrocarburos, por favor observe el esquema de un proceso típico en la siguiente página.

*\*American Petroleum Institute =  
Instituto Americano del Petróleo*

## PRINCIPIO DE SEPARACIÓN DE LAS FASES - CENTRIFUGA TRICANTER

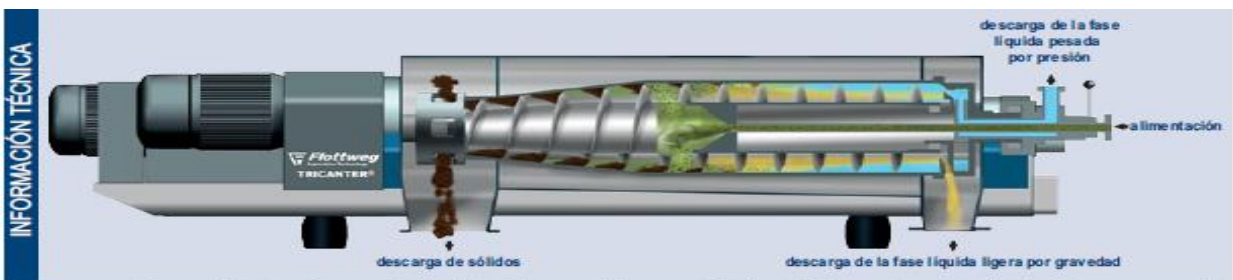
El Tricanter® Flottweg permite separaciones de mezclas de tres fases, es decir, la separación simultánea de dos fases líquidas no miscibles con diferentes densidades y una fase sólida la cual es la más pesada de todas las fases. El proceso de funcionamiento es similar a la de un decanter. La diferencia más importante, en comparación con el decan-

ter, es básicamente la descarga separada de ambas fases líquidas.



### Ventajas del rodete centrípeto

- Es posible realizar un ajuste exacto y variable de la profundidad de la laguna y de la columna de líquido obteniendo óptimos resultados.
- Se puede prescindir de una bomba transportadora lo que resulta en costos reducidos.
- Lectura simple y sencilla de la escala – ajuste sencillo



Tricanter® Flottweg (Decanter de tres fases); descarga del concentrado; fase líquida pesada por presión; fase ligera por gravedad

### NO IMPORTA SI LA CONCENTRACIÓN EN LA ALIMENTACIÓN VARÍE

El Tricanter® Flottweg descarga el líquido más denso a presión mediante el rodete ajustable y la fase ligera la descarga por gravedad. La ventaja que ofrece el rodete ajustable es que permite ajustar la posición de la zona de separación en la máquina y por consiguiente el grado

de separación mientras la máquina está en funcionamiento. Esto permite alcanzar el más alto grado de pureza de los líquidos, de manera tal que, en algunas aplicaciones no se requieran realizar etapas de separación posteriores.



TECHNICAL INFO



zona de separación 1



zona de separación 2

# SEPARACIÓN DE DOS FASES

## El Decanter Flottweg

### ALIMENTACIÓN

El producto a ser separado se introduce a través de un tubo de alimentación central y es conducido a la zona de alimentación del tornillo sinfín. Desde ahí, el producto es acelerado suavemente (en dirección circunferencial) y se dirige e ingresa en el tambor centrifugo a través de las puertas de distribución.



### TORNILLO SINFÍN

El tornillo sinfín gira a una velocidad diferencial relativamente superior a la del tambor y transporta los sólidos depositados en la pared del tambor hacia la parte cónica y final del tambor. La velocidad diferencial determina el tiempo de permanencia de los sólidos en el tambor. El tiempo de permanencia es una variable importante para el secado de los sólidos que se quiere alcanzar y puede ser ajustada automáticamente cambiando la velocidad diferencial del tornillo sinfín para obtener, de esta manera, la separación óptima y deseada. Mediante el reemplazo simple del tornillo sinfín u otras modificaciones técnicas, los Decaners Flottweg pueden ser ajustados a las características del producto. De esta manera, siempre existe la posibilidad de escoger entre tornillos sinfín con diferentes inclinaciones o entre tornillos sinfín con diferentes tamaños de paso.



### TAMBOR

El tambor tiene una forma cónica y cilíndrica y gira a una velocidad determinada según las necesidades de la aplicación. En el tambor, la suspensión alcanza la velocidad completa formando una capa concéntrica en la pared del tambor. Los sólidos contenidos en el producto son depositados en la pared del tambor por efecto de la fuerza centrífuga. La longitud del tambor cilíndrico, así como el ángulo de la parte cónica, pueden ser seleccionados y adaptados de acuerdo a los requerimientos específicos de cualquier aplicación.

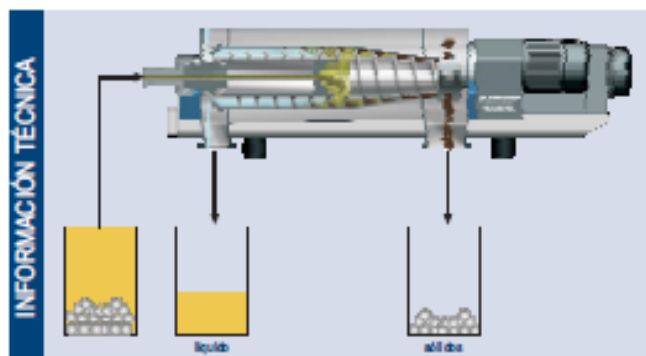
### DESCARGA DE SÓLIDOS

Los sólidos son expulsados a través de las puertas de salida (ubicadas en la parte cónica final del tambor) y son recogidos en el colector de sólidos que forma una parte de la carcasa de la máquina. Desde allí caen libremente de la máquina.



### DESCARGA DE LÍQUIDOS

El líquido clarificado fluye hacia la parte cilíndrica final y desde ahí es descargado a través de salidas hacia la carcasa del tambor. En estas salidas se encuentran anillos de regulación con los cuales se puede ajustar fácil y precisamente la profundidad de la laguna en el tambor. El líquido es recolectado en un colector central y luego es descargado por gravedad.



# LA TECNOLOGÍA DE SEPARACIÓN FLOTTWEG Y SU PROTECCIÓN CONTRA LA EXPLOSIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS QUE CONTIENEN HIDROCARBOS

## Equipos Flottweg protegidos contra la explosión

### CENTRÍFUGAS DECANTADORAS FLOTTWEG – PROTECCIÓN CONTRA LA EXPLOSIÓN Y SEGURIDAD

La técnica mecánica de separación está omnipresente en los más variados sectores de la industria (tecnología medioambiental, industria química/petroquímica y procesamiento de materias primas). En cuanto a la variedad de ámbitos de aplicación de las centrifugas de Flottweg, existe el riesgo de que el procesamiento de los productos cause una atmósfera explosiva. Como consecuencia, es necesario que Flottweg ofrezca máquinas, sistemas y equipamientos que protejan la gente que trabaja en esos entornos peligrosos.

Por ello, se necesita protección contra la explosión en muchas de las aplicaciones donde se utilizan los Decanteres y Sistemas Flottweg, especialmente en las que se procesan aceite o líquidos que contienen aceite. Por ello, los Sistemas y las Centrifugas Flottweg han sido diseñados y fabricados específicamente para cumplir con estos requisitos. Como resultado, garantizan la protección del personal contra peligros (p. ej. vapores de ácido o materiales fácilmente inflamables) y la seguridad de todo el proceso. Las Centrifugas Flottweg cumplen la última Directiva ATEX.

#### ¿QUÉ SIGNIFICA ATEX?

ATEX es la abreviatura para "Atmosphere Explosible" (atmósfera explosiva). Las Centrifugas Flottweg cumplen la Directiva ATEX 95. Pero, ¿qué significa esto exactamente? ATEX es una directiva acordada el 23 de marzo del 1994 por la Unión Europea (94/4/CE) sobre instalaciones y máquinas que se utilizan en atmósferas potencialmente explosivas. 1 de julio del 2003 entró en vigor la directiva 94/9/CE, también conocida como ATEX "95" (no es oficial pero es una expresión de uso habitual que se adoptó por la referencia al Artículo 95). Esta directiva se aplica también a equipos no eléctricos que se utilizan en atmósferas potencialmente explosivas.

Como ya se mencionó anteriormente, las Centrifugas Flottweg cumplen la directiva necesaria. Esto permite la utilización de Centrifugas y Sistemas Flottweg en cualquier área donde se produzcan mezclas peligrosas. Flottweg ofrece protección en las zonas 1/21 y 2/22. La siguiente tabla muestra en qué dimensión se clasifican y se definen los entornos peligrosos.

#### PELIGROS PROVENIENTES DEL EXTERIOR

Aunque el producto a tratar no sea peligroso, se requiere un decanter protegido contra la explosión porque es probable la aparición de una atmósfera explosiva en el lugar de instalación de la Centrifuga o del Sistema Flottweg.

#### PELIGROS PROVENIENTES DEL INTERIOR

Por otro lado, es posible que el producto destinado al procesamiento utilizando un decanter crea una atmósfera explosiva y peligrosa. En este caso el peligro es causado por sólidos descargados o por gases que escapan.

# CARACTERÍSTICAS DE LOS PRODUCTOS FLOTTWEG PARA EL PROCESAMIENTO DE LODOS QUE CONTIENEN HIDROCARBUROS

## Ventajas que ofrece el Equipo Flottweg



### SIMP DRIVE®: SENCILLO, INTELIGENTE, MODULAR Y POTENTE

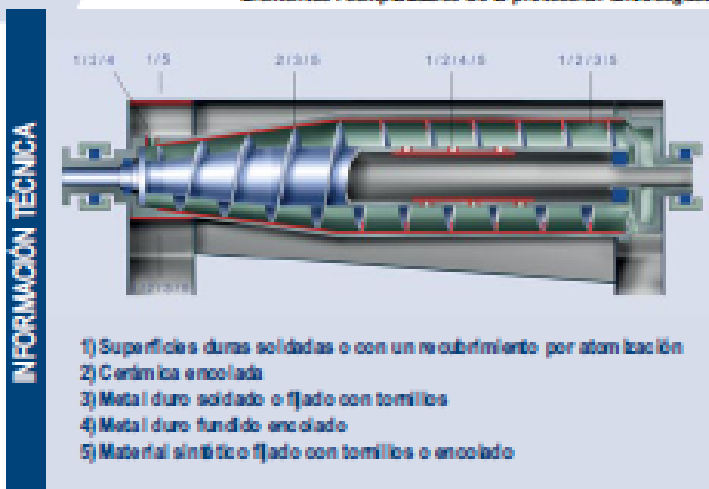
El accionamiento Simp Drive® regula la velocidad diferencial entre el tambor y el tornillo sin fin en función del torque. La velocidad diferencial determina el tiempo de permanencia de los sólidos en el tambor, por lo que tiene una gran influencia en el proceso de separación. La velocidad diferencial y la del tambor se pueden regular de forma independiente y con el sistema en marcha, gracias al sistema especial de traslación mecánica del Simp Drive® (reductor planetario especial).



### PROTECCIÓN ANTIDESGASTE

Una protección óptima antidesgaste es fundamental cuando se utilizan los Decanters y Tricanters® Flottweg en las diferentes aplicaciones. Nuestras centrifugas están protegidas contra desgaste mediante superficies duras soldadas y casquillos reemplazables en metal duro. La vida útil de la protección en nuestras centrifugas es de más de 15.000 horas de servicio.

Elementos reemplazables de la protección antidesgaste



- 1) Superficies duras soldadas o con un recubrimiento por atomización
- 2) Cerámica encolada
- 3) Metal duro soldado o fijado con tornillos
- 4) Metal duro fundido encolado
- 5) Material sintético fijado con tornillos o encolado

### Simp Drive®: ventajas y beneficios para el cliente

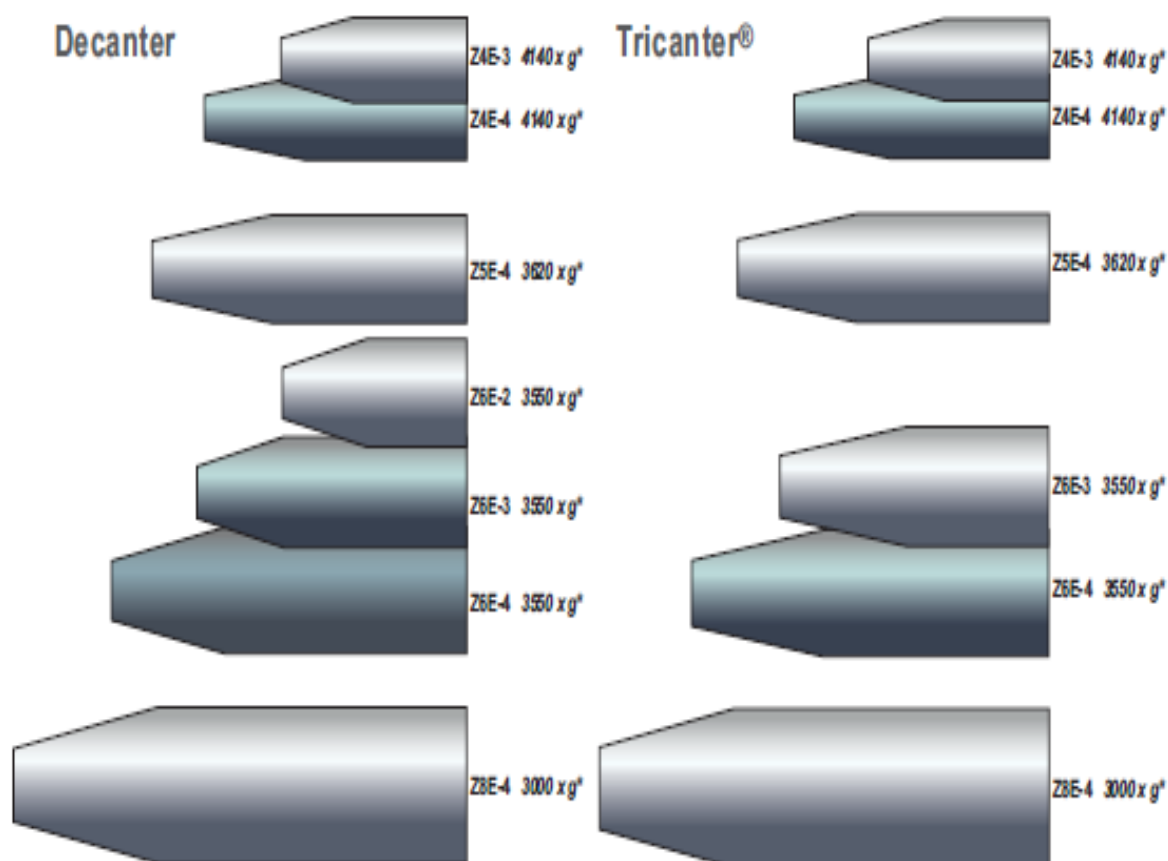
- Gran flexibilidad para seleccionar la velocidad de servicio (la velocidad diferencial también se puede ajustar perfectamente)
- Gran capacidad de carga gracias a una velocidad alta del tambor y un ajuste exacto de la velocidad diferencial
- El accionamiento Simp Drive® es idóneo para un amplio rango de usos en los que se requiere un ajuste constante de los parámetros de servicio.
- Reducido consumo de energía comparado con accionamientos tradicionales debido a una más alta eficiencia (reducción de costos)
- Es posible vaciar la maquinaria incluso cuando está parada, ya que el tambor puede girar de todas formas (no es necesario desmontar las distintas piezas).

### Protección antidesgaste: ventajas y beneficios para el cliente

- Más alta resistencia a la temperatura
- Resistencia mejorada a la corrosión
- Alta dureza y armadura
- Superficies duras soldadas
- Mayor vida útil del decanter
- Mayor constancia y fiabilidad del proceso

# DATOS TÉCNICOS

## Decanters serie Z y Tricanters®



\*Aceleración máxima g dependiendo de la temperatura y de la densidad del producto

DATOS TÉCNICOS DE LOS DECANTERS Y TRICANTERS®FLOTTWEG				
Modelo	Z4E	Z5E	Z6E	Z8E
Dimensiones* (L x A x A)	3500 x 1000 x 1200 mm 138 x 39 x 47 inch	4200 x 1300 x 1150 mm 165 x 51 x 45 inch	4800 x 1800 x 1250 mm 189 x 70 x 49 inch	6200 x 2000 x 1500 mm 244 x 78 x 59 inch
Peso bruto*	3000 kg / 6600 lb	6200 kg / 13600 lb	9750 kg / 21500 lb	14150 kg / 31200 lb
Potencia del motor Accionamiento del tambor	45 kW / 60 hp	90 kW / 120 hp	132 kW / 177 hp	160 kW / 214 hp
Potencia del motor Accionamiento del tornillo Flottweg Simp Drive®	15 kW / 20 hp	55 kW / 73 hp	110 kW / 147 hp	110 kW / 147 hp
Máxima capacidad hidráulica**	35 m³/h / 128 gpm	60 m³/h / 219 gpm	80 m³/h / 293 gpm	160 m³/h / 586 gpm