



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Efecto de la relación suelo-solución surfactante en el  
lavado de suelos contaminados por hidrocarburos en un  
tanque agitado**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**JOSE ANTONIO CASTILLO ESPINOSA**



**MÉXICO D.F.**

**2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente	Joaquín Palacios Alquisira
Vocal	Víctor Manuel Luna Pabello
Secretario	Luís Gilberto Torres Bustillos
1er. Suplente	Josefina Adriana Verdejo Coss y León
2º. Suplente	Alfonso Durán Moreno

## **SITIO EN DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA**

Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Ingeniería  
Coordinación de Ingeniería Ambiental  
Laboratorio de Bioprocesos e Ingeniería Ambiental

Asesor del Tema: Dr. Luís G. Torres Bustillos

\_\_\_\_\_

Sustentante: José Antonio Castillo Espinosa

\_\_\_\_\_

## AGRADECIMIENTOS

Especialmente a quien ha sido mi más grande maestra, amiga, apoyo y ejemplo; a quien debo mi vida y lo que soy. Gracias mamá.

A mi papá y mi abuelo (q.p.d.) quienes han estado siempre presentes como un gran ejemplo de vida y de amor.

A mi abuela, quien como una segunda madre, me ha dado siempre su enorme cariño y apoyo incondicionales.

A mi tío Mario por ser un ejemplo y apoyo tan importante en mi desarrollo como persona.

A mis hermanas Ma. Teresa y Thelma y a mis tíos y primos quienes han formado siempre parte de lo que soy y cuyo cariño siempre ha sido mi fortaleza.

A mi padrino Manuel por su gran amistad y presencia en tantos momentos de mi vida. A mi abuela Sofía (q.p.d) por ser para mí un gran modelo de vida y de amor.

A mi asesor Luis Torres por su paciencia, apoyo y enseñanzas que lo convirtieron no solo en un mentor sino en un amigo, por hacer posible este trabajo y la conclusión de este sueño que empezó hace tantos años.

A Nadima por este inmenso cariño, amistad y apoyo incondicionales que han hecho momentos tan importantes de mi vida personal y profesional.

A todos mis amigos de la escuela y en especial a: Danaí, Humberto, Susana, Víctor, Diana, Paulina, Daniela, Sergio, Sandra y Marcela por ser esos hermanos que me dieron lo mejor de si y enseñarme la mas desinteresada faceta del amor que es la verdadera amistad.

A mis amigos y compañeros de la Universidad, especialmente a: Ana Cristina, Rodolfo, Mónica, Raúl, Iris y Mariana por todos los momentos, pláticas y experiencias que hicieron de esta etapa algo inolvidable.

A todos los miembros del grupo de Saneamiento de Suelos y Acuíferos del Instituto de Ingeniería por sus consejos y enseñanzas que fueron un gran complemento de mi instrucción profesional.

A mis maestros de la Facultad de Química por inculcar en mí los conocimientos propios de mi carrera e incluso el amor por mi ella y por ésta, la mejor Universidad.

## CONTENIDO

	Páginas
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	7
2.1 General	7
2.2 Específicos	7
3. HIPÓTESIS	8
4. MARCO DE REFERENCIA Y ANTECEDENTES	9
4.1 El suelo y su contaminación	9
4.2 Técnicas de remediación	10
4.3 Lavado de suelos	20
4.4 Tensoactivos	22
4.5 Proceso de mezclado	24
4.6 Proceso de mezclado con más de un impulsor	31
4.7 Normatividad	35
5. METODOLOGÍA	40
5.1 Caracterización del suelo	41
5.2 Elección del surfactante	44
5.3 Tiempo de lavado	45
5.4 Pruebas de lavado	47
5.5 Suelo tratado	51
5.6 Impulsores utilizados	51
5.7 Equipo de agitación	52

6. MATERIALES	53
6.1 Materiales de laboratorio	53
6.2 Equipos	54
6.3 Sustancias	54
6.4 Suelo tratado	54
6.5 Surfactantes	56
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	57
7.1 Clasificación de suelo	57
7.1.1 Granulometría	57
7.1.2 Determinación de la contaminación del suelo	58
7.2 Surfactante óptimo	59
7.3 Concentración del surfactante en la solución de lavado	63
7.4 Cinética de lavado	64
7.5 Pruebas de lavado a velocidad constante	67
7.5.1 Rushton (R100)	67
7.5.2 Tres paletas planas (A100)	73
7.5.3 Cuatro paletas inclinadas 45° (A200)	76
7.6 Pruebas de lavado a concentración constante	81
7.6.1 Rushton (R100)	82
7.6.2 Tres paletas planas (A100)	85
7.6.3 Cuatro paletas inclinadas 45° (A200)	87
7.7 Gráficas de eficiencia de lavado	91
7.8 Pruebas de lavado a concentración constante con dos impulsores	94
7.8.1 R100/R100	96
7.8.2 R100/A200	98
7.8.3 R100/A100	100
7.9 Gráficas de eficiencia de lavado con dos impulsores	106
7.10 Efecto de la concentración del suelo	107
7.11 Efecto de la velocidad de agitación	110
7.12 Efecto de la velocidad de agitación con dos impulsores	112
7.13 Velocidad mínima de agitación	115
7.14 Escalamiento	118

7.14.1 Número de potencia	118
7.15 Costos	124
7.15.1 Lavado de suelos	124
7.15.2 Aguas residuales	125
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
8.1 Conclusiones	127
8.2 Recomendaciones	130
9. APÉNDICES	132
10. REFERENCIAS	140

## ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>Páginas</u>
1.1 Residuos anuales generados por los procesos de Refinación y Petroquímica de Petróleos Mexicanos	4
4.1 Técnicas de remediación de suelo	11
4.2 Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelos.	37
5.1 Tamaños de abertura de malla.	41
5.2 Dimensiones del tanque con un impulsor.	49
5.3 Dimensiones del tanque con dos impulsores.	50
5.4 Impulsores utilizados	51
6.1 Materiales de laboratorio	53
6.2 Equipos empleados	54
6.3 Sustancias empeladas	54
6.4 Caracterización previa del suelo	55
6.5 Nombres químicos y clasificación de surfactantes.	55
7.1 Surfactantes utilizados.	60
7.2 Nombres químicos de los surfactantes utilizados	60
7.3 Pruebas de lavado a velocidad constante	67
7.4 Pruebas de lavado a concentración constante	82
7.5 Pruebas de lavado a concentración constante con dos impulsores.	96
7.6 Velocidad mínima de agitación. $N_{js}$	116
7.7 Nomenclatura teórica para la determinación de $N_{js}$	117
7.8 Lavado a una misma velocidad	120
7.9 Lavado a concentración constante	121
7.10 Lavado a concentración constante con dos impulsores.	121
7.11 Resultados de las experiencias de lavado	123
9.1 Remoción por surfactante utilizado.	132
9.2 Cinética de lavado	132
9.3.1 Concentración de TPH variando la concentración del suelo	133
9.3.2 Concentración de TPH variando la velocidad de agitación	135
9.3.3 Reynolds	134

9.4.1	Pruebas de lavado variando la concentración de suelo para Rushton	134
9.4.2	Error experimental y varianza	134
9.4.3	Pruebas de lavado variando la concentración de suelo para 3 paletas planas	135
9.4.4	Pruebas de lavado variando la concentración de suelo para 4 paletas inclinadas	135
9.5.1	Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton	136
9.5.2	Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para 3 paletas planas	137
9.5.3	Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para 4 paletas inclinadas	137
9.6.1	Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton/Rushton	138
9.6.2	Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton/4 paletas inclinadas.	138
9.6.3	Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton/3 paletas planas.	139

## ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Páginas</u>
4.1 Proceso industrial de lavado de suelos	22
4.2 Patrones de flujo	25
4.3 Esquema tradicional de un tanque de lavado	28
4.4 Patrones de flujo con y sin deflectores	29
4.5 Agitación suave	30
4.6 Agitación moderada	30
4.7 Agitación vigorosa	31
4.8 Agitación violenta	31
4.9 Efecto del espaciamiento sobre patrones de flujo y dispersión	33
4.10 Distribución de patrones de flujo según la distancia entre impulsores	34
4.11 Distribución geométrica uniforme	34
5.1 Diagrama de proceso	40
5.2 Diagrama del tanque utilizado para un impulsor	41
5.3 Diagrama del tanque utilizado para dos impulsores	50
7.1 Curva de distribución de partícula	57
7.2 Remoción de hidrocarburo por surfactante	61
7.3 Remoción de hidrocarburo a 3 concentraciones de EW 600	63
7.4 Cinética de lavado de los tres impulsores.	65
7.5 R100 Potencia de lavado	68
7.6 R100 Energía de lavado.	69
7.7 Variación en las mediciones de potencia para R100	70
7.8 Variación en las determinaciones de hidrocarburos para R100	71
7.9 R100 Remoción de contaminante	72
7.10 A100 Potencia de lavado	73
7.11 A100 Energía de lavado	74
7.12 A100 Remoción de contaminante	75
7.13 A200 Potencia de lavado.	76
7.14 A200 Energía de lavado.	77
7.15 A200 Remoción de contaminante	78
7.16 Energía de los procesos a velocidad constante.	79

7.17 Remoción de los procesos a velocidad constante.	80
7.18 R100 Potencia de lavado	83
7.19 R100 Remoción de lavado.	84
7.20 A100 Potencia de lavado	85
7.21 A100 Remoción de lavado.	86
7.22 A200 Potencia de lavado	87
7.23 A200 Remoción de lavado.	88
7.24 Energía de los procesos a concentración constante.	89
7.25 Remoción de los procesos a diferentes velocidades.	90
7.26 Eficiencia de lavado de los procesos a velocidad constante	92
7.27 Eficiencia de lavado de los procesos a concentración constante	93
7.28 Eficiencia de lavado de ambos procesos, remoción vs energía	94
7.29 Potencia del sistema R100/R100	96
7.30 Remoción del sistema R100/R100	97
7.31 Potencia del sistema R100/A200	98
7.32 Remoción del sistema R100/A200	99
7.33 Potencia del sistema R100/A100	100
7.34 Remoción del sistema R100/A100	101
7.35 Energía del lavado con dos impulsores	102
7.36 Remoción del lavado con dos impulsores	105
7.37 Eficiencia del lavado con dos impulsores	106
7.38 Efecto de la concentración del suelos para Rushton	108
7.39 Efecto de la concentración del suelos para tres paletas planas	108
7.40 Efecto de la concentración del suelos para cuatro paletas inclinadas	109
7.41 Efecto de la velocidad de agitación para Rushton	110
7.42 Efecto de la velocidad de agitación para tres paletas planas	111
7.43 Efecto de la velocidad de agitación para cuatro paletas inclinadas	111
7.44 Efecto la velocidad de agitación sobre el sistema R100/R100	113
7.45 Efecto la velocidad de agitación sobre el sistema R100/A200	113
7.46 Efecto la velocidad de agitación sobre el sistema R100/A100	114
7.47 Diagrama de Reynolds contra numero de potencia	121

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue establecer algunas de las condiciones del lavado de un suelo contaminado con hidrocarburo proveniente de Tabasco, en un tanque agitado de modo que el proceso fuese más eficiente en cuanto a remoción del contaminante y consumo de energía. Se abarcó el estudio del efecto del tipo de surfactante y su concentración, el tipo y número de impulsores, la velocidad de agitación y la proporción de suelo en la solución de lavado.

La determinación de HTPs del suelo indicó que se tenía una contaminación de 32003 mg/kg. El surfactante utilizado fue el Emulgin 600 al 0.5% por ser el más eficiente en las pruebas de remoción. Se emplearon tres impulsores diferentes en el proceso; los impulsores radiales Rushton y de tres paletas planas y el axial de cuatro paletas inclinadas a 45°. Cada uno de estos impulsores dio diferentes resultados en cada una de las condiciones de lavado, siendo el Rushton el que presenta la remoción más alta y el de cuatro paletas inclinadas el de menor consumo de energía. Las mencionadas condiciones de lavado consistieron en; variar la proporción de suelo en la solución de lavado y mantener fija la velocidad y en variar la velocidad de agitación manteniendo la relación suelo/solución de lavado constante. De este modo se determinó el comportamiento asociado a cada impulsor teniendo cada uno un comportamiento diferente ante dichas condiciones y una respuesta de remoción y energía distinta. Se hicieron sistemas con dos impulsores con el fin de comparar con el lavado con un impulsor. Dicho sistema consistió en un impulsor Rushton en la parte superior y un Rushton o tres paletas planas o cuatro paletas inclinadas en la parte inferior. Para esta serie de pruebas se estudiaron solamente los efectos de la variación de velocidad de

agitación. A diferencia de las pruebas con un solo impulsor, la relación de la remoción y la energía con respecto a la velocidad, fue directamente proporcional.

Las remociones de hidrocarburo más altas se obtuvieron con el impulsor Rushton o bien con la combinación Rushton y cuatro paletas inclinadas para el caso de dos impulsores. El menor consumo de energía se logró con el impulsor de cuatro paletas inclinadas, mismo que en todos los casos presentó una remoción aceptable. La energía fue directamente proporcional a la relación suelo/solución de surfactante y a la velocidad de agitación. Por su parte, la remoción presenta un comportamiento independiente según cada impulsor para la variación en la relación de suelo/solución de lavado y para la variación de velocidad de agitación. Se puede decir, que la remoción es más dependiente del tipo de impulsor que de la variación de la cantidad de suelo en solución y un poco más que de la variación de velocidad de agitación.

## 1. INTRODUCCIÓN

En México, la industria del petróleo en su conjunto ha tenido un impacto negativo en materia ambiental. Debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo, no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los productos petroquímicos básicos. El problema de los suelos contaminados con hidrocarburos radica en que hasta hace pocos años no existía conciencia del grado de la dificultad y el costo que representa la remediación de los suelos y cuerpos de agua contaminados para la sociedad, por lo que es más caro remediar que prevenir (Saval, 1995 ).

Por las diferentes actividades industriales que efectúa, Petróleos Mexicanos (PEMEX), contamina potencialmente el ambiente por emisión de humos, polvos, gases y descargas de aguas residuales generadas durante la perforación de pozos petroleros, en la extracción de líquidos, por la refinación y en la producción de petroquímicos. Las instalaciones poseen riesgos inherentes de fugas de petróleo, diesel y gasolina por roturas de los ductos, en la filtración de aguas aceitosas desde las presas y los derrames del agua aceitosa de las presas por inundaciones durante el periodo de lluvias. Además, la transportación de petróleo crudo y productos refinados en buques tanque y tuberías tiene implícita la posibilidad de derrames que pueden contaminar suelo, agua y atmósfera. (Quadri , 1994 ).

Con respecto a los derrames sobre tierra, PEMEX reporta que tan solo el año 2001, se derramaron 8,031 toneladas de hidrocarburo, en los cuatro sectores de ductos del país. Los derrames en grandes cantidades son principalmente producto de accidentes o de tomas ilegales (26% del total) en los ductos que conducen los hidrocarburos de una zona a otra de la Republica. Adicionalmente las zonas de exploración, refinamiento,

petroquímica y de almacén sufren de una severa contaminación gracias a los derrames accidentales propios de los procesos industriales en cuestión, como lo son purgas, fugas, etc. En México, se tiene que algunos de los residuos o desechos de la actividad petrolera están clasificados como residuos peligrosos. Tan solo en el 2006 se generaron 582.2 mil toneladas de residuos peligrosos derivado de la actividad petrolera, un aumento de 34% con respecto al 2001. También durante el 2006 el volumen de hidrocarburos líquidos derramados en instalaciones y ductos de PEMEX fue de 25,707 barriles, e decir, 3,432.91 toneladas. (Estadísticas PEMEX)

*Tabla 1.1 Residuos anuales generados por los procesos de Refinación y Petroquímica de Petróleos Mexicanos (PEMEX).*

<b>RESIDUOS</b>	<b>10<sup>3</sup> Ton/año</b>	<b>%</b>
Desperdicios semisólidos	1,532.55	90.15
Desperdicios líquidos	163.2	9.6
Desperdicios sólidos	4.25	0.25
Residuos peligrosos	221.0	18.0
Residuos reciclados	1.7	0.1
Residuos susceptibles de ser utilizados	187.0	13.0

*Tomado de Saval, 1995*

Ante esta severa situación de contaminación, se presenta la necesidad de tratar estos suelos, con el fin de que puedan ser útiles a otros fines y para eliminar la posibilidad de que la contaminación migre a otros sistemas como el aire y los mantos freáticos. Los tratamientos de remediación son muy variados y sus condiciones dependen de la situación específica de cada suelo. Dentro de los métodos de tratamiento en mayor desarrollo, está el lavado de suelos. Sin embargo la información sobre este método es muy escasa, en particular del caso de lavado por tensoactivos en un tanque *ex situ*.

Este trabajo, nace en gran parte, por la necesidad de reducir el empirismo que gira alrededor del proceso de lavado de suelos y establecer mejor las condiciones a las que

deben de tratarse los suelos. El principal problema que se trata es el de la falta de información y estudio de las variables de mezclado en relación a su aplicación en experiencias de lavado de suelos. El lavado por mezclado de suelos depende directamente de muchas variables como son las morfológicas y geológicas del suelo, las fisicoquímicas del suelo y los surfactantes, las reológicas, las del mezclado, entre otras. Variables como la velocidad de agitación, la concentración de suelo en la solución de lavado, la geometría y número de los impulsores de agitación no han sido ampliamente evaluadas en casos de lavado de un suelo real. En este trabajo se evaluaron las variables anteriores y se relacionaron con la eficiencia de lavado. Al final se obtuvieron gráficas comparativas de procesos que combinan estas variables con el fin de conocer que condiciones son las que favorecen un mejor lavado con el menos consumo de energía.

La dificultad de generalizar los procesos de lavado, radica en que los modelos de mezclado y de superficie parten de situaciones ideales y homogéneas, que distan mucho de la realidad de un suelo contaminado. Así mismo la gran variedad de suelos existentes, hacen que se de un gran número de posibilidades en las que el contaminante es absorbido y como puede ser separado.

Para este estudio se partió de un suelo contaminado previamente caracterizado (Tabla 6.4) y se modificaron algunas de las variables de mezclado con el fin de tener un panorama de cuales de estas condiciones, fácilmente modificables a escala industrial, repercute con mayor fuerza sobre el lavado, haciéndolo mejor y más o menos costoso. Cabe destacar que esta técnica de remediación tiene un costo aproximado de 140 usd/m<sup>3</sup> que si bien la hace más costosa que muchas de las técnicas biológicas, es también de las

de menor costo entre las fisicoquímicas y mucho más que las técnicas térmicas. (Iturbe *et al*, 2004)

Este suelo fue tomado del campo petrolero Cinco Presidentes, localizado dentro de 18°13'36'' de latitud norte y los 94°1'36'' de latitud Oeste en el estado de Tabasco, abarcando parte de los ejidos Aquiles Serdán y Arrozal, así como los cuerpos de agua denominados río Chicozapote y laguna el Yucateco en el municipio de Huimanguillo; en el municipio de Cárdenas que comprende parte del ejido Ley Federal de la Reforma Agraria y Colonia el Pailebot, cubriendo aproximadamente 3000 hectáreas, de las cuales dos terceras partes son ocupadas por pozos lacustres. Forma parte junto con La venta, Blasillo, Otates, Ogarrío, Sánchez Magallanes, San Ramón, Rodador y Cinco Presidentes, del activo Cinco Presidentes. Hoy en día, la actividad de este Campo es mínima, ya que del total de 321 pozos que fueron activos, para 1994, solo están en producción en la zona terrestre un total de 59 pozos y 9 en la zona lacustre. La producción de hidrocarburo se conduce por una intrincada red de ductos hacia las cuatro baterías de separación primaria que se encargan de separar el crudo del gas y este último se procesa en dos compresoras, enviando los hidrocarburos a la Unidad Petroquímica La Venta.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Generales

Estudiar el lavado de un suelo desde el punto de vista integral de la ingeniería ambiental, el mezclado en un tanque de proceso intermitente con uno y dos impulsores y los fenómenos de superficie asociados al lavado por surfactantes.

### 2.2 Específicos

- Clasificar el tipo de suelo utilizado.
- Evaluar la eficiencia de diferentes surfactantes en el lavado de suelo contaminado por hidrocarburos.
- Evaluar la concentración óptima de tensoactivo para el lavado.
- Evaluar el efecto de la concentración del suelo en la eficiencia lavado.
- Evaluar el efecto de la geometría del impulsor en la eficiencia de lavado.
- Evaluar el efecto de la velocidad de agitación en la eficiencia de lavado.
- Evaluar la eficiencia de lavado usando dos impulsores.
- Evaluar el consumo energético en función de los parámetros evaluados.
- Realizar mediciones de  $N_{js}$  (velocidad mínima de agitación) y contrastar contra los valores obtenidos de ecuaciones empíricas.

### 3. HIPÓTESIS

Por medio de este trabajo se pretende demostrar que la eficiencia del lavado de suelos contaminados por hidrocarburos es una función de variables tales como las condiciones de mezclado; la geometría y número de impulsores, la relación suelo/solución de surfactante y de la velocidad de agitación. Se entiende por eficiencia la remoción de hidrocarburos presentes en el suelo que de preferencia debe alcanzarse con el menor consumo energético.

Se espera encontrar que existe una geometría de impulsor que favorece el lavado, así como una relación suelo/solución de surfactante adecuada, en función de cada impulsor. Se propone comprobar que la energía consumida en el proceso por el sistema motor-impulsor, esta relacionada con: a) La geometría del impulsor, siendo mayor la energía consumida por los impulsores radiales; b) La relación suelo/solución de surfactante, siendo mayor el gasto energético a mayor concentración de suelo en el lavado; c) La velocidad de agitación, siendo directamente proporcional al aumento de ésta y d) El número de impulsores, siendo mayor el gasto con dos impulsores que con uno.

Así mismo se espera probar que la remoción de hidrocarburos del suelo es: a) Favorecida por el uso de una concentración dada de surfactante; b) Función de la geometría del impulsor, siendo mejor con los impulsores radiales c) Inversamente proporcional a la cantidad de suelo en el lavado, d) Directamente proporcional al aumento de la velocidad y e) Mejor con dos impulsores que al usar solamente uno.

## **4. MARCO DE REFERENCIA Y ANTECEDENTES**

### **4.1 Marco de referencia**

#### 4.1.1 El suelo y su contaminación

Con el fin de sentar un marco para este trabajo es necesario definir primero lo que se entiende por suelo. El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre, está constituido por una capa de material fragmentario, no consolidado, es un sistema complejo que se forma por la interacción continua y simultánea de la materia a partir de la cual se origina, del clima, del tipo de vegetación y fauna y de las condiciones particulares del relieve. En México existen 25 de las 30 unidades de suelo reconocidas por la FAO, UNESCO y la ISRIC. Los leptosoles, regosoles y calcisoles son los suelos de más amplia distribución nacional, cubriendo cerca del el 60.7% de la superficie del país, son por lo general suelos someros y con poco desarrollo, lo que dificulta su aprovechamiento agrícola. Los suelos fértiles y más explotados (feozems y vertisoles) ocupan el 18% de la superficie del país.

Así mismo estos suelos junto con los cuerpos de agua han sido contaminados por el manejo inadecuado de los materiales y residuos. En el país, hasta el año 2004, se tenían identificados 297 sitios contaminados con residuos peligrosos, de los cuales 119 se habían caracterizado -esto es, se clasificaron y priorizaron de acuerdo al grado de riesgo que representan para la salud y el ambiente-, y 12 se consideraban como rehabilitados o en proceso de rehabilitación. Los estados que concentran el mayor número de sitios contaminados son San Luis Potosí (15%), el Estado de México (10%), Aguascalientes (9.4%), Coahuila (7.1%) y Veracruz (6.7%). (Semarnat, 2005)

La presencia de contaminantes en el suelo se ha conceptualizado a través de observaciones indirectas que indican la acumulación de los contaminantes orgánicos en asociación con adsorbentes naturales (Luthy *et al*, 1997), estableciéndose los siguientes procesos: absorción a la materia orgánica en forma, amorfa o natural o en líquidos de la fase no acuosa, condensada o en polímeros o residuos de combustión, adsorción a superficies orgánicas húmedas (hollín), adsorción en superficies minerales como el cuarzo y adsorción dentro de los micro poros o en minerales (zeolitas)

#### 4.1.2 Técnicas de remediación

La disyuntiva que se presenta frente a un suelo contaminado es recuperarlo o destruirlo. En un principio había prevalecido la última opción, mientras que en los últimos años se ha prestado una especial atención a las técnicas de recuperación que posibilitan su reutilización. Estas técnicas pueden ser clasificadas de muchas maneras, una de las más aceptadas, son las mostradas en la siguiente tabla ordenadas en orden ascendente por la duración del tratamiento y descritas mas adelante.

Tabla 4.1 Técnicas de remediación de suelo

Clasificación por tiempo			Tiempo
Estrategia de remediación	Destrucción		
	Aislamiento		
	Extracción		
Lugar del proceso	<i>In situ</i>		
	<i>Ex situ</i>		
	On site		
Tipo de tratamiento	Termicos	Desecación térmica	Meses a años
		Pirolisis	
		Incineración	
		Vitrificación	
	Fisicocquímicos	Oxidación química	Meses
		Electrocinética	Meses
		Lavado de suelos	1 o mas años ( <i>in situ</i> )/ horas a días ( <i>ex situ</i> )
		Solidificación-estabilización	Meses a años
		Extracción de vapores	Semanas a un par de años
	Biologicos	Biorreactores	Meses a años
		Fitorremediación	
		Bioventeo	
		Biolabranza	
Composteo			
Bioestimulación			
Atenuación natural			

Clasificación por estrategia de remediación:

i) Destrucción o modificación:

Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.

Son técnicas que se realizan con el suelo excavado pero que son muy caras y solo se utilizan cuando los contaminantes son muy tóxicos y es necesario eliminarlos del suelo. Se utilizan para suelos contaminados con aceites y productos clorados como los poli-cloro-bifenilos (PCB)s.

ii) Extracción o separación:

Consiste en añadir al suelo agua para obtener un fango que se mezcla con disolvente a bajas temperaturas. El disolvente extrae los contaminantes orgánicos adsorbidos en las partículas de suelo.

iii) Aislamiento o inmovilización:

Consiste en reducir la movilidad de los contaminantes mediante su incorporación a materiales sólidos con baja permeabilidad. El mecanismo de fijación puede ser físico o químico, y los materiales variados como cemento, silicatos, termoplásticos y polímeros orgánicos.

(López, 2004)

#### Clasificación por lugar de realización del proceso de remediación

- i) *In situ*: Se llama así al realizado en el propio espacio contaminado, sin extraer el suelo, mediante técnicas que están en desarrollo. Se aplica cada vez con más frecuencia por ser la más barata.
- ii) *On site*: es el que se realiza en el mismo lugar pero extrayendo el suelo contaminado del terreno. Se utilizan unidades móviles de tratamiento que están diseñadas para limpiar el suelo o el agua contaminada. Es más cara que la anterior.
- iii) *Fuera del sitio*: se llama así al que se realiza fuera del emplazamiento, en instalaciones autorizadas para la recuperación de suelos contaminados o el tratamiento de residuos industriales especiales. Tienen que ser instalaciones cercanas al suelo contaminado porque el transporte es un problema que encarece mucho el tratamiento. El volumen de suelo a excavar para su tratamiento depende directamente del muestreo del sitio

contaminado, donde se determina la extensión tanto horizontal como vertical de la pluma de contaminante. Posteriormente se decide si se trata toda la porción contaminada dentro de la pluma o solo una parte. En caso de que la contaminación supere por mucho la norma se debe tratar todo el volumen contaminado.

#### Clasificación por tipo de tratamiento

##### i) Térmicos

Son los procesos más rápidos pero, generalmente, los más costosos. Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos, incluyen la separación, destrucción e inmovilización de contaminantes. Son empleados como tratamiento final para suelos o lodos con compuestos halogenados y no halogenados, PCBs, dioxinas, furanos, cianidas, corrosivos, pesticidas, fenoles y clorados. Estos procesos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad, quemado, descomposición o fundición de los contaminantes. Los vapores generados requieren de tratamiento especial, así como las cenizas y los residuos líquidos. Pueden aplicarse *in situ* y fuera del sitio. (Ven Deuren *et al*, 2002)

##### (a) Desorción térmica

Es un proceso de separación física no destructivo. El suelo es calentado para volatilizar agua y contaminantes orgánicos que son transportados hacia un sistema de tratamiento de gases. Las temperaturas y tiempos de residencia volatilizan los contaminantes

selectivamente pero no los oxidan. Se emplean para compuestos volátiles.

(b) Pirolisis

Se define como la descomposición química inducida de materiales orgánicos por calentamiento en ausencia de oxígeno. El proceso se realiza normalmente a presión y a temperaturas de operación mayores a 430°C.

(Ven Deuren *et al*, 2002)

(c) Incineración

En los procesos de incineración *in situ* como fuera del sitio se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870°C a los 1200°C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Las eficiencias de remoción de los incineradores operados adecuadamente alcanzan el 99.99%, sin embargo los gases de combustión requieren un tratamiento.

(d) Vitrificación

Está basada en un calentamiento eléctrico con el que los residuos se funden en una matriz vítrea, muy resistente, que impide la fuga de los lixiviados. Utiliza temperaturas que van de 1600°C a 2000°C y estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos.

(Fernández, 2004)

## ii) Biológicos

También se conocen como biorremediación y el término se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos tales como hidrocarburos, solventes no clorados y algunos aromáticos clorados a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Los organismos pueden ser autóctonos o exógenos, puede ser *in situ* y *ex situ* y de forma aerobia o anaerobia. Es el proceso más barato y menos agresivo al ambiente pero es más lento además de que los contaminantes orgánicos no deben de estar en concentraciones muy altas que inhiban el crecimiento bacteriano. (Ven Deuren *et al*, 2002)

### (a) Atenuación natural

Es conocida también como bioatenuación y es una estrategia de remediación detallada, supervisada y controlada que conduce, a través de los procesos naturales intrínsecos del sitio, a la reducción de la concentración de contaminantes. (Fernández, 2004)

### (b) Bioestimulación

Se adiciona al suelo contaminado soluciones acuosas que contengan nutrientes, o coadyudantes para estimular la actividad de los microorganismos, y mejorar la degradación de contaminantes orgánicos. (Ven Deuren *et al*, 2002)

### (c) Bioventeo

Su objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto volátil biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos, por

movimiento forzado con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos. (Ven Deuren *et al*, 2002)

(d) Bioaumentación:

Se adiciona la suelo contaminado soluciones acuosas que contengan nutrientes, u otros coadyudantes como tensoactivos, para estimular la actividad de los microorganismos, y mejorar la biodegradación de los contaminantes orgánicos. (Ven Deuren *et al*, 2002)

(e) Biolabranza

Los suelos contaminados son excavados y tratados en espacios abiertos. Las capas del suelo son aireadas mediante volteo y los lixiviados son filtrados y recogidos. Es un sistema que permite tener el control en el proceso de la degradación biológica, mediante la construcción de una celda en la cuál se coloca el material contaminado y en seguida se aplica un riego y productos especialmente desarrollados para acelerar el ciclo de vida de los microorganismos y por consecuencia la degradación de los contaminantes en un periodo de tiempo relativamente menor. La bioloabranza se lleva a cabo sobre una celda la cuál se construye sobre la superficie de un terreno previamente acondicionado, donde se colocan tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) y un sistema de recolección de lixiviados. Algunas veces se opta por colocar una cama de arena, para proteger el liner contra rasgaduras y evitar así la migración del contaminante. (Èrcoli *et al*, 1995)

(f) Composteo

Es un proceso controlado, por el cual los contaminantes orgánicos pueden convertirse en subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezclan en pilas con sustancias orgánicas sólidas biodegradables, como paja, aserrín estiércol, etc. Estos son adicionados como agentes de volumen y para mejorar el balance de nutrientes para la actividad microbiana. (Volke y Velasco, 2002)

(g) Biorreactores

Pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, ya que es posible combinar procesos físicos, químicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación. (Volke y Velasco, 2002)

(h) Fitorremediación:

Se basa en el empleo de plantas para extraer la contaminación del medio ambiente. Algunas plantas tienen la capacidad de concentrar metales en sus tejidos y en algunos casos son capaces de capturar y degradar plaguicidas, explosivos o hidrocarburos del suelo y las aguas subterráneas sea por si mismas o por la *acción de las bacterias* que viven en sus raíces. Además las plantas contribuyen a reducir la acción del viento y la lluvia sobre las zonas contaminadas por lo que evitan que la contaminación se extienda a otras zonas. (Ven Deuren *et al*, 2002)

La fitoremediación es eficaz en aquellos lugares en los que la concentración de contaminantes es reducida y requiere que éstos se encuentren en la rizosfera, profundidad a la que pueden llegar los

sistemas radiculares de los vegetales. Gracias al sistema de captación de nutrientes de las plantas, éstas pueden extraer del subsuelo los contaminantes que son introducidos en sus tejidos junto al agua y las sales necesarias para el desarrollo de los vegetales.

### iii) Fisicoquímicos

Estos tratamientos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas; tales como densidad, porosidad, tamaño de partícula, polaridad y viscosidad entre otras, de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o inmovilizar la contaminación. Estas técnicas son efectivas en cuanto a costos o pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las técnicas de biorremediación. Sin embargo los costos pueden aumentar cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición final. (Ven Deuren *et al*, 2002). Pueden ser llevadas a cabo *in situ*, y fuera del sitio.

#### (a) Oxidación química

Los agentes oxidantes más comunes son ozono, peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio. En otros casos se emplea además un catalizador que aumente el rendimiento de la oxidación, la cual consiste en la destrucción química completa con la producción de compuestos más estables e inertes. Los principales contaminantes tratados por este medio son el tricloro etileno, pentaclorofenol, naftaleno, fenentrenos, pirenos, disesl, aceites, poliaromáticos, pentaclorofenoles y fracciones del petróleo. (Ven Deuren *et al*, 2002)

(b) Extracción de vapores:

En esta técnica se aplica vacío al suelo para inducir un flujo controlado y continuo de aire y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo, derivados normalmente de fracciones ligeras del petróleo (Benceno, Tolueno, Xileno, Naftaleno, Butanos, Pentanos, Hexanos, etc). La efectividad del sistema depende principalmente de la volatilidad de los contaminantes y permeabilidad del suelo. No es una técnica adecuada para zonas saturadas o con alto contenido de partículas finas. La descarga al aire puede requerir de tratamiento así como los líquidos residuales. (Ven Deuren *et al*, 2002)

(c) Solidificación-estabilización

Los contaminantes son atrapados dentro de una masa estabilizada o son inducidas reacciones químicas entre el agente estabilizante y los contaminantes para reducir su movilidad. Se deben de hacer pruebas de lixiviación para garantizar esta inmovilidad. La inmovilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales como cemento Pórtland, cal o polímeros, que aseguran que los contaminantes se mantengan en su forma menos móvil o tóxica. Esta técnica se emplea principalmente para residuos industriales tóxicos tales como rebabas metálicas, ácidos de industria del cromado, lodos de plantas de tratamiento de agua, residuos inorgánicos con cationes, etc. (Ven Deuren *et al*, 2002)

(d) Electrocinética

El objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de campo eléctrico que permite remover especies cargadas. Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre los electrodos. (Volke y Velasco, 2002)

(e) Lavado de suelos

Adición de aditivos que incrementan la movilidad de contaminantes. Puede ser *in situ*, y fuera del sitio. Se emplea principalmente para metales, hidrocarburos y compuestos orgánicos.

#### 4.1.3 Lavado de suelos

El lavado de suelos es una técnica de remediación de tipo fisicoquímico y se puede realizar *in situ* o fuera del sitio. Se emplea principalmente para el tratamiento de contaminantes como solventes halogenados, preservadores de madera, solventes orgánicos cianidas, metales pesados, compuestos volátiles y semivolátiles, hidrocarburos y solventes aromáticos (Madrigal, 1998). Consiste en el uso de soluciones de lavado que contienen aditivos como tensoactivos (surfactantes), cosolventes, ácidos, bases oxidantes, quelantes, disolventes o simplemente agua y sirven para incrementar la solubilidad y/o movilidad de los contaminantes. Los aditivos se eligen en función de los contaminantes que se desean remover del suelo, en el caso de compuestos orgánicos hidrofóbicos como los hidrocarburos del petróleo se utilizan tensoactivos. Estos tienen el objetivo de movilizar o solubilizar los contaminantes

adsorbidos al suelo o que se encuentran en fase no acuosa. Las moléculas de tensoactivo tienen una parte hidrofóbica y una hidrofílica y son clasificados como aniónicos, catiónicos, anfóteros y no iónicos.

El lavado *in situ* es una técnica de remediación tanto de suelo como de agua subterránea contaminada. Este proceso implica la inyección por bombeo de una solución de lavado a presión, a través de pozos de inyección en la zona de mayor gradiente hidráulico dentro de una zona contaminada.

El lavado *ex situ*, consiste en excavar el suelo contaminado y colocarlo en unas pilas o estanques de lavado y se mezcla mecánicamente. El efluente es recolectado y tratado, en un sistema de aguas residuales.

En general estas técnicas de lavado son más efectivas para suelos con tamaño de partícula grande, como son suelos gravosos y arenosos. En general si un suelo contiene más de 25% a 30% de arcilla y limos, se considera difícil de tratar, especialmente en técnica *in situ*.

La selección apropiada de tensoactivos es esencial para obtener altas eficiencias de lavado en las dos técnicas, para lo cual se recomienda hacer pruebas en laboratorio con diferentes tipos y concentraciones de tensoactivos, tomando en cuenta factores como la adsorción del tensoactivo, la dureza del agua y la temperatura que puede afectar su concentración así como también la degradación y toxicidad del tensoactivo. (Urum *et al*, 2005)

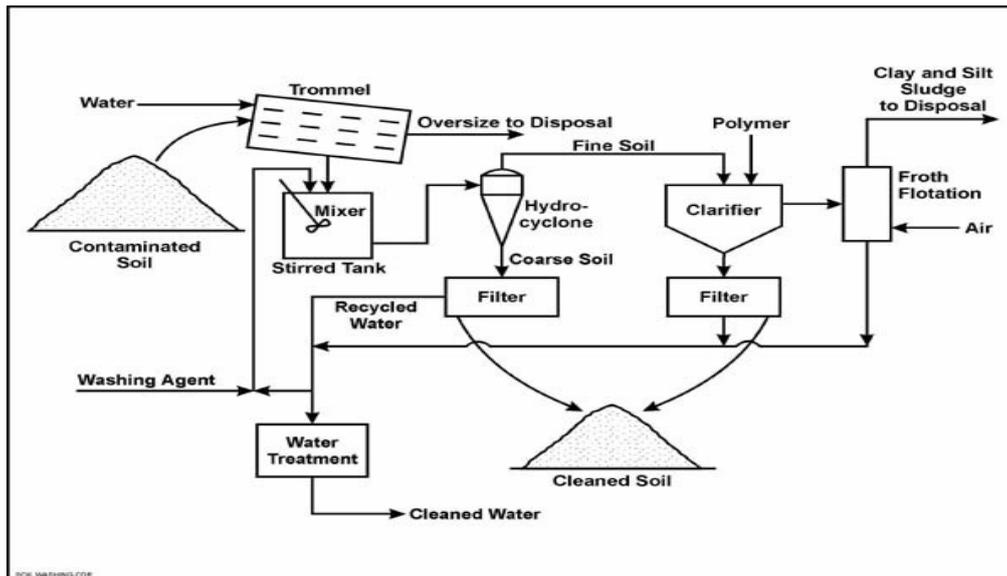


Fig.4.1 Proceso industrial de lavado de suelos

Cabe destacar que un proceso de lavado de suelos industrial como el que se muestra (Figura 2.1) se contempla el tratamiento y/o recirculación de los efluentes secundarios del proceso como el agua y la espuma generados.

#### 4.1.4 Tensoactivos

Un tensoactivo o surfactante es una molécula anfifílica que está formada por dos partes; una hidrofóbica y otra hidrofílica. La sección hidrofílica de la molécula está compuesta por grupos de átomos con carga ( $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{SO}_4^-$ ,  $\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$ , etc). La parte hidrofóbica está compuesta por cadenas de hidrocarburos que contienen desde 12 o más átomos de carbono. Se usan para el lavado de sustancias ologinosas por que tienen la capacidad de separar del sustrato y a mayor concentración, encapsular estas moléculas formando agregados multimoleculares llamados micelas. En este tipo de micelas la sección hidrofóbica de cada molécula queda orientada hacia el centro, atraída por la molécula oleosa. De este modo la sección hidrofílica queda expuesta hacia el medio acuoso, y de esta manera se logra crear una emulsión y remover el contaminante. Cada surfactante

tiene una determinada concentración micelar crítica (CMC), que es la concentración necesaria para que se empiecen a formar los agregados micelares. (Wilson et al, 1994)

Cada surfactante tiene además un determinado balance entre cada uno de sus secciones y es más polar o más no polar dependiendo de este. Dicho balance se conoce como balance hidrofílico-lipofílico (HLB) y dependiendo de su magnitud, hace que la molécula sea útil en sistemas acuosos con aceite o para sistemas oleosos con agua.

Dado que algunos tensoactivos se usan con diferentes fines, se ha adoptado la clasificación por su estructura molecular:

i) Iónicos

Se disocian en agua y por su fuerte afinidad por el agua, motivada por su atracción electrostática hacia los dipolos del agua puede arrastrar consigo a las soluciones de cadenas de hidrocarburos, por ejemplo el ácido palmítico, prácticamente no ionizable es insoluble, mientras que el palmitato sódico es soluble completamente ionizado.

a) Aniónicos:

El extremo de la cadena hidrocarbonada es un anión. Se encuentran constituidos por una cadena alquílica o ramificada que consta de 10 a 14 átomos de carbono. Estos se disocian en un anión anfifílico y en un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario.

b) Catiónicos

Son compuestos cuaternarios de amonio, o una amina grasa en medio ácido. Son aquellos que en solución forman iones, resultando cargado positivamente el grupo hidrófobo de la molécula.

c) Zwitteriónicos o anfotéricos

Actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son aniónicos y en medio ácido son Catiónicos.

ii) No iónicos

Son los que se disuelven pero no se disocian en agua. Esta clase de tensoactivos posee propiedades hidrófilas que dependen de los grupos polifuncionales que forman enlaces de hidrógeno. Éstos son el resultado de la agregación de uno a o varias moléculas de oxido de etileno a un alcohol graso o al fenol. Los mas conocidos de este grupo son lo surfactantes etoxilados. El grupo hidrofóbico esta formado por una cadena larga que contiene un aseria de grupos débilmente solubulizantes, tales como enlaces éter o grupos hidroxilos en sus moléculas. La repetición de estas unidades débiles tiene el mismo efecto que un hidrófilo fuerte, pero no hay ionización.

#### 4.1.5 Proceso de mezclado

Además del tensoactivo, es muy importante determinar las condiciones físicas del lavado, es decir, todos aquellos parámetros mecánicos en el tanque de lavado que influyen sobre el proceso. En primer lugar se puede decir que el mezclado es la incorporación de dos o más porciones disímiles de un material, con lo que se logra un nivel deseado de uniformidad, ya sea físico o químico del producto final. Para lograr dicho fin, esta inherente, la agitación, misma que debe de generar la suficiente turbulencia para llegar a una cierta homogeneidad. Para dicha agitación es necesario considerar diferentes aspectos.

- i) Impulsor: Es un dispositivo rotatorio que fuerza a las fases a moverse en cierta dirección. Su misión consiste en convertir la energía rotatoria del motor de agitación en la combinación correcta de flujos, turbulencia y corte para lograr el resultado requerido por el proceso.

En la agitación se observan principalmente dos patrones de flujo debidos a la acción del impulsor. El primario es el movimiento rotacional tangencial al fluido. Es el que consume la mayor parte de la energía de la agitación y únicamente mantiene en suspensión las fases. Los patrones de flujo secundarios están asociados a componentes axiales o radiales. Este es el responsable, en el caso del lavado, de la remoción de contaminante y es el que consume la menor parte de la energía de lavado. Dentro de este movimiento secundario se observan patrones en forma de “8” o doble “8”, dependiendo de la geometría del impulsor. (Yongfu *et al*, 1995).

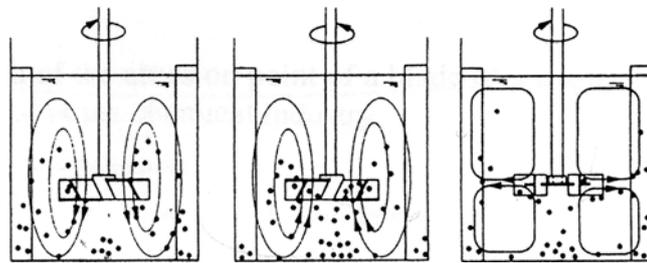


Fig 4.2: Patrones de flujo: a) y b) Paletas inclinadas, c) Rushton

- a) Geometría del impulsor:

Como se menciona es importante destacar la geometría de los impulsores. Por su forma los impulsores pueden clasificarse en dos familias y una intermedia, los de flujo radial, axial y los mixtos. Esto obedece evidentemente al patrón de flujo que cada uno provoca. Los de flujo axial generan el impulso, principalmente, en dirección perpendicular al radio de

giro, con ellos obtenemos un mezclado muy eficiente pero un mayor gasto de energía. Normalmente consisten en una base con paletas a  $90^\circ$  que van desde la mas simple con 2 paletas hasta la Rushton con 8 paletas. Los de flujo radial generan un patrón de flujo en dirección paralela al eje de giro. En este caso el gasto de energía no es tanto, pero es importante seleccionar el tipo de bombeo que se requiere pues puede ser hacia arriba o hacia abajo, dependiendo del sentido de giro. Normalmente consisten en paletas inclinadas  $45^\circ$  y pueden tener desde 3 hasta 6 paletas. En el caso de las que tienen paletas inclinadas a  $45^\circ$ , generan patrones de flujo en dirección axial y radial en proporciones iguales, lo cual es muy bueno para los fines de este proyecto, pues garantizan los fenómenos buscados, sin embargo es necesario evaluar esto cuantitativamente. Finalmente el tipo mixto, son los impulsores tipo propela marina, estos tienen paletas inclinadas pero en espiral, ofrecen la mayor potencia de bombeo y una eficiencia muy alta de mezclado, pero la potencia consumida es también la mayor. (Torres *et al*, 2002).

#### b) Posición del impulsor

Además de la geometría es necesario considerar la posición del impulsor dentro del tanque, ya que esta influye de manera determinante en la velocidad de suspensión de sólidos y en la potencia consumida. Se debe escoger una altura del impulsor con respecto al fondo del tanque, tal que el mezclado de las fases sea bueno y no se desperdicie energía por estar muy cerca. La altura del impulsor con respecto al fondo del tanque se expresa normalmente como  $C/D$ , donde  $C$  es la altura desde el fondo hasta la mitad del impulsor y  $D$  es el diámetro del impulsor. Algunos autores también

expresan la altura del impulsor como fracción de la altura total del líquido (C/H). Esta altura se determina según el proceso y depende del tipo de impulsor. Por ejemplo, cuando se usa un impulsor de cuatro paletas a 45° a un D/T de 0.5, el flujo tiende a ser más radial y a generar un impacto sobre las paredes del tanque, siendo este impulsor de tipo radial, su comportamiento está fuertemente determinado por esta relación. (Bakker *et al.*, 1998). Normalmente se acepta como relación C/T (altura desde el fondo al impulsor / diámetro del tanque) valores de  $0.1 < C/T < 0.3$  como un rango óptimo para el mezclado.

c) Tamaño del impulsor

Se expresa por medio de la relación D/T, donde D es el diámetro del impulsor y T el del tanque, esta tiene un efecto muy significativo sobre el proceso y se escoge en función de las condiciones del proceso.

d) Inclinación del impulsor

Esta tiene un gran efecto sobre todo en la creación de vértices y turbulencia. Se determina según el proceso y densidad de las fases. La desventaja de una posición central es la generación de un gran vórtice y poca turbulencia, mientras que la posición inclinada no genera una distribución uniforme dentro del tanque, en especial si se trata de sólidos en suspensión.

## ii) Tanque de agitación

Es necesario entender el rol que juega la geometría en la determinación del diseño del mezclador. El diseño inadecuado de paredes y fondos del tanque puede representar una pobre dispersión de las fases y un consumo energético excesivo.

Las bases con formas cóncavas, con conos, elípticas, planas, etc., tienen un efecto importante y si es inadecuada para el proceso puede dar como resultado una baja eficiencia y un gasto innecesario de energía. La forma de la base se determina según el tipo de fases a mezclar. En este caso por tratarse de sólido a suspender el líquido se recomienda la base plana o de plato también llamada Semi-elíptica (EBT). Los tanques de fondo cónico no se recomiendan en especial cuando lo que se quiere es la suspensión de sólidos. (Kondo *et al*, 2007)

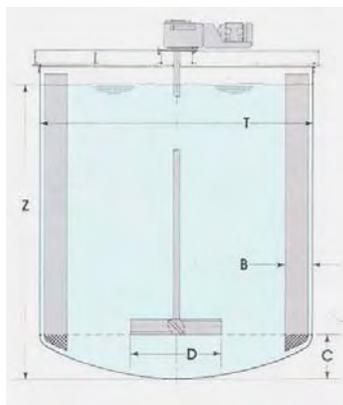


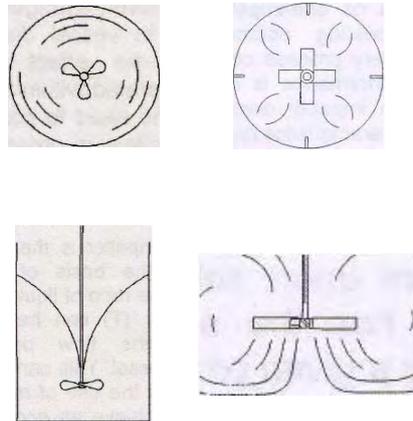
Fig 4.3: Esquema tradicional de un tanque agitado

### a) Altura del líquido

En general es aceptado que la razón ideal para la mayoría de los tanques es en el cual la altura del líquido ( $z$ ) es igual al diámetro del tanque ( $T$ ). Los rangos más utilizados de  $z/T$  son de 0.9 a 1.2.

b) Deflectores

Estos permiten que se desarrolle el régimen de flujo requerido para alcanzar un resultado aceptable. Un tanque sin deflectores presenta un vórtice que aumenta el nivel del líquido notablemente y genera mayoritariamente patrones de flujo primarios, que solo suspende las partículas, más no son muy útiles para el lavado. Para algunos usos se recomienda no poner los deflectores en las paredes o en el fondo del tanque para evitar que se acumulen partículas y la generación de corrientes parásitas. Sin embargo esto depende de los requerimientos del proceso y de otras variables como la velocidad de agitación y el mismo número de deflectores. Se ha comprobado, que para operaciones de emulsificación y en donde se busca contacto entre fases acuosas y oleosas por medio de surfactantes, el uso de deflectores hace mucho más eficiente el proceso. (Torres y Zamora., 2002)



*Fig 4.4: Patrones de flujo con y sin deflectores*

### iii) Velocidad de agitación:

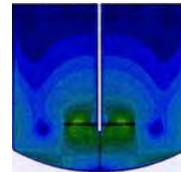
Es necesario que la velocidad de agitación sea suficiente para el mezclado de las fases. En este caso se busca lograr la suspensión y lavado de sólidos, donde todas las partículas de suelo se encuentren en contacto con la fase líquida y ninguna permanezca en el fondo del tanque más de dos o tres segundos. En el caso del lavado, se recomienda estar por encima de esta velocidad, pues la energía extra suministrada es aprovechada en la remoción. La velocidad mínima de agitación para garantizar la suspensión total de sólidos se conoce como  $N_{js}$ . (Armenante *et al*, 1998)

Según la intensidad de la agitación de se han desarrollado diferentes términos:

- Suave: Operaciones de almacén, tanques contenedores, de alimentación o de floculación.

- Tiempo largo de agitación
- Superficie con poco movimiento.

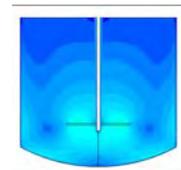
Fig 4.5



- Moderada: Adecuada para la mayoría de las aplicaciones de mezclado. Tanques de reacción y de agitación.

- Tiempo de agitación moderado.
- Superficie con movimiento fuerte

Fig4.6



- Vigorosa: Operaciones críticas de mezclado
  - Reactores.
  - Transferencia de calor.
  - Control de pH.

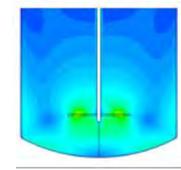


Fig 4.7

- Violenta: Aplicaciones especiales:
  - Reactores
  - Transferencia de calor en condiciones críticas.
  - Condiciones de intercambio.
  - Polímeros
  - Agitación instantánea.
  - Salpicaduras en la superficie.

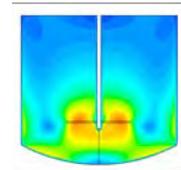


Fig 4. 8

#### 4.1.6 Proceso de mezclado con más de un impulsor

En términos generales el uso de dos o más impulsores depende de la altura del líquido dentro del tanque, en relación con el diámetro del tanque ( $Z/T$ ) aunque, muchas veces debe de tomarse en cuenta cuando la viscosidad de la solución es muy alta, cuando se quiere hacer un mezclado a baja velocidad durante el llenado o vaciado de tanques.

Se ha observado que el uso de otro impulsor no tiene mucho efecto sobre el  $N_{js}$  si se conserva la misma relación  $C/T$  para el impulsor inferior y que aumenta la homogeneidad de la suspensión si la distancia entre los impulsores no es muy grande. Este comportamiento se debe a los ciclos que se generan dentro del tanque, con dos

impulsores se generan dos ciclos independientes y el ciclo del impulsor superior ayuda considerablemente a una mejor distribución de los sólidos en todo el volumen disponible por la suspensión. (Bakker *et al*, 1998).

i) Tipos de impulsor

Para establecer un sistema de dos o más impulsores, se debe de estudiar los tipos de impulsores que pueden trabajar juntos, según sean los requerimientos de cada sistema. En la literatura se recomienda el uso de impulsores de patrones de flujo diferentes, es decir, axial y radial combinados. Se han probado las combinaciones de una Rushton con una de cuatro paletas inclinadas, Rushton con Rushton y Rushton con A-310 para sistemas medianamente viscosos. Por su capacidad de corte, siempre se usa el impulsor Rushton, dado que tiene la capacidad de fragmentar las partículas y generar mayor área de contacto. Por su capacidad de bombeo y dispersión se recomiendan impulsores axiales. (Sánchez *et al*, 1992). Para el caso del lavado se recomienda colocar en el fondo los impulsores de dispersión y en la parte superior los de corte, con el fin de consumir menos energía en la suspensión y aprovechar la capacidad de corte de la turbina Rushton, en todas las partículas.

ii) Distancia entre impulsores

Otro factor importante a tomar en consideración, es la distancia entre impulsores. Dependiendo de esta distancia, pueden darse algunos fenómenos no deseados, por ejemplo, si la distancia es muy grande, los flujos generados por ambos impulsores pueden quedar muy lejos y se generaría una zona de estancamiento entre los radios de influencia de ambos. Por el contrario, si los impulsores están muy cerca y hay

un traslape en los flujos y/o estos son incompatibles (i.e. direcciones opuestas), se generarían zonas con un exceso de turbulencia, donde los intercambios no son eficientes y hay un mayor consumo de energía, aunado al desperdicio de esta que representa el que dos impulsores estén actuando sobre la misma zona. (Uhl y Von Essen, 1986)

Optimo

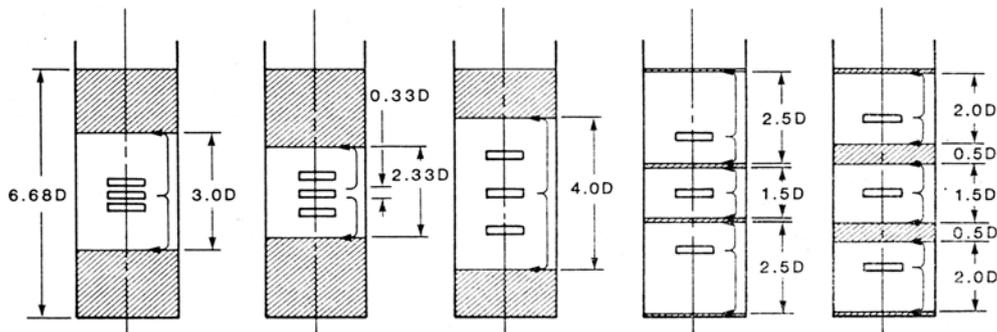
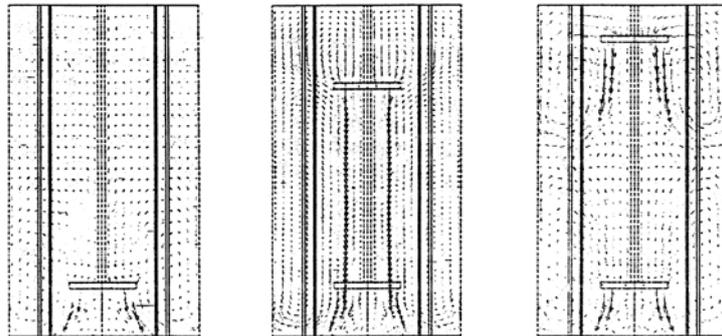


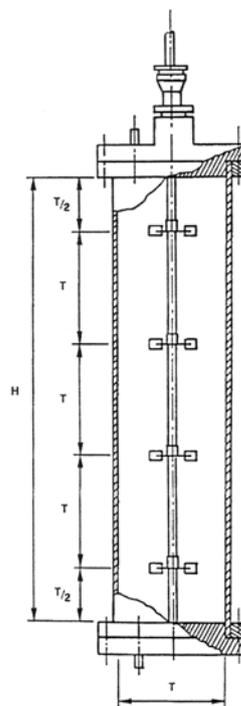
Fig 4.9: Efecto del espaciamiento sobre los patrones de flujo y dispersión. La parte sombreada es la zona de estancamiento.

En la teoría se pueden encontrar relaciones de  $T/3$  para espaciar cada impulsor de manera equidistante uno de otro, sin embargo, como ya se dijo, para este análisis también se hace necesario el considerar los tipos de flujo generados por cada impulsor. (Bakker *et al*, 1998).

Se ha llegado a aceptar como dimensiones de tanque ideales para el uso de dos impulsores dentro de  $0.7 < Z/T < 0.8$  y es un método usado mayormente en fermentadores o tanques a mucha presión. (Uhl y Von Essen, 1986)



*Fig 4.10: Distribución de patrones de flujo según la distancia entre impulsos.*



*Fig 4.11: Distribución geométrica uniforme*

El empleo de varios impulsores, se ha aprovechado como un método para disminuir la formación de espuma en sistemas de alta generación de espuma. La espuma es un elemento no deseado, pues disminuye el área de contacto entre las fases e incrementa el volumen total de trabajo, por lo que es deseable, sobre todo para el caso del lavado, que la espuma sea lo mínimo y sea estable. La

formación de espuma depende de cuanto aire incorpore cada impulsor al sistema y de los patrones de flujo que este genere. Para disminuir la cantidad de espuma se han empleado impulsores superiores de bombeo, pues estos generan corrientes muy rápidas apenas por debajo de la superficie, lo que ayuda a evitar la formación de espuma. (Boon *et al*, 2001).

Sin embargo, para un mejor lavado se ha recomendado que el impulsor superior sea de corte, por lo que se puede esperar una mayor formación de espuma debido al surfactante y al ordenamiento de impulsores.

#### 4.1.7 Normatividad

Los artículos constitucionales que sirven de base en cuestión ambiental son el 4, 25, 73 y el 115. Así mismo, el título cuarto de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), se refiere propiamente a la contaminación de suelos, destacando los artículos: 134, 136, 139 y 140. Así mismo destacan los artículos 15 y 152 BISS de los capítulos III de Política Ambiental y VI de Materiales y Residuos Peligrosos.

Las normas de competencia en cuestión de la contaminación de suelos son las siguientes:

- i) Norma Oficial Mexicana de Emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002, que establece los límites permisibles máximos de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para su restauración. A la anterior se suma el anteproyecto NOM.138-ECOL-2003. En marzo del 2005, se

cambió el nombre a esta norma por el de NOM-138-SEMARNAT/SSA-2003 siendo de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y ahora su vigilancia y sanción está a cargo de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

- ii) NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones sobre fertilidad y clasificación de suelos.
- iii) PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004: Proyecto que establecerá los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, Talio y vanadio.
- iv) NOM-115-SEMARNAT-2003: Especificaciones de protección ambiental que deben observarse en las actividades de perforación y mantenimiento de pozos petroleros terrestres para exploración y producción en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.
- v) NOM-117-SEMARNAT-1998: Establece las especificaciones de protección ambiental para la instalación y mantenimiento mayor de los sistemas para el transporte y distribución de hidrocarburos y petroquímicos en estado líquido y gaseoso, que se realizan en derechos de vía terrestres existentes, ubicados en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.
- vi) NOM-141-SEMARNAT-2003: Requisitos para la caracterización del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperaciones de presas de jales.
- vii) NOM-002-ECOL-1996: Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

viii) NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Tabla 4.2: Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo

FRACCION DE HIDROCARBUROS	Uso de suelo predominante <sup>1</sup> (mg/kg base seca)			Método analítico
	Agrícola <sup>2</sup>	Residencial <sup>3</sup>	Industrial	
Ligera	200	200	500	Anexo A.1
Media	1,200	1,200	5,000	Anexo A.2
Pesada	3,000	3,000	6,000	Anexo A.3

Tomado de: *NOM-138-SEMARNAT/SS-2003*

## 4.2 Antecedentes

Este trabajo parte de la necesidad de hacer una evaluación más exhaustiva de las variables que toman parte en la respuesta del método de lavado por surfactantes de un suelo contaminado con hidrocarburos. En trabajos anteriores ya se ha determinado que es un proceso de menor duración que la remediación por biopilas y con la posibilidad de realizarse en varias etapas (Iturbe *et al*, 2004). Sin embargo es necesario analizar mas a fondo las diferentes condiciones relacionadas con el lavado de suelos para reducir el empirismo que gira alrededor de este proceso y poderlo llevar a cabo con mayor eficiencia y menor costo.

Previamente se han estudiado ya los efectos de las diferencias de geometría de los impulsores al preparar emulsiones de aceite en agua, determinándose que hay una influencia directa del tipo de impulsor y la velocidad de agitación sobre el consumo de energía en el proceso (Torres y Zamora, 2002). Ha quedado ya probado que el uso de surfactantes y su efecto en la tensión superficial, contribuyen en la remoción de hidrocarburo del suelo (Verma y Kumar, 1998). Se ha escrito también sobre el efecto del uso de múltiples impulsores y su geometría sobre los patrones de flujo y la suspensión de suelo (Baker *et al*, 2000). Así como un poco sobre el lavado de suelos contaminados por hidrocarburos tan solo en la zona de saturación (Xing.hui *et al*, 2000). Sin embargo son pocos que tratan la problemática de lavado de suelos desde un punto de vista más aplicable a escala industrial y considerando las condiciones reales de un suelo contaminado. Fue apenas hasta el año pasado (Climent, 2007) que se hicieron pruebas para determinar, de entre muchas opciones, el surfactante óptimo para un lavado y asociar posteriormente el consumo de potencia de un equipo de lavado utilizando una determinada solución de lavado (surfactante y agua) y determinadas

velocidades de agitación, a las condiciones del proceso. Por medio del mencionado estudio se establecieron algunas de las condiciones de lavado y un método para evaluar la energía consumida en el proceso y la remoción final de los contaminantes (Climent, 2007). Posteriormente se realizó el estudio del efecto del tamaño de partícula de suelo y la velocidad de agitación con diferentes impulsores sobre la eficiencia de lavado (Doroteo, 2008). Por tanto el presente trabajo ahonda en este tema y evalúa para un surfactante óptimo, el efecto de la cantidad de suelo, la velocidad de agitación, la geometría y número de impulsores sobre la energía consumida y la remoción de contaminantes. Con esto se busca cubrir la ya mencionada necesidad de conocer un poco mejor este proceso para su correcta aplicación. Hace falta aun mucho estudio al respecto, pues como a continuación se muestra, aun hay muchas condiciones que deben ser evaluadas y precisadas para completar el conocimiento al respecto del lavado de suelos como una técnica eficiente y rentable de tratamiento de suelos contaminados.

## 5. METODOLOGÍA

El siguiente diagrama (Fig. 5.1) describe el proceso general seguido para la realización del trabajo experimental. A continuación se describe a mayor detalle el mismo y en la sección de Resultados, se muestran los resultados obtenidos y los análisis adicionales.

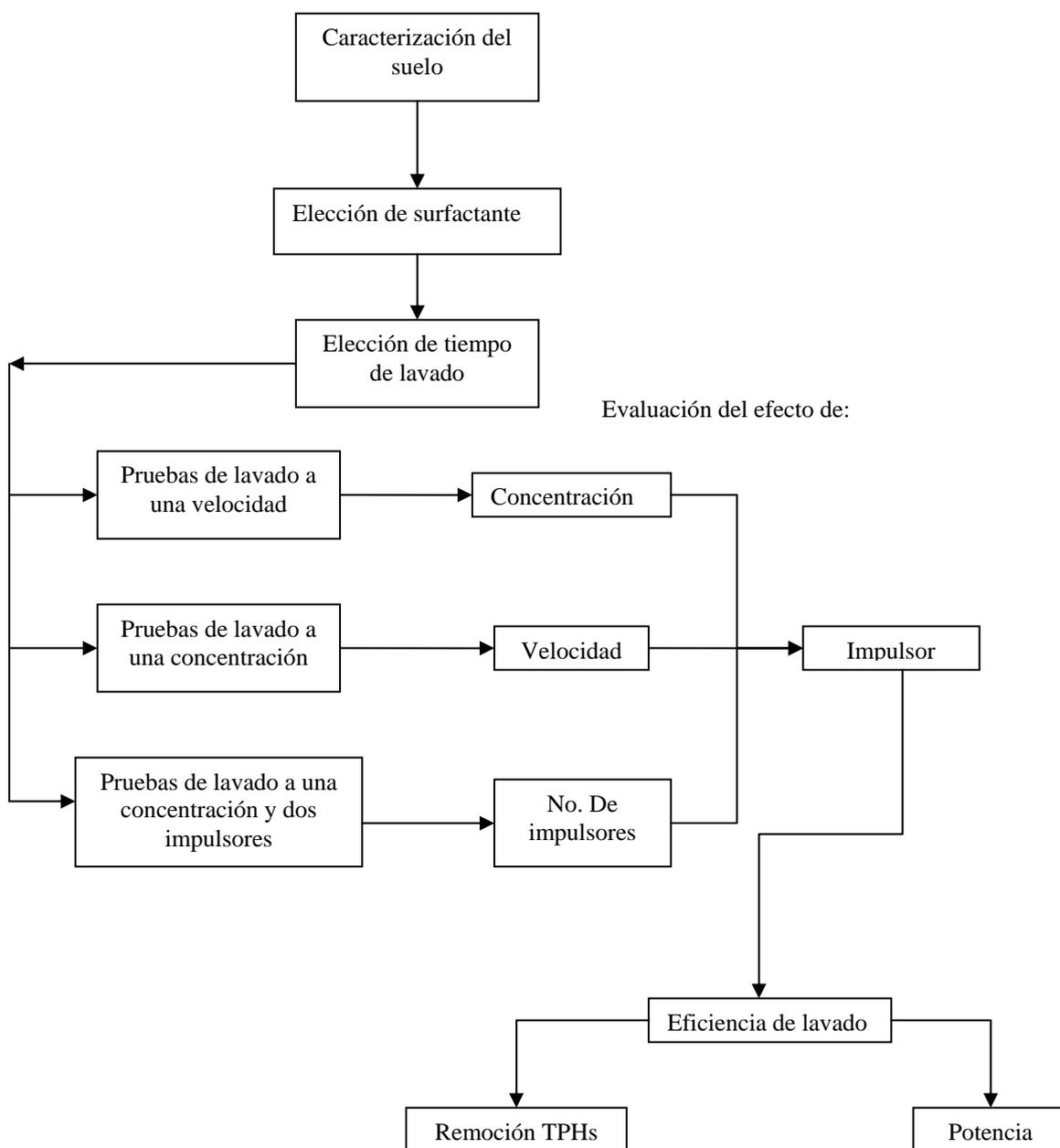


Fig 5.1: Diagrama de proceso

## 5.1 Caracterización del suelo

El suelo había sido obtenido del sitio contaminado por el derrame de crudo de un oleoducto en el Campo petrolero Cinco Presidentes en el Ejido Ley Federal de la Reforma Agraria, Municipio de Cárdenas, Tabasco. Las muestras fueron tomadas entre los 10 y 80 cm de profundidad.

El suelo ya había sido analizado para un trabajo anterior y por tanto esta caracterización se mantiene para este trabajo. (Leyva, 2007)

### 5.1.1 Granulometría

Se realizó la granulometría de todo el suelo a estudiar para determinar de forma cuantitativamente la distribución de las partículas según su tamaño. Se hizo pasar el suelo disponible durante 10 minutos por mallas normalizadas desde malla N° 4 a la N° 200.

1. Se utilizaron las mallas Monitox mostradas en la tabla 5.1.

*Tabla 5.1: Mallas utilizadas en prueba granulométrica.*

Malla	Tamaño de abertura de malla (mm)
4	4,75
8	2,38
10	2
20	0,85
40	0,445
60	0,25
100	0,15
200	0,07366
Finos	Menor a 0.05

2. Se colocan las mallas de manera que queden, de abajo hacia arriba, de la de mayor abertura hasta la de menor en el fondo.
3. Se pesa la muestra de suelo que se va a tamizar y se coloca en la malla superior.
4. Se agita el sistema de mallas por 10 minutos,
5. Se revisa que la separación haya sido adecuada.
6. Se destapa cada malla y se pesa el suelo retenido por cada una.
7. Se traza la curva de distribución granulométrica.
8. Se calculan los coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc).

#### 5.1.2 Peso seco

Se determinó la humedad de modo que se hicieron las correcciones siempre a peso de suelo seco.

1. Se colocan 10 gramos de suelo en charolas de aluminio a peso constante previamente determinado.
2. Se coloca en la estufa a 180°C durante 24 horas.
3. Se deja enfriar por 1 hora.
4. Se pesa de nuevo el suelo y la charola.
5. Por diferencia se conoce la cantidad de humedad evaporada.
6. Se calcula el porcentaje de humedad.
7. Para la determinación del peso de suelo seco se emplea la ecuación:

$$\frac{(100 - \% \text{ Humedad}) * (\text{Peso de suelo humedo}(g))}{100} = \text{Peso de suelo seco}(g)$$

### 5.1.3 Concentración de TPH

La determinación de hidrocarburos en las muestras se realizó por medio del método Extracción por Hexano 9071 B de la EPA en la NMX-AA-134-SCFI-2006.

1. Este consiste en colocar 5 gramos de suelo dentro de un cartucho de celulosa con 5 gramos de sulfato de sodio anhidro para retener la humedad.
2. El cartucho con el suelo es colocado dentro del soxhlet especial. En la parte inferior un matraz a peso constante con 130 ml de hexano grado analítico.
3. El equipo montado sobre una parilla de calentamiento hace una circulación de hexano evaporado del matraz hacia el soxhlet.
4. En el soxhlet es condensado por un refrigerante y por un sifón es devuelto al matr az al alcanzar el nivel máximo del cartucho de celulosa.
5. Cada vez que el hexano regresa con el contaminante disuelto al matraz se considera un ciclo, es necesario 80 ciclos para terminar el proceso de extracción.
6. Finalmente el matr az es desmontado y por medio de un rotavapor se evapora el hexano quedando únicamente el hidrocarburo removido del suelo.
7. El matraz se calienta a 180 C durante 24 horas para asegurar nuevamente su peso constante.

8. La diferencia de peso es la cantidad de hidrocarburo removida. Conociendo la cantidad de hidrocarburo total en el suelo antes del lavado, se puede obtener el porcentaje de remoción. Previo el cálculo en base seca.

La fórmula utilizada es:

$$\frac{TPH_{TOTAL} - TPH_{REMOVIDO}}{TPH_{TOTAL}} * 100 = \% \text{ Remoción}$$

## 5.2 Elección del surfactante

Con el fin de conocer cual es el surfactante óptimo para lavar el suelo en cuestión, de entre los disponibles en el laboratorio, se hizo la siguiente selección. La selección se hizo en base a la máxima remoción observada

1. Se colocaron 6 gramos de suelo en viales de cristal
2. A cada muestra se le añaden 20 ml de la solución agua surfactante al 0.5% w/v.
3. Se dejaron en agitación continua de 95 RPM durante 23 horas y se dejó sedimentar por 1 hora.
4. Se dejaron secar las muestras durante una semana.
5. Posteriormente se hizo la corrección a base seca y la determinación de TPHs.
6. El que presentó mayor remoción se seleccionó para realzar los lavados.

### 5.2.1 Concentración óptima

Una vez realizada la selección del surfactante, se repetirá la prueba de eficiencia pero a diferentes concentraciones de este, a fin de determinar la óptima.

1. Se escogen concentraciones por arriba y por debajo de la concentración de la prueba de eficiencia de tensoactivo.
2. Se realizó la prueba en viales de forma idéntica a la descrita para la elección de surfactante.
3. La concentración que presentó la mayor remoción se eligió para las pruebas de lavado.

### 5.3 Tiempo de lavado

Con el fin de determinar la duración de cada lavado en el tanque agitado de una manera más objetiva, se hizo una cinética de lavado. Esta consiste en determinar concentración de hidrocarburo en la mezcla de lavado por medio de espectrofotometría, conociendo que la absorbancia es proporcional a la concentración de hidrocarburo.

La concentración se midió en función del tiempo hasta llegar a una etapa de equilibrio. Esta prueba se realizó para cada tipo de impulsor.

1. Esta técnica aprovecha que la solución agua-surfactante se enriquece en contaminante removido del suelo con el paso del tiempo y durante la agitación.

2. Se escogió un lapso de tiempo en el cual serán tomadas cada vez una muestra del agua de lavado directo del tanque de mezclado. En este caso fue de 3 minutos.
3. Esta muestra se deja sedimentar 5 minutos.
4. Posteriormente se toma una alícuota que se diluye en agua en proporción 1:100. la dilución es llevada a un espectrógrafo que da una medida de absorbancia.
5. Esta absorbancia aumenta con el tiempo y es directamente proporcional al contaminante disuelto en el agua por la ley de Lambert y Beer.

$$A = \alpha * l * c$$

Donde:

A: Absorbancia

$\alpha$ : Coeficiente de absorción o de absorbancia molar de la solución.

C: Concentración de la especie absorbente

6. Se entiende además que el contaminantes disuelto estaba antes en el suelo y por lo tanto a mayor hidrocarburo en la solución, mayor remoción de contaminante del suelo.

En esta prueba se tienen que tener ya determinadas las condiciones físicas del lavado, como el diámetro del tanque, altura del líquido y del impulsor, diámetro y geometría del impulsor, velocidad de rotación y concentración de la solución de lavado. Estas condiciones deben de ser las mismas para cada

prueba, la cual se realizó para cada tipo de impulsor, dado que esta será una variable física que cambiará a lo largo del lavado

#### **5.4 Pruebas de lavado**

- Procedimiento general:
  1. En el tanque de mezclado limpio y seco se vertieron 600 ml de la solución agua surfactante y los gramos de suelo correspondientes a la prueba.
  2. Se calibró el sistema antes de cada prueba para garantizar una mejor exactitud. .
  3. El sistema se montó teniendo en cuenta que la flecha debe de estar recta, en el centro del tanque y a la altura correspondiente.
  4. El equipo se prende ala velocidad deseada y se deja funcionar el tiempo necesario para el lavado.
  5. Al finalizar este tiempo, se desmontó el equipo y se colocó el suelo en charolas para secarse.
  6. Una semana después se tomó una muestra del suelo seco y se le determinó la humedad y el contenido de TPHs.
  7. Se calculó el porcentaje de remoción con respecto al suelo original.

##### 5.4.1 Pruebas del efecto de la concentración del suelo sobre la remoción.

1. Se mantuvo una velocidad constante para todas las pruebas de 1400 RPM. En trabajos anteriores se encontró que esta velocidad es muy buena para el lavado de suelos. (Climent, 2007)

2. Se seleccionaron 4 diferentes concentraciones de suelo y su duración fue determinada por la cinética de lavado. Las concentraciones fueron de 10%, 20%, 30% y 40% w/v de suelo en solución de lavado. Con estas concentraciones se considera que se está trabajando un volumen de suelo más real para el caso de un lavado piloto y mucho mayor a las concentraciones reportadas en la literatura.
3. De cada prueba se obtuvo la potencia requerida en el tiempo de lavado
4. Se calculó la energía asociada a cada impulsor.
5. Se determinó la concentración de TPH y la remoción en cada prueba.
6. Pruebas del efecto de velocidad.
7. Se mantuvo una concentración de suelo constante de 30% por ser una concentración intermedia de las probadas anteriormente.
8. Se midió la potencia en el tiempo a 4 diferentes velocidades para cada tipo de impulsor. Las velocidades fueron de 1200, 1400, 1550 y 1700 rpm para abarcar velocidades mayores a la ya probada y una menor, que se encontrara por encima del  $N_{js}$  de cada experiencia.
9. De igual manera se obtuvo la energía asociada y
10. La remoción de TPHs por proceso.
11. Las dimensiones del tanque empleado en el lavado son las que se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Dimensiones del tanque con un impulsor

Diámetro del tanque	10	cm
Diámetro del impulsor	5	cm
Altura del líquido	10	cm
Altura del impulsor	5	cm
Deflectores	1	cm
Volumen	2.35	L
C/D	1	
d/D	0.5	

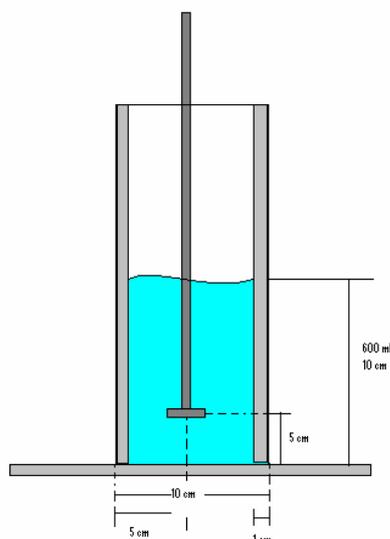


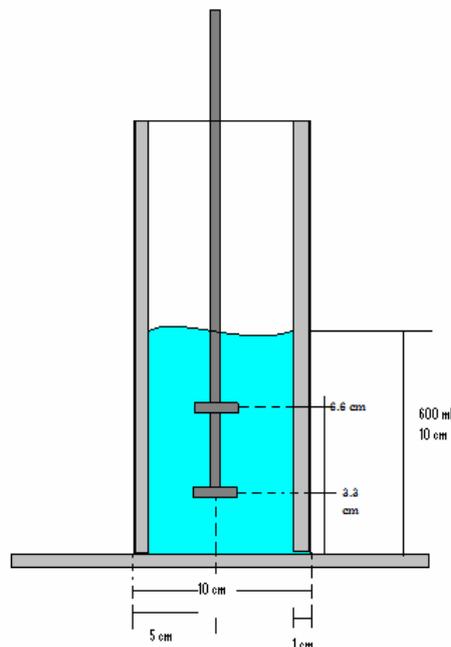
Fig 5.2: Diagrama de tanque con un impulsor

- Pruebas con sistema de dos impulsores:
  1. Se mantuvo una concentración de suelo constante de 30%.
  2. Las dimensiones del tanque y la altura de la solución de lavado se mantuvieron igual que en las experiencias anteriores.
  3. Los sistemas de impulsores fueron los siguientes:
    - a. Rushton (Superior) y Rushton (Inferior). Nomenclatura: R100/R100
    - b. Rushton (Superior) y tres paletas planas (Inferior). Nomenclatura: R100/A100
    - c. Rushton (Superior) y cuatro paletas inclinadas 45° (Inferior). Nomenclatura: R100/A200

4. El impulsor superior se colocó a 6.66 cm y el inferior a 3.33 cm de la base del impulsor.
5. Se midió la potencia en el tiempo a 4 diferentes velocidades para cada sistema de impulsores.
6. Se obtuvo la energía asociada y
7. La remoción de TPHs para el proceso.
8. Las dimensiones de tanque empleado para el lavado con dos impulsores se muestra en la tabla 5.3.

*Tabla 5.3: Dimensiones del tanque con dos impulsores*

Diámetro de tanque	10	cm
Diámetro del impulsor	5	cm
Altura del líquido	10	cm
Altura del impulsor 1	3.33	cm
Altura del impulsor 2	6.66	cm
Deflectores	1	cm
H/D	1	
d/D	0,5	
h1	1/3H	
h2	2/3H	
Deflectores	1/10	
Volumen	2.35	L



*Fig 5.3: Diagrama de tanque con dos impulsores*

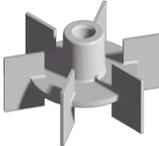
## 5.5 Suelo tratado

Se trató un suelo contaminado proveniente del Campo petrolero Cinco Presidentes en el ejido Ley Federal de la Reforma Agraria , Municipio de Cárdenas, Tabasco. El terreno original había sido contaminado por un derrame de crudo de un oleoducto año y medio antes de que se tomara la muestra, y estaba cubierto de maleza y pastizal. La muestra fue obtenida entre los 10 y 80 cm de profundidad.

## 5.6 Impulsores utilizados

Los impulsores empleados en este trabajo se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 5.4: Impulsores utilizados*

Tipo de Impulsor	Nombre	Descripción	Nomenclatura	Dimensiones		Esquema
				Diametro	Altura	
Radial	Rushton	6 paletas planas a 90°	R100	0.050 m	0.010 m	
	Tres paletas planas	3 paletas planas a 90°	A100	0.010 m	0.015 m	
Axial	Cuatro paletas inclinadas	4 paletas planas  inclinadas 45°	A200	0.050 m	0.010 m	

## **5.7 Equipo de agitación**

El equipo usado para la agitación consiste en el motor: Lightnin® Lab Master™ Mixer. BK223116 y una flecha de acero de 60 cm.

## 6. MATERIALES

### Materiales de laboratorio

Los materiales empleados en este trabajo se enlistan en la tabla 6.1.

*Tabla 6.1: Materiales de laboratorio*

Artículo	Material
Vasos de precipitados de 50 ml	Pyrex
Vasos de precipitados de 100 ml	Pyrex
Vasos de precipitados de 250 ml	Pyrex
Probeta de 100 ml	Pyrex
Matraces de bola de 250 ml	Pyrex
Matraz de bola para rotavapor	Pyrex
Soxhlets	Kimax
Refrigerantes	Kimax
Tubos de ensaye	Pyrex
Pipetas graduadas de 10 ml	Pyrex
Pipetas graduadas de 5 ml	Pyrex
Micropipeta de 1 ml	Brand Transferpette
Perillas de pipeta	Cinceware
Cartuchos de extracción	Whatman
Siportes universales	AESA
Pinzas para soporte	
Termómetros	
Mangueras	
Embudos de plástico	
Guantes de latex	
Espátulas	
Agitadores	
Matraz volumetrico de 2000 ml	Pyrex
Vaso de agitación con deflectores	Acrilico

## Equipos

Los equipos empleados en esta tesis se describen en la tabla 8 a continuación.

*Tabla 6.2: Equipos empleados*

Equipo	Procedencia
Mallas normalizadas	Monitox
Estufa	Fisher
Desecador	Nucerite
Blanaza analítica	Ohaus
Mantillas de calentamiento	
Campana de extracción	
Equipo de agitación horizontal	Contruido en el Instituto
Rotavapor	Hediolph
Espectrofotómetro	Milton Roy Spectronic 20D
Agitador de flecha	Lightnin® Lab Master ™BK223116

## Sustancias

Las sustancias utilizadas en el desarrollo experimental se muestran en la tabla 9.

*Tabla 6.3: Sustancias empleadas*

Sustancia	Procedencia
Suelo	Campo petrolero Cinco Presidentes, Tabasco
Hexano	J.T. Baker
Silicato de sodio deshidratado	J.T. Baker
Agua destilada	

### 6.4 Suelo tratado

El análisis llevado a cabo sobre el suelo empleado en las pruebas experimentales se describe en la tabla 10.

*Tabla 6.4: Caracterización previa del suelo.*

Parámetro	Método / Fundamento	Referencia	Valor	
Contenido de agua	Método de estufa por gravimetría	NOM-021-RECNAT-2000	24.90%	
Capacidad de retención de agua	Drenado en maceta-gravimetría	Reyes, 1996	22.50%	
Color (seco y humedo)	Carta Munsell	NOM-021-RECNAT-2000	10YR2/3 (seco), 10RY4/4 (humedo)	
Granulometría	Cribado por mallas	ASTM, 1998 D422-63	Arena mal graduada	
Textura	Bouyocus	Reyes, 1996 (modificada)	Arena 85.7%, Limo 4.55% y Arcilla 9.75%	
Densidad real	Picnómetro	NOM-021-RECNAT-2000	2.71 g/cm <sup>3</sup>	
Densidad aparente	Probeta	Gandoy, 1990	1.15 g/cm <sup>3</sup>	
Porosidad	Indirecto por densidades reales y aparentes	Gavande, 1991	57.60%	
pH a 25°C (en agua)	Electrométrico	NOM-021-RECNAT-2000	5.98	
Conductividad eléctrica a 25°C	Método de la pasta saturada-cuaductímetro	NOM-021-RECNAT-2000	0.03 dS/m	
Carbono orgánico y materia orgánica	Método de Walkley-Black	NOM-021-RECNAT-2000	3.38%	
			5.82%	
TPH fracción pesada	Extracción en hexano	EPA 9071b-1996	32003 mg/kg	
Nitrógeno total	Analizador Elemental CNHS/O Perkin Elmer 2400 Series II		2600 mg/kg	
Fósforo disponible	Bray y Krutz	Van Reeuwijk, 1992	3.01 mg/kg	
Relación C:N:P	Relaciones porcentuales	Fahnestock et al., 1998	100:29:00	
Na, K, Ca y Mg	Digestión ácida.ICP/AES	EPA 3051-1996 y  EPA 6010B-1996	Na	81.44 mg/kg
			K	188.35 mg/kg
			Ca	260.18 mg/kg
			Mg	439.85 mg/kg
Bacterias aerobias	Cuenta de bacterias aerobias	NOM-110-SSA1-1994 Y NOM-092-SSA-1994	3.9EXP5 UFC/g (+/- 3EXP5)	
Actividad microbiana por respirometría	Titulación ácido-base	Alef, 1998	0.94 mg CO <sub>2</sub> /kg día (+/- 0.29)	

*Tomado de Leyva, 2007*

## 6.5 Surfactantes

Los surfactantes empleados y algunas de sus características se observan en la tabla 11 a continuación.

Tabla 6.5: Nombres químicos y clasificación de surfactantes

Surfactante	Nombre químico	Naturaleza	P.M. (g/mol)	CMC(mg/L)	HLB	Procedencia
TW80	Monoleato de sorbitan Poe=20	No ionico	1308*	65.4*	15*	Drogueria Cosmopolita
Brij 35	Lauril eter Poe=23	No ionico	1206*	39.6**	16.7*	Grupo Protinus
Ew 600	Nonil fenol Poe=6	No ionico	483*	45.06*	11*	Conjunto Lar de México
Emulgin 1000	Nonil fenol Poe=10	No ionico	660	49.5**	13.5*	Conjunto Lar de México
Texapon 40	Lauril eter sulfato de sodio	Aniónico	442*	1458*	4***	Conjunto Lar de México
Maranil lab	Dodecil bencen sulfato de sodio	Aniónico	348*	1392*	11.7****	Conjunto Lar de México
Surfacpol G	NR	Aniónico	NR	NR	NR	Polaquimia
Polafix CAPB	Propil-cocamida betaina	Zwitteriónico	359	100400	NR	Polaquimia
Surfacpol 203	Sulfosuccinato de dioctilo y sodio	Aniónico	362	NR	NR	Polaquimia
TW60	Sorbitan monoestereato	No ionico	1310*	NR	14.9*	Drogueria Cosmopolita
TW20	Sorbitan monolaurato	No ionico	1226*	60.74*	16.7*	Drogueria Cosmopolita
SDS	Dodecil sulfato de sodio	Aniónico	288,4*	400*	40*	Sigma

\* Torres et al, 2005

\*\* Milton, 1986

\*\*\* Klammt et al, 2005

\*\*\*\* [www.unitopchemicals.com](http://www.unitopchemicals.com)

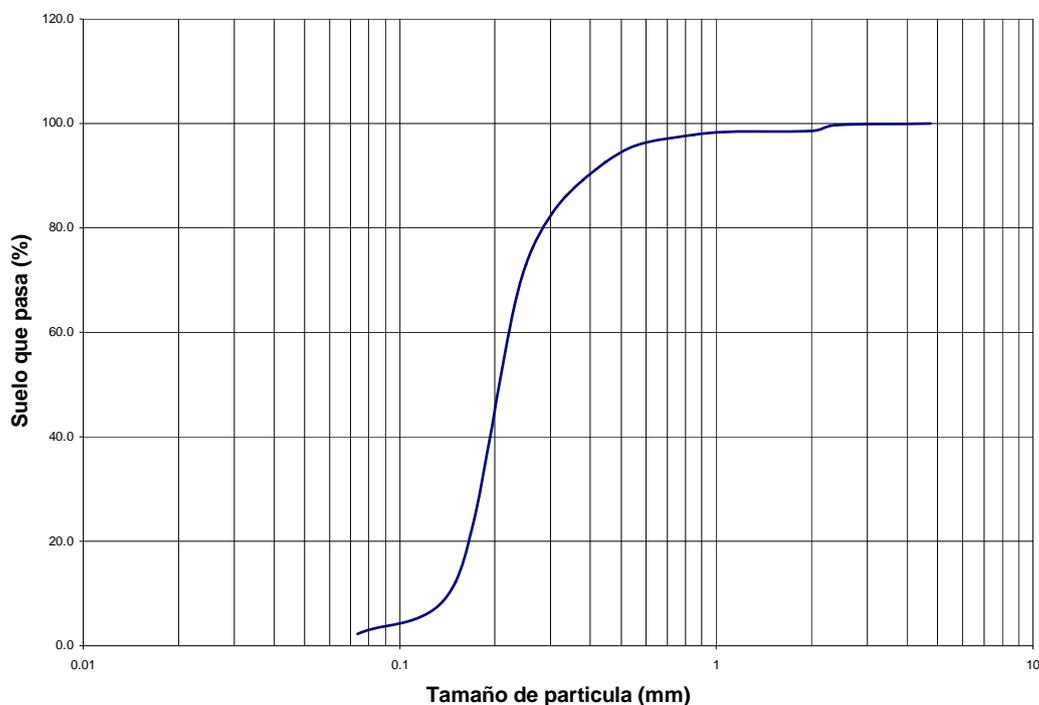
## 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### Clasificación del suelo

#### 7.1.1 Granulometría

Como primera prueba se hizo una caracterización del tipo de suelo por medio de la prueba edafológica por granulometría. Esta consiste en hacer pasar una cantidad de suelo por mallas de diferentes aperturas, las mallas son colocadas en orden decreciente de tamaño de apertura. Esto permite la retención gradual del suelo por tamaños de partícula. Se hizo pasar todo el suelo disponible para la experimentación por las mallas disponibles. La caracterización previa del suelo se muestra en la tabla 6.4.

Los resultados se graficaron como porcentaje que pasa por la malla (%) contra la abertura de la misma (mm), como se puede observar en la figura 7.1.



*Fig 7.1: Curva de distribución de partícula*

Dada la forma de la grafica y los índices de uniformidad y curvatura:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{y} \quad Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}}$$

que nos indican la relaciones de cantidades de partículas retenidas entre los límites de arcillas, arenas y limos. Se obtuvieron como valores de estos coeficientes:

$$Cu = 1.5$$

$$Cc = 1$$

Considerando los límites:  $Cu > 6$  y  $1 < Cc < 3$

Basándose en este análisis se puede concluir que el suelo esta compuesto principalmente de arena fina mal graduada. Por tanto es recomendable el lavado por agitación dado el tamaño de partícula y su distribución.

#### 7.1.2 Determinación de contaminación del suelo

Se determinó la concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPHs) en el suelo. Para ello se homogenizó nuevamente el suelo, incorporando todas las partículas que fueron separadas en las mallas.

La concentración de TPHs fue determinada por el método de extracción en soxhlet por hexano de la EPA 9071 B. (NMX-AA-134-SCFI-2006)

La concentración obtenida fue de 32003 mg/kg. Recordando que el límite permisible máximo de la NOM-138-SEMARNAT de fracción pesada, aplicable para este caso, es de 6,000 mg/kg por tanto este suelo esta altamente excedido en contaminación y si se hace necesario el realizar un proceso de remediación.

## **7.2 Surfactante óptimo**

Se procedió a seleccionar el tipo de surfactante óptimo para el lavado de este suelo en particular. Esto es necesario puesto que la eficiencia del surfactante depende de las propiedades de cada suelo como su porosidad, tamaño medio de partícula, pH, hidrofobicidad, etc., así como del tipo de contaminante presente.

Se utilizaron 12 surfactantes diferentes y dos blancos; agua y agua de mar. El agua de mar se uso con el fin de observar el efecto de la sales en la remoción y determinar si la presencia de iones aumentaba la desorción del contaminante.

Los surfactantes y blancos utilizados se muestran en la tabla 7.1.

Estos surfactantes pertenecen a tres grandes grupos, los no iónicos, aniónicos y anfóteros o zwitteriónicos. No se probó con surfactantes catiónicos por que normalmente el suelo tiene cargas aniónicas (negativas) y por su fuerte atracción a los componentes del tensoactivo, su remoción no es eficiente. Las propiedades iónicas y nombres completos de los tensoactivos se muestran en la tabla 7.2.

Tabla 7.1: Surfactantes utilizados

Surfactante
Agua
Agua de mar
Texapon 40
Maranil
Surfacpol 203
Surfacpol G
SDS
TW 20
TW 80
Brij 35
TW 60
Emulgin 1000
EW 600
Polafix CAPB

Tabla 7.2: Nombres químicos de los surfactantes empleados

Surfactante	Nombre químico	Naturaleza	P.M. (g/mol)	CMC(mg/L)	HLB
TW80	Monoleato de sorbitan Poe=20	No ionico	1308*	65.4*	15*
Brij 35	Lauril eter Poe=23	No ionico	1206*	39.6**	16.7*
Ew 600	Nonil fenol Poe=6	No ionico	483*	45.06*	11*
Emulgin 1000	Nonil fenol Poe=10	No ionico	660	49.5**	13.5*
Texapon 40	Lauril eter sulfato de sodio	Aniónico	442*	1458*	4***
Maranil lab	Dodecil bencen sulfato de sodio	Aniónico	348*	1392*	11.7****
Surfacpol G	NR	Aniónico	NR	NR	NR
Polafix CAPB	Propil-cocamida betaína	Zwitterniónico	359	100400	NR
Surfacpol 203	Sulfosuccinato de dioctilo ysodio	Aniónico	362	NR	NR
TW60	Sorbitan monoestereato	No ionico	1310*	NR	14.9*
TW20	Sorbitan monolaurato	No ionico	1226*	60.74*	16.7*
SDS	Dodecil sulfato de sodio	Aniónico	288,4*	400*	40*

\* Torres et al, 2005

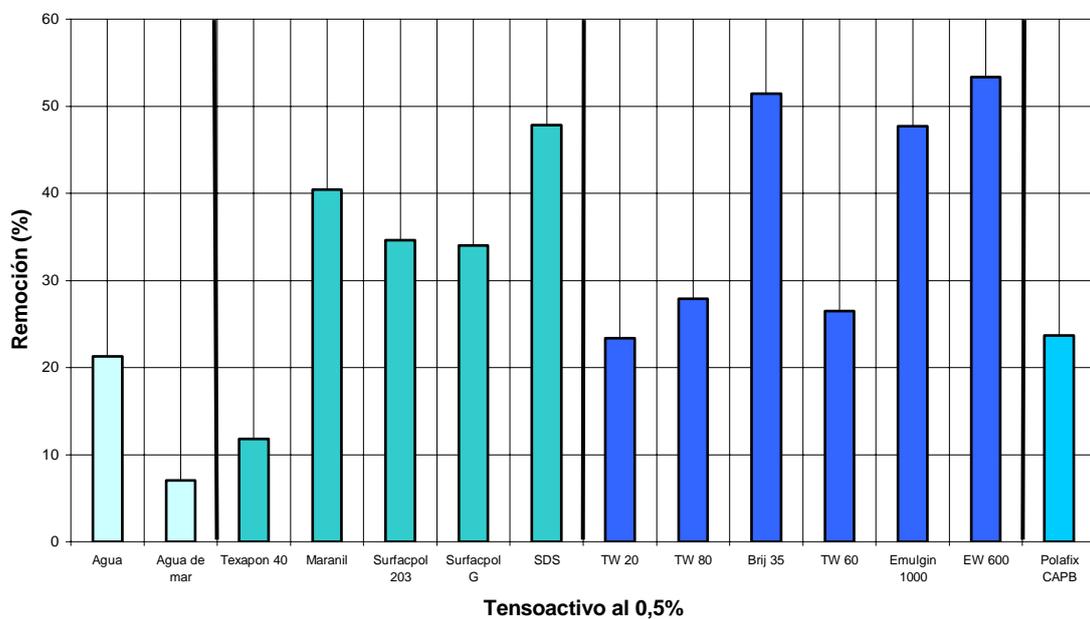
\*\* Milton, 1986

\*\*\* Klammt et al, 2005

\*\*\*\* [www.unitopchemicals.com](http://www.unitopchemicals.com)

Después del lavado se dejó secar el suelo durante una semana a fin de eliminar en lo posible la humedad. Posteriormente se determinó la cantidad de hidrocarburos totales (TPH) por el método de extracción por Soxhlet, haciendo la corrección a peso seco.

Conociendo la remoción asociada a cada surfactante se puede graficar la remoción obtenida con cada surfactante y de los blancos (Figura 7.2). Se recomienda que los surfactantes aparezcan graficados en orden según su comportamiento iónico.



*Fig 7.2: Remoción y concentración óptima*

Finalmente se hizo la corrección por peso seco para cada extracción. Para ello se determino la humedad del suelo cuando fue realizada la extracción. La determinación se llevo a cabo con un gramo de suelo de lavado, por medio de un desecador gravimétrico.

En el lavado se observó una alta hidrofobicidad del suelo y en los viales que solo contenían los blancos se veía una suspensión compacta sobre el agua. La hidrofobicidad

del suelo fue aminorada con los surfactantes pero de todos modos se veían grumos de suelo sin desaglomerarse. Cabe destacar que algunos surfactantes provocaron mucha mas espuma que otros y en general esto se observa en el caso de los aniónicos. Como se sabe, el hecho de que un surfactante cause espuma, se refleja en un mal lavado, lo que se puede corroborar al observar que el mejor lavado sucedió en el EW600 que se trata de un surfactante no iónico.

También se observó una diferencia en el tiempo de precipitación de cada muestra. Siendo la mas lenta la de los blancos en donde el suelo permanecía en la parte superior sobrenadando. Los tensoactivos no iónicos también tuvieron una precipitación lenta, con polvos de mediano tamaño suspendidos en la parte superior de la solución. Quizá es de notar este hecho, puesto que estos surfactantes son los que reportaron un mejor lavado. Al mantener el suelo en suspensión se puede comprobar como logran reducir su hidrofobicidad quizá ocasionada en parte por la contaminación oleosa, que ahora en su mayor parte, se encuentra formando solución con el agua a través de los tensoactivos. (Xing-Hui, 2000)

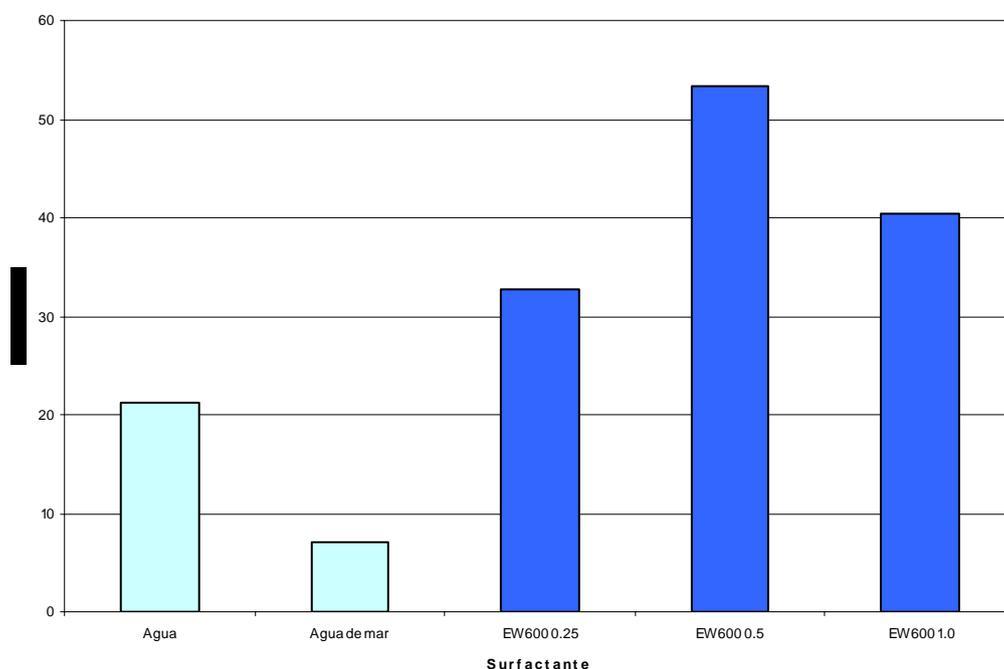
Observando los valores obtenidos en las pruebas de determinación de TPHs después del lavado, se tiene que los mejores productos son los no iónicos, por eso se observa que el agua de mar no es un buen agente de lavado. En general cualquier surfactante utilizado fue mejor que los blancos por lo que se concluye que el suelo no debe de ser tratado únicamente con agua. En particular el surfactante zwitteriónico (Polafix) no resulto ser un buen agente de lavado.

De los surfactantes no iónicos el que presentó mayor eficiencia de lavado fue el Emulgin 600. Por lo tanto se escogió este como el surfactante para llevar a cabo los

lavados. En adición a esto se puede recomendar el Brij 35 que se trata de un poliestearato de lauril éter, o en su defecto el Emulgin 1000, no iónicos ambos. Estos tres surfactantes poseen una estructura muy similar, y es de esperarse que presenten comportamientos similares con respecto a la remoción en el suelo. La ventaja de hacer una prueba de este tipo, radica en que más adelante, se puede escoger dentro de una gama de los mejores surfactantes en caso de que alguno de ellos sea muy costoso o simplemente no se tenga.

### 7.3 Concentración de surfactante en la solución de lavado

Posteriormente se determinó la concentración óptima de surfactante para el lavado. Se repitió la prueba de 23 horas ya descrita pero en esta ocasión con EW 600 al 0.25%, 0.5% y 1% w/v. (Figura 7.3) Para los valores de blancos se usaron los mismos de la primera prueba.



*Fig 7.3: Concentración óptima*

Como se puede observar en esta prueba el mejor lavado se dio al usar la solución al 0.5% de solución agua-surfactante y como en muchos casos reportados, la eficiencia de lavado aumenta con la cantidad de surfactante hasta llegar a un máximo donde la tendencia se invierte. En base a esta determinación se utilizó Emulgin 600 al 0.5% en todas las pruebas de lavado.

#### **7.4 Cinética de lavado**

Una vez conocida la concentración de surfactante óptima se debe determinar la duración de las pruebas de lavado. Algunos autores reportan que este tiempo puede escogerse arbitrariamente. Sin embargo se optó por utilizar la cinética de lavado como un criterio bueno de aproximación.

La prueba se hizo por un lapso de 4.5 horas, a 30% w/v de suelo en la solución, 0.5% w/v de solución agua – surfactante, a una velocidad de 1400 rpm y a una longitud de onda de lectura de 660 nm.

Las tendencias observadas para cada impulsor se muestran en la figura 7.4.

### Cinética de lavado

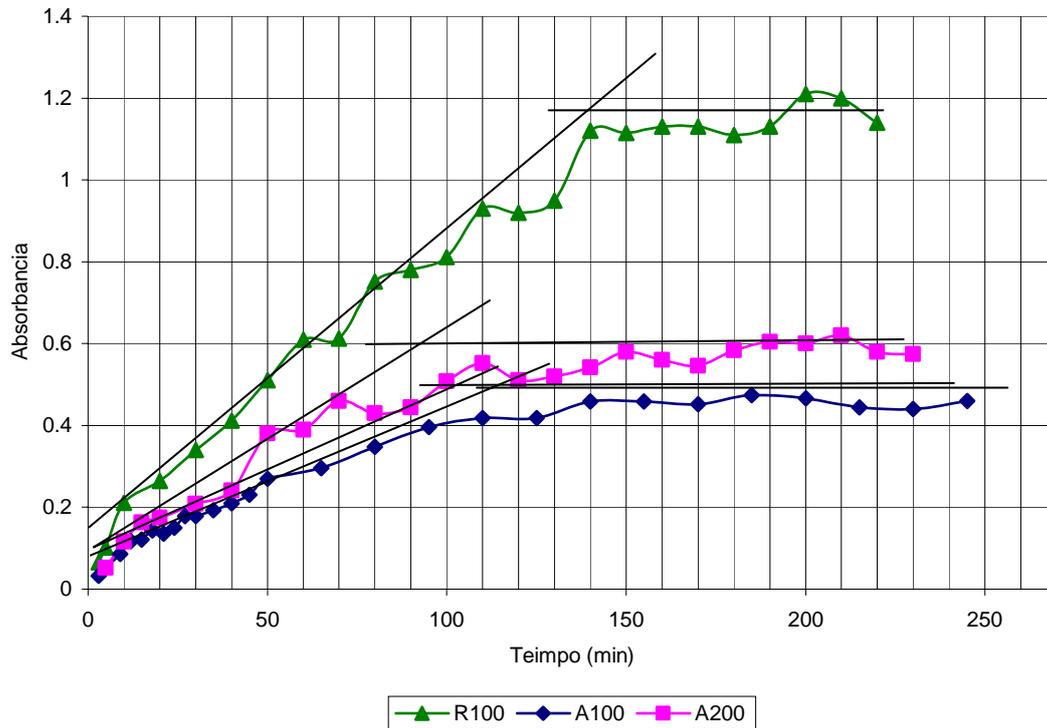


Fig 7.4: Cinética de lavado

Como se puede observar, la remoción de hidrocarburos en cada caso aumenta con respecto al tiempo. Sin embargo cada impulsor provoca una velocidad de desorción del contaminante, diferente. Como se observa en esta cinética de lavado, el impulsor que provoca una desorción más rápida es el R100, mientras que el de 3 paletas planas (A100) es el que muestra una velocidad menor de los tres impulsores. Este tendencia esta asociada a la geometría y número de paletas de cada impulsor. El R100 es el que tiene la mayor capacidad de corte, provocando un fuerte flujo en dirección radial y patrones secundarios de doble ocho muy fuertes, lo que favorece el lavado. Teniendo estas mismas características, el impulsor de 3 paletas planas, no es tan eficiente, pues al contar con la mitad de las paletas no genera la misma energía de corte y los patrones son más débiles. Por su parte el impulsor de 4 paletas inclinadas a  $45^\circ$  (A200) tiene mucha más capacidad de bombeo que los anteriores, pero menor capacidad de corte. Sin

embargo por esta capacidad de bombeo es un impulsor que logra un lavado medio entre los anteriores pues logra dispersar muy bien los sólidos y también genera corrientes secundarias en forma de ocho.

En general para los tres impulsores se observa que existe una remoción que va en aumento al principio, pero hay un momento donde dicha remoción no puede seguir aumentando y tiende a ser constante. Este es el punto de máximo lavado bajo estas condiciones y se dice que se ha llegado a un equilibrio de máxima deserción del contaminante.

Dada la tendencia observada para los tres impulsores se puede decir que el equilibrio y máxima remoción se obtiene a los 150 min aproximadamente, y se escoge 180 min de duración, misma que se mantiene fija para cada experiencia de lavado, asegurando un óptimo de remoción. Esto se ilustra trazando dos rectas a cada una de las partes en consideración dentro de la curva de cada impulsor. La primera parte es un ascenso en la remoción con el tiempo, aproximado a una recta. La segunda parte es la remoción de equilibrio representado con una recta de pendiente 0. Como se puede observar, a los 180 minutos el proceso ya es totalmente constante y no hay un incremento en la remoción con el tiempo.

Dada la clara diferencia entre las remociones de cada impulsor, en especial R100 que presenta mucha mejor remoción pues registra mayores valores de absorbancia, se espera que los mejores lavados los presente el impulsor R100 aunque se observa mayor inestabilidad del sistema con este impulsor y un mayor consumo de potencia.

## 7.5 Pruebas de lavado a velocidad constante

Una vez definido el tiempo de lavado se hicieron las pruebas de variación en la concentración del suelo. En estas pruebas de lavado se mantienen fijas las relaciones del tanque, la concentración de la solución agua-surfactante y la velocidad de agitación, variando únicamente el tipo de impulsor y la cantidad de suelo; de esta forma se obtiene la potencia gastada en cada proceso a lo largo del tiempo.

Las pruebas se realizaron de acuerdo a la tabla 7.3:

*Tabla 7.3: Pruebas de lavado a velocidad constante*

Prueba	Velocidad (RPM)	Impulsor	Concentración de suelo (%)
1	1400	R100	10
2	1400	R100	20
3	1400	R100	30
4	1400	R100	40
5	1400	A100	10
6	1400	A100	20
7	1400	A100	30
8	1400	A100	40
9	1400	A200	10
10	1400	A200	20
11	1400	A200	30
12	1400	A200	40

### 7.5.1 Impulsor Rushton (R100)

Siguiendo la metodología de prueba de lavado se determinó la potencia y el torque empleados en el lavado durante 180 minutos por lapsos de 10 minutos. Se midieron y graficaron (Figura 7.5) los puntos correspondientes a las pruebas 1-4. Cabe destacar que la prueba 4 se hizo por triplicado y se grafica su media aritmética.

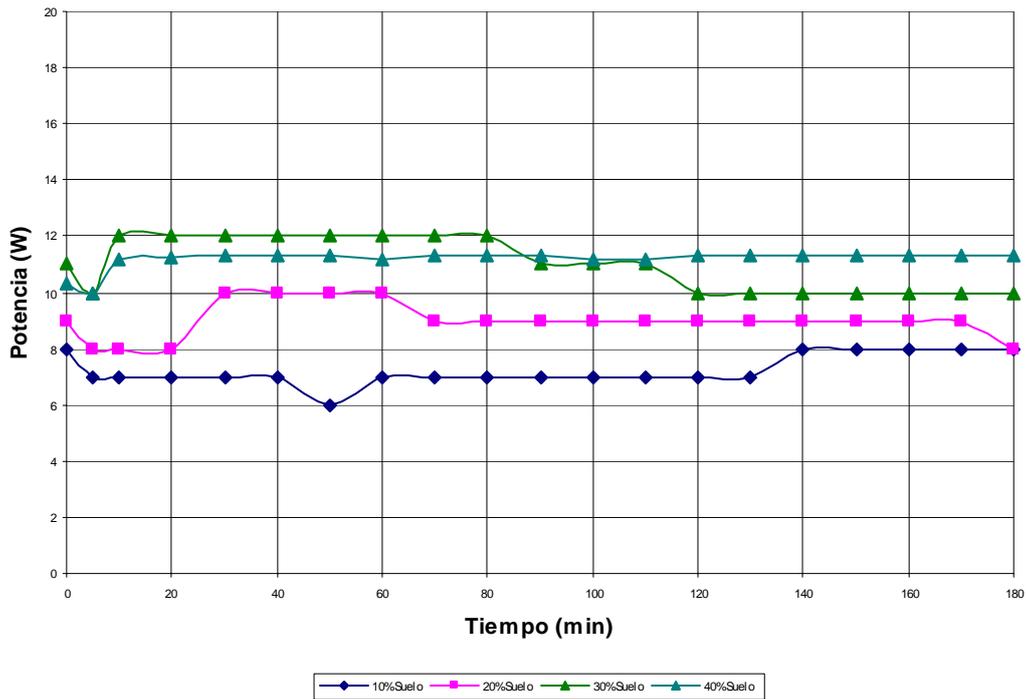


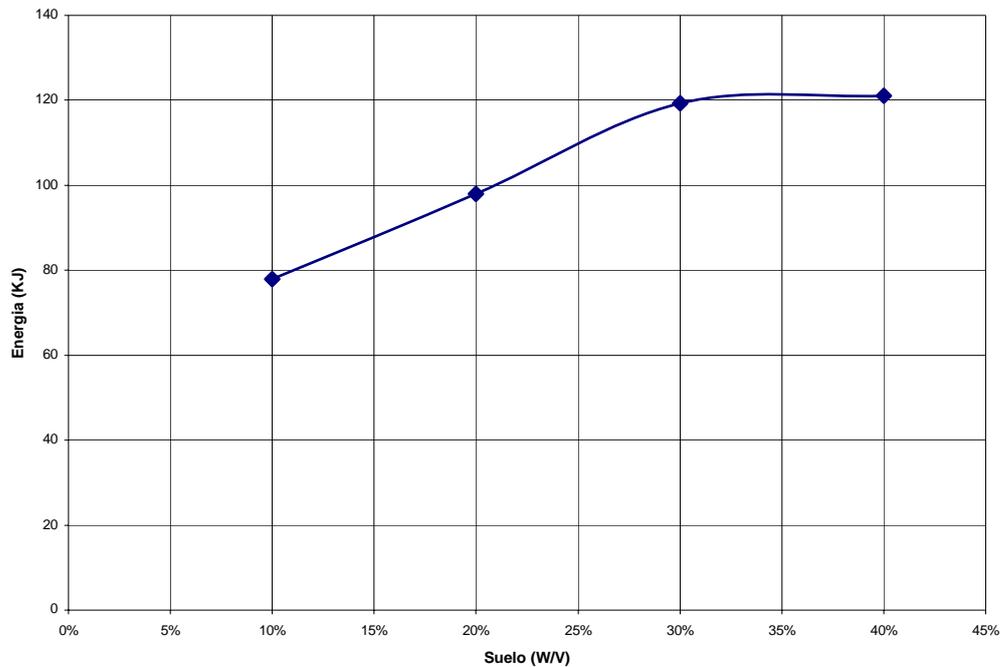
Fig 19: R100 Potencia de lavado

Como se puede observar en esta primera prueba de lavado, a medida que aumenta la concentración de suelo, se necesita mayor potencia para realizar el lavado. Sin embargo la tendencia se rompe al llegar a 40% de suelo. Al observar esto se decidió realizar esta prueba por triplicado, sin embargo no se obtuvo ningún valor por encima de las potencias a 30% de suelo. Esto se puede interpretar como que la potencia del sistema no es muy dependiente de la concentración del suelo cuando se trata de altas concentraciones.

También se observa un comportamiento un tanto irregular de la potencia a lo largo del tiempo. Siendo que lo esperado es que la potencia disminuya con el tiempo, hubo un caso, a 10% de suelo, que sucedió lo contrario.

Con el fin de lograr una mejor interpretación de los resultados obtenidos a partir de las graficas de potencia vs tiempo, se encuentra la energía asociada, haciendo la integral bajo la curva. Esto se realizó para cada proceso llevado a cabo. (Figura 7.6)

Así se obtiene la energía asociada en KJ para el impulsor para cada proporción en peso de suelo/volumen de solución. El último punto presenta la media aritmética del triplicado realizado.



*Fig 7.6: R100 Energía de lavado*

Como se puede observar en esta grafica, la energía asociada a la remoción con el impulsor R100 aumenta con la concentración del suelo hasta permanecer practicante constante. Por lo tanto la energía consumida se hace independiente de la cantidad de suelo cuando las concentraciones de este son elevadas (arriba del 30%).

Con el fin de determinar la repetibilidad de las experiencias de lavado y comprobar los puntos obtenidos se determino por triplicado la prueba a 40% de suelo. Como es posible observar en la grafica (Figura 7.7) no hay una gran variación entre las potencias medidas en cada uno de los diferentes experimentos.

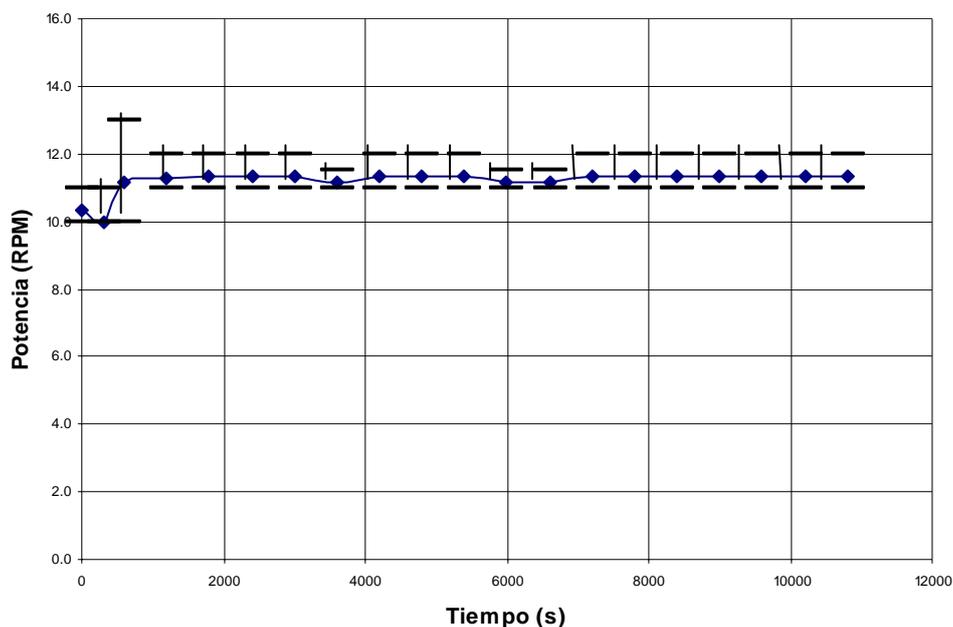
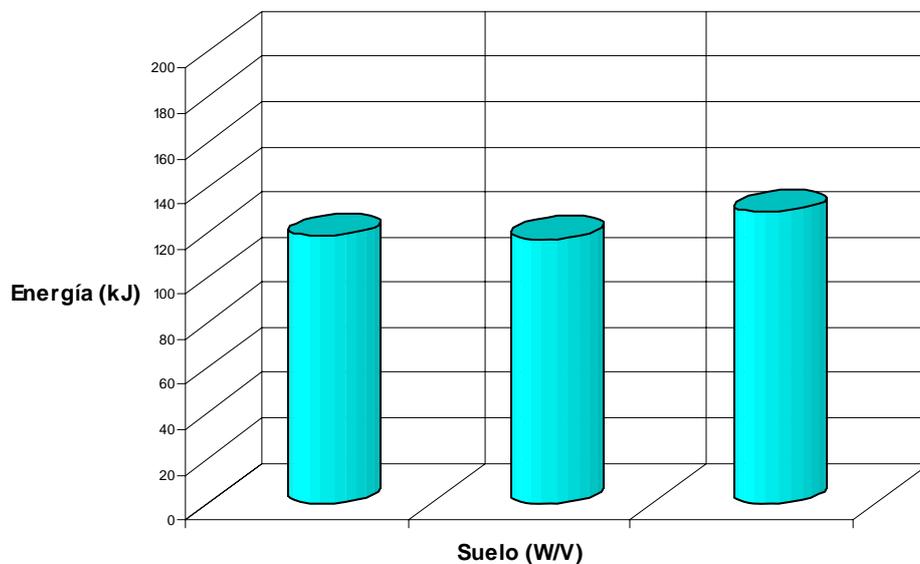


Fig 7.7: Error impulsor Rushton 40% de suelo.

Graficando el promedio con sus mínimos y máximos observamos que la variación es pequeña, pues en general los puntos están muy cercanos entre si. De estos puntos se obtiene un promedio y una varianza de 4.46%, lo que es muy aceptable y se puede decir que las pruebas si son repetibles y los puntos obtenidos, confiables.

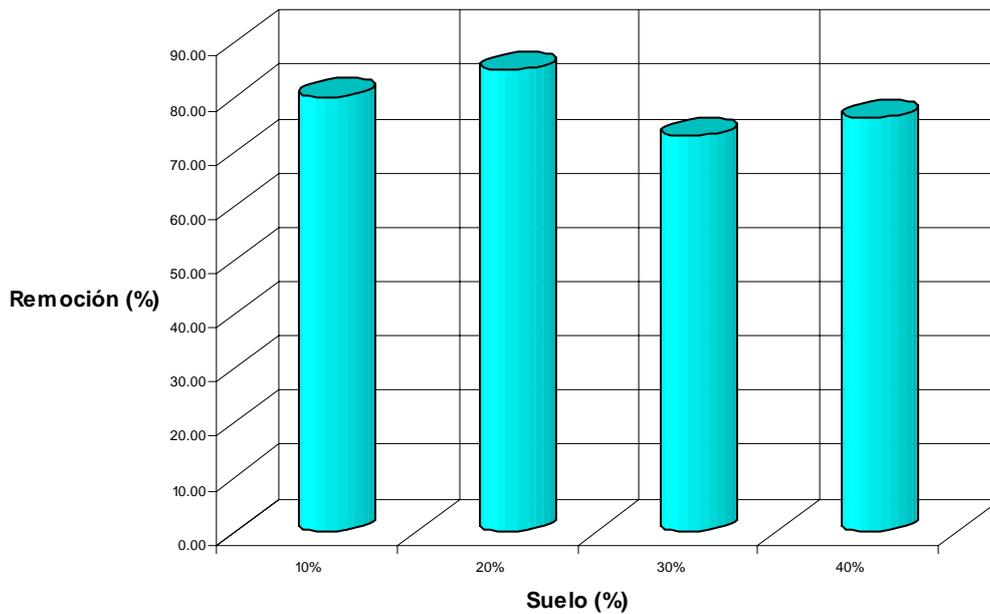
También se muestra el triplicado pero en la determinación de energía consumida (Figura 7.8).



*Fig 7.8: Variaciones en las determinaciones de hidrocarburos para R100*

En el caso de la remoción se observa muy claramente la poca variación entre cada determinación, con una varianza estandar en este caso de 4.12 %.

Una vez asegurada la veracidad de las experiencias de lavado se determinó la eficiencia de lavado. Para ello se midió el contenido de TPHs en cada uno de los suelos lavados y se calculó la remoción en peso seco correspondiente. (Figura 7.9) La determinación se llevo a cabo con el método de extracción en soxhlet con hexano.



*Fig 7.9: R100 Remoción de contaminante*

Como se observa las remociones de este impulsor fueron muy altas, llegando hasta el 84% para una concentración de 20% de suelo. En general se observa una mejor remoción a concentraciones bajas de suelo, aun que la remoción es practicamente independiente de la concentración del suelo. Este impulsor ha sido reportado como uno de los mas eficientes pues genera un gran esfuerzo cortante. Además se observó durante la experimentacion que no genera espuma persistente. Al inicio se presenta espuma sobre la mezcla, sin embargo alrededor de los 80 minutos desaparece totalmente y se genera una mezcla homogenea (mientras esta la agitación). Esto se acompaña de un molido en las particulas del suelo que se observa como unas lineas oscuras al principio de la agitación. Una vez que se ha molido el material se genera una mezcla mucho mas homogenea y de un color mas claro. El volumen total del sistema también aumenta y esto sucede junto con una variación en la potencia medida, que en le mayoría de los

casos aumenta. Este comportamiento se observará en todas las demas determinaciones pero en menor grado que en el impulsor R100.

### 7.5.2 Impulsor de tres paletas planas (A100)

Como en el caso anterior, se hicieron los lavados correspondientes a las pruebas 5-8.

Para las determinaciones de potencia contra tiempo se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 7.10).

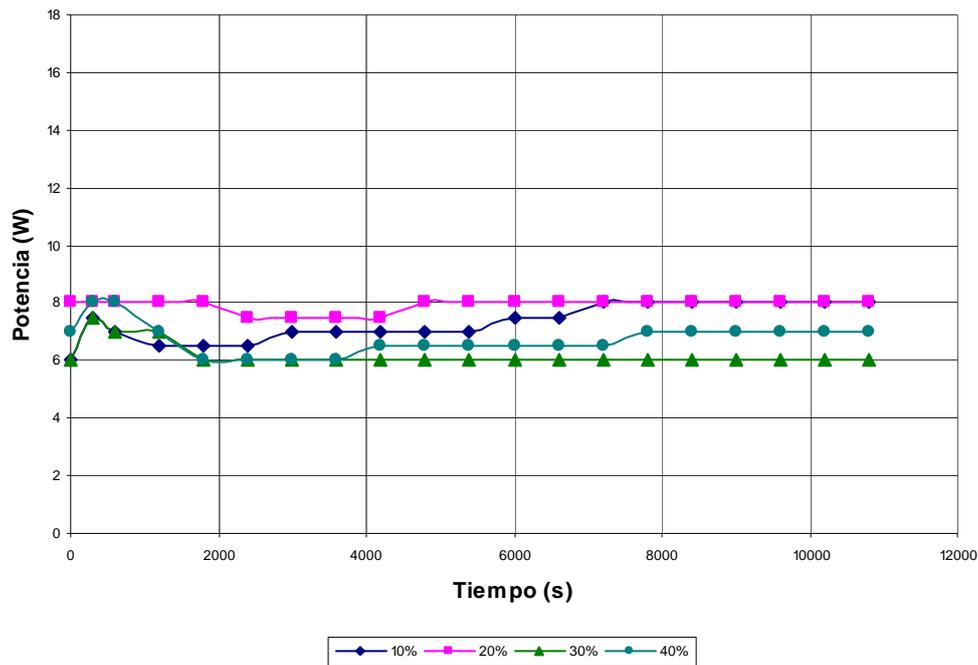
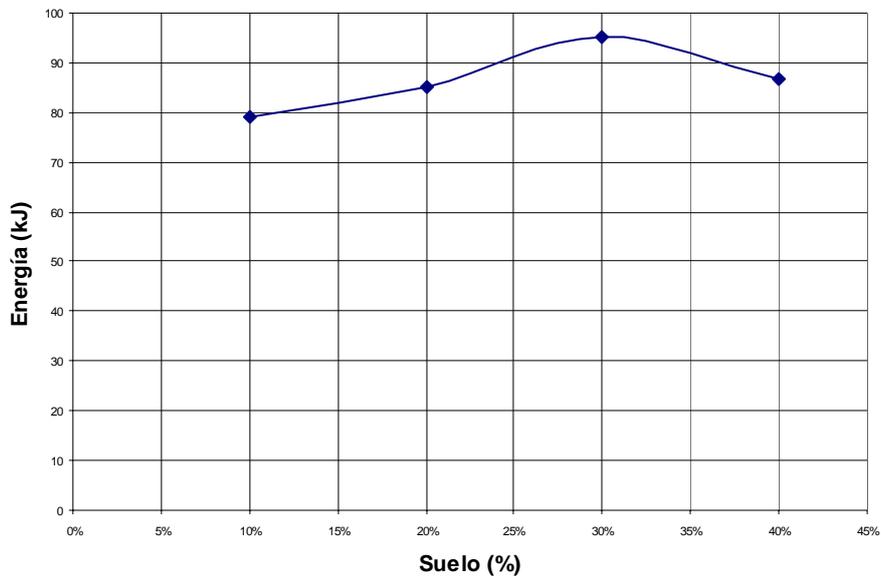


Fig 7.10: A100 Potencia de lavado

En este caso no es tan notoria la tendencia de aumento de potencia con la concentración del suelo como en el impulsor anterior. A pesar de que se trata del mismo tipo de impulsor, la diferencia entre el A100 con el R100 queda de manifiesto en esta prueba,

donde al llegar a cierta concentración de sólidos hay una caída en la potencia necesaria para el lavado, es decir, al tener una concentración de 40% de sólidos es necesario menor potencia para el lavado. Esto quizá por que no se logra una dispersión tan eficiente y la geometría del impulsor no favorece tanto el corte de partículas.

Cabe destacar que al final de todas las experiencias se llega a prácticamente la misma potencia de mezclado, pareciendo finalmente ser independiente la cantidad de suelo de la concentración de suelo. Nuevamente se calculó la energía asociada a cada uno de los procesos de lavado y se graficó. (Figura 7.11)

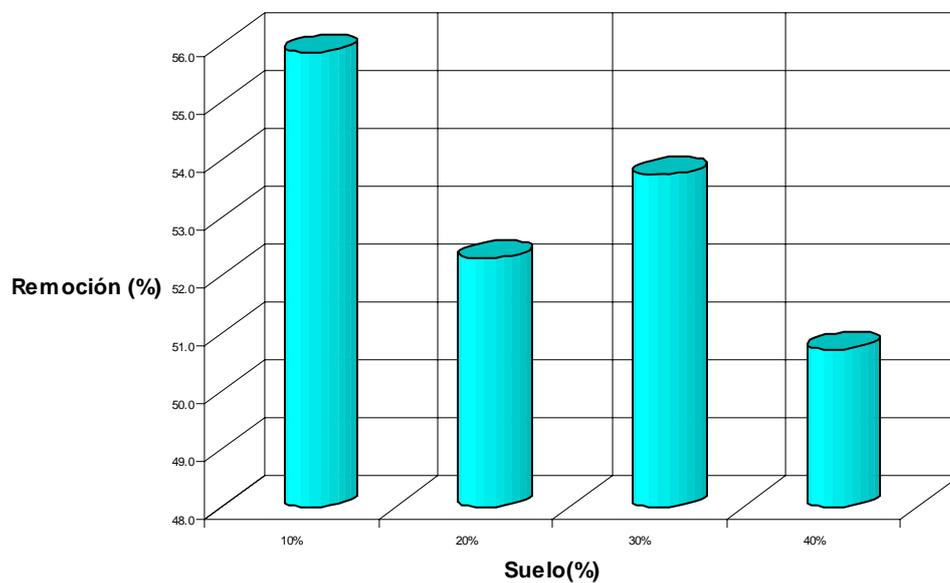


*Fig 7.11: A100 Energía de lavado*

En esta gráfica se puede observar un cambio ligeramente en escalón y mucha menor dependencia de la energía con la concentración de suelo que con el impulsor R100. Por tanto este impulsor resulta ser conveniente para lavar altas cantidades de hidrocarburo pues la energía consumida no es mucho mayor.

En este caso el molido de partículas se observó durante mayor tiempo así como la espuma, que duró mucho más tiempo hasta prácticamente los 120 minutos, cuando ya se observó una mezcla mucho más uniforme.

Posteriormente se determinó la eficiencia de lavado midiendo la remoción en peso seco del suelo lavado. (Figura 7.12).



*Fig 7.12: A100 Remoción de contaminante*

Como se puede observar la remoción de hidrocarburos, en este impulsor, no es tan eficiente como en el impulsor Rushton, aun que se trate se impulsores radiales ambos. Sin embargo el consumo de potencia si es mucho menor. La máxima remoción observada en este impulsor fue de 56% en la concentración mínima de 10% de suelo. En términos generales se puede decir que la eficiencia de lavado disminuye conforme aumenta la cantidad de suelo a lavar. Esto lo hace mucho menos eficiente que el R100

que muestra mucha mayor independencia aunque, como ya se vio, el A100 es más independiente en energía consumida.

### 7.5.3 Cuatro paletas inclinadas a 45° (A200)

Trabajando de forma análoga a las experiencias pasadas, se realizó el lavado para las pruebas 9-12. Con las experiencias de lavado se obtiene la gráfica de potencia en función del tiempo de lavado, como se puede observar en la figura 7.13.

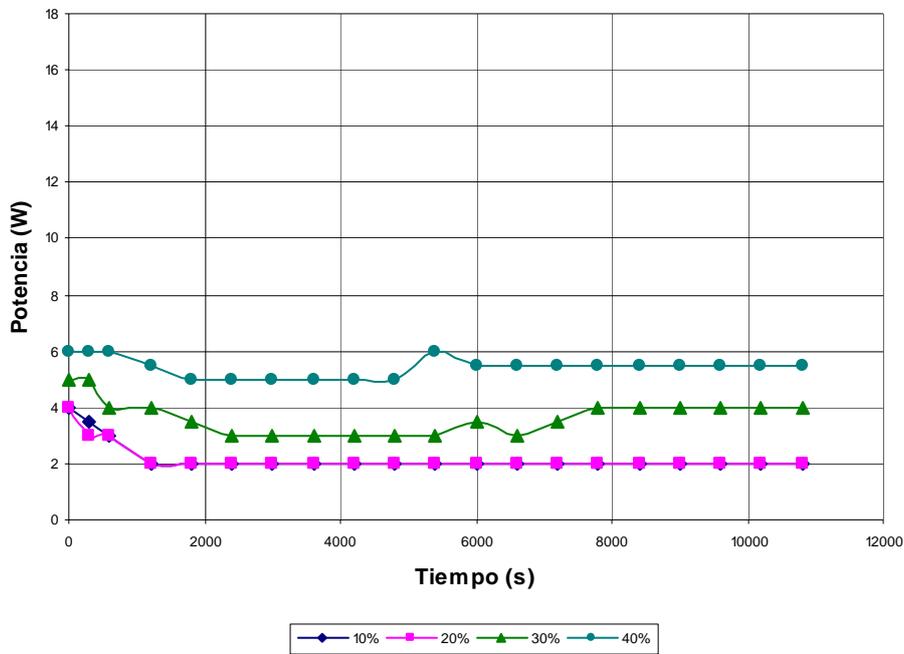


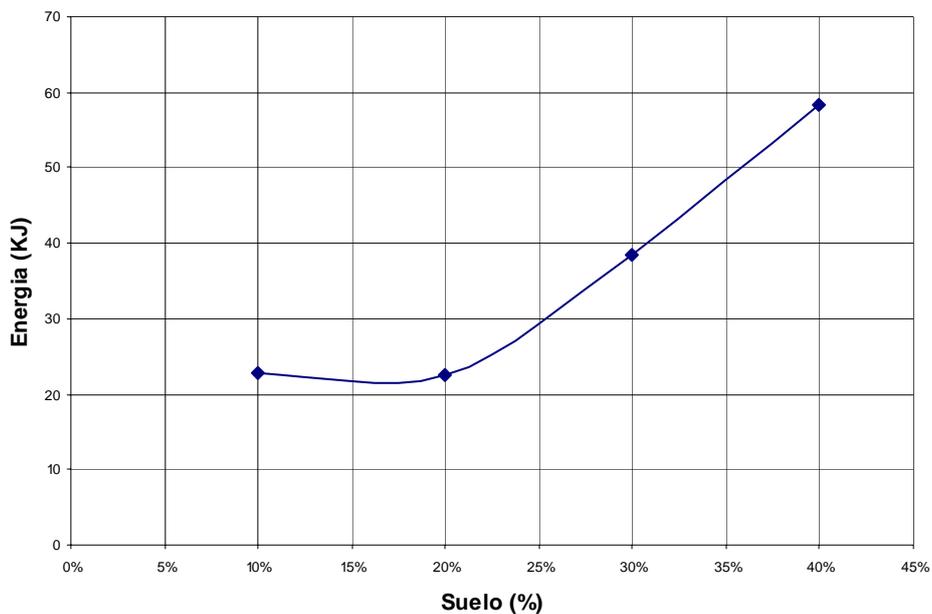
Fig 7.13: A200 Potencia de lavado

Como se observa, es muy evidente la dependencia de la potencia con respecto a la cantidad de suelo de lavado. Para los casos de concentraciones bajas el comportamiento es prácticamente independiente, no así para concentraciones más elevadas. Este impulsor difiere mucho en su comportamiento a los anteriores por tener una geometría que favorece mucho más el bombeo que el esfuerzo de corte, y es por estas

características que tiene mucha mayor dependencia de la concentración de suelo. Sin embargo la potencia es notablemente menor que en los casos anteriores y el comportamiento más uniforme a lo largo del proceso de lavado.

La espuma no fue muy persistente y el tiempo en que se homogenizó la mezcla es comparable al que presenta el impulsor A100, donde se puede observar un salto en la potencia del lavado. La homogenización completa se llevo al cabo de los 100 minutos, lo cual corresponde con el incremento en la potencia.

Como en los casos anteriores se obtuvo la energía asociada a cada experiencia de lavado y se muestra en la grafica 7.14.

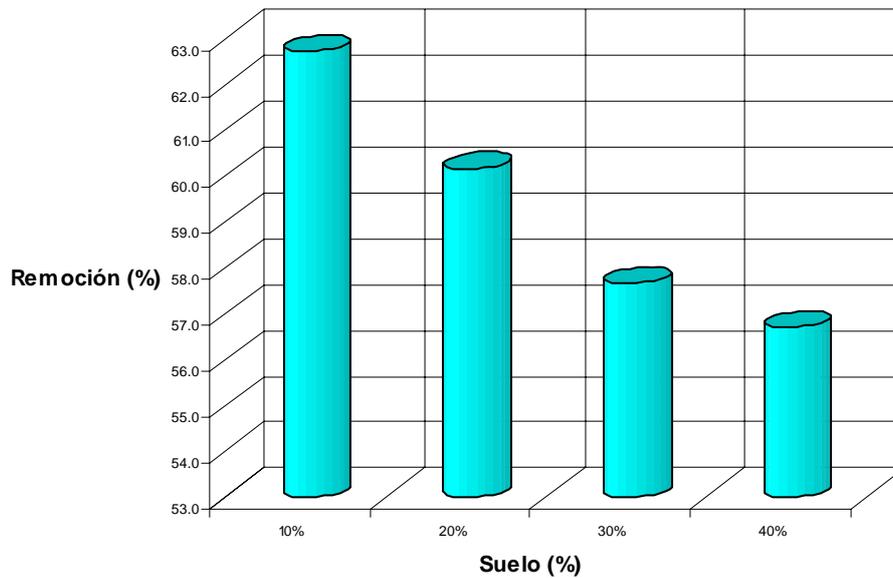


*Fig 7.14: A200 Energía de lavado*

Como se puede notar, hay una gran dependencia de la energía con la cantidad de suelo a lavar, y se observa una tendencia contraria a la del impulsor R100, pues en este caso, a concentraciones bajas, no es tan sensible el efecto como a concentraciones altas. Se puede esperar que a concentraciones aun mayores, el trabajo que requiera el equipo

para la agitación sea aun mayor. Por tanto, este impulsor no es muy recomendable para concentraciones altas de suelo en solución.

Para la evaluación de la eficiencia de lavado se determinaron los TPHs por el método de extracción en soxhlet con hexano. (Figura 7.15)



*Fig 7.15: A200 Remoción de contaminante*

Como se puede observar, también la eficiencia de lavado es muy sensible a la cantidad de suelo. Nuevamente, para este impulsor, las mejores condiciones son a bajas concentraciones de suelo, pues con gran cantidad de suelo de lavado el consumo energético es alto y la remoción de hidrocarburos, mucho menor. La tendencia observado es aun más marcada que en el impulsor A100 y las diferencia entre la remoción de cada caso, es aun mayor.

Haciendo un resumen de la energía requerida en de los tres procesos, se puede comparar la magnitud de la energía gastada en cada caso. Esto se muestra en la figura 7.16.

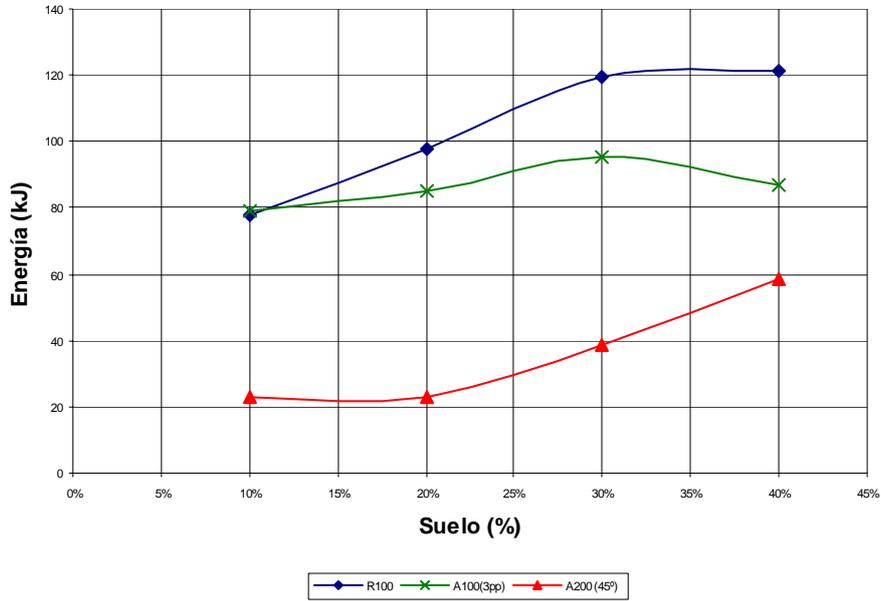
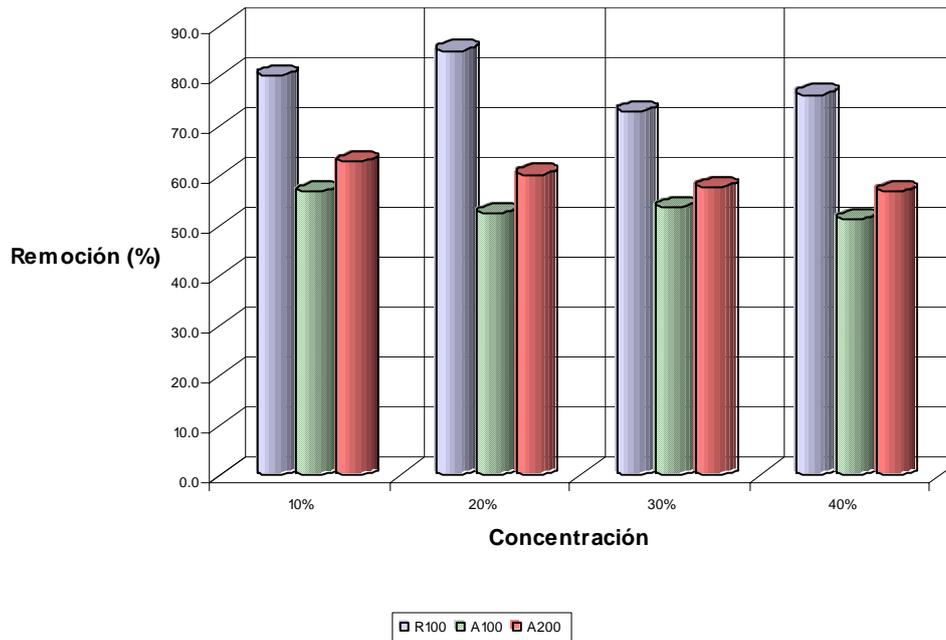


Fig 7.16: Energía de los procesos a velocidad constante.

Los impulsores con mayor gasto energético fueron los radiales R100 y A100, observando comportamientos parecidos en cuando a la independencia de la cantidad de suelo en el gasto energético a altas concentraciones. Como ya se dijo, el impulsor más dependiente de la concentración del suelo es el A200, sin embargo es también el que menor energía consume para el proceso. El consumo máximo de energía para el impulsor A200 es de 60000 Joules mientras que el mínimo para R100 y A100 fue de 98000 Joules. Lo que quiere decir que no obstante la dependencia de la energía con la concentración para el A200, es sin embargo mucho más eficiente energéticamente hablando. Comparando el gasto energético del A200 con el R100, hay prácticamente todo el tiempo una diferencia de 60 kJ a lo largo del proceso. La diferencia no es tan grande comparando el A100 con el A200 sin embargo en su punto más próximo la

diferencia es de 20 kJ, que si es considerable cuando se piensa en un proceso a mayor escala.

Es ahora necesario comparar las eficiencias de lavado de cada uno de los procesos. El resumen para los tres impulsores se muestra en la figura 7.17.



*Fig 7.17: Remoción de los procesos a velocidad constante.*

En esta grafica se pueden apreciar las diferencias en remoción con los diferentes impulsores. Como se ha observado, la mayor eficiencia la presenta el impulsor R100 con remociones por arriba del 80% que representa una concentración de hidrocarburos de 4821 ppm que ya se encuentra por debajo de la norma con respecto a hidrocarburos pesado. Con esto podemos notar que es el único impulsor que con un solo lavado es capaz de remover el contaminantes hasta niveles permisibles, sin embargo hay que recordar que esto es posible solo para estas condiciones de lavado, concentración de suelo y contaminante.

El impulsor que le sigue en eficiencia es el A200 llegando a remociones por encima del 60%, lo que es decir, quedando 11939 mg/kg de TPHs después del lavado. Aquí es

importante destacar que este impulsor es el primero en eficiencia energética y el segundo en eficiencia de remoción. Consume la mitad de la energía con respecto al R100 y tiene una eficiencia de lavado un 40% por debajo, por lo que se puede considerar como una geometría muy adecuada para el lavado de suelo, pues se puede acoplar a un proceso en etapas para lograr mayor remoción o a un proceso con otro impulsor.

Hasta ahora se puede considerar al impulsor A100 como el menor adecuado para estas condiciones, pues su gasto energético fue intermedio y la remoción fue la menor con tan solo un valor 56%, no mejor que ninguno obtenido por los otros impulsores.

## **7.6 Pruebas de lavado a concentración constante**

Estas experiencias consisten en probar la eficiencia del lavado, manteniendo la concentración de suelo constante y variando las velocidades de lavado. Por la variación que presentó en las experiencias anteriores se seleccionó como concentración de la solución suelo- surfactante la de 30% y como velocidades 1200 rpm, 1400 rpm, 1550 rpm y 1700 rpm, por ser superiores al  $N_{js}$  mínimo observado y estar por encima y por debajo de la velocidad ya probada.

Las demás condiciones de lavado como concentración de la solución de lavado, surfactante y relaciones del tanque de lavados se conservan igual.

*Tabla 7.4: Pruebas de lavado a concentración constante*

Prueba	Velocidad (RPM)	Impulsor	Concentración de suelo (%)
13	1200	R100	30
14	1400	R100	30
15	1550	R100	30
16	1700	R100	30
17	1200	A100	30
18	1400	A100	30
19	1550	A100	30
20	1700	A100	30
21	1200	A200	30
22	1400	A200	30
23	1550	A200	30
24	1700	A200	30

#### 7.6.1 Impulsor Rushton R100

Como en las pruebas pasadas, se midió la potencia empleada en el lavado en intervalos de 10 minutos.

Para el impulsor R100 se realizaron las pruebas 13-16 observando la siguiente tendencia:

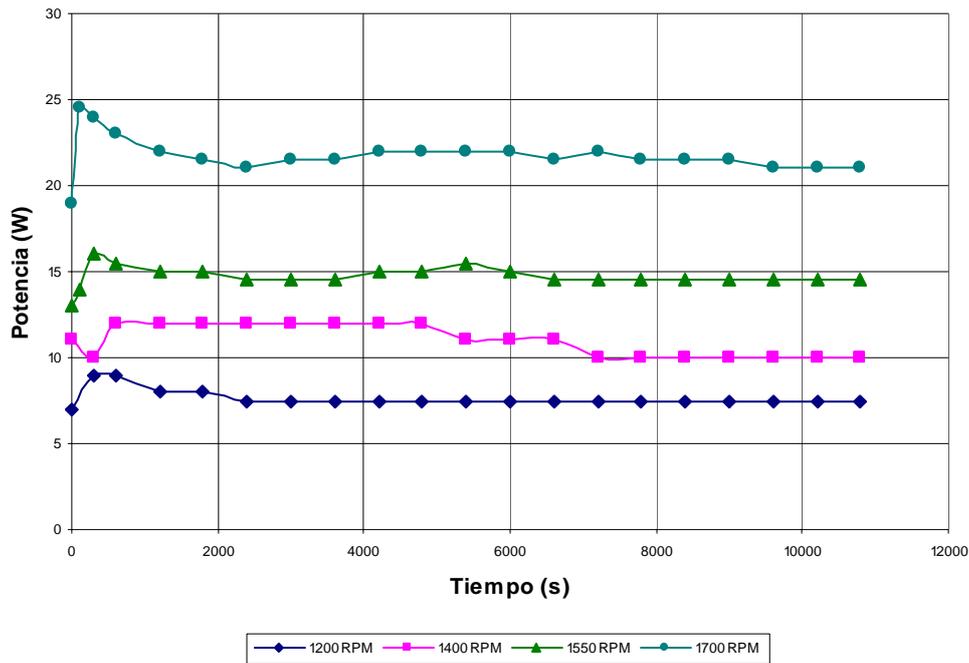
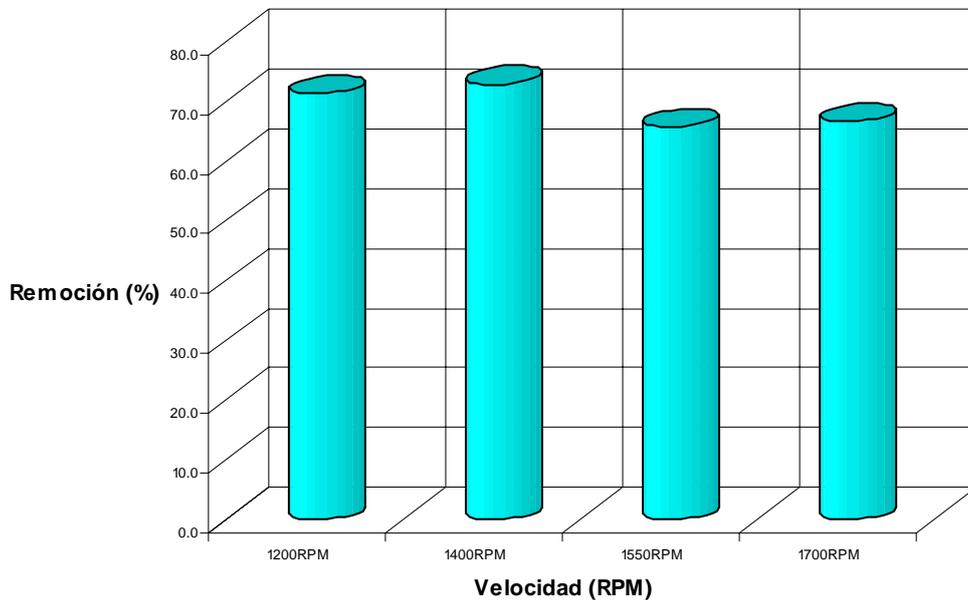


Fig 7.18: R100 Potencia de lavado

Como se puede apreciar, hay una marcada relación entre el consumo de potencia con la velocidad, esto corresponde con lo esperado, pues se ha reportado que existe un aumento de potencia y consumo energético si se aumenta la velocidad de agitación. (Sánchez *et al*, 1992)

El comportamiento observado en la potencia registrada nos hace notar que el sistema es más inestable conforme aumenta la velocidad. Esto concuerda con lo observado, pues este impulsor provoca una gran vibración e inestabilidad en el agitado. Así mismo se observó que el molido y la homogenización de la mezcla suceden en un tiempo directamente proporcional a la velocidad empleada. La espuma es mucho menos persistente a mayor velocidad y las variaciones en la potencia registrada no presentan escalones como en las experiencias anteriores.

Como el fin es evaluar la eficiencia del lavado, se determino como en los otros casos la remoción por medio de la extracción por hexano del suelo lavado.



*Fig 7.19: R100 Remoción de lavado*

Aquí podemos observar que para este impulsor la remoción no es muy dependiente de la velocidad e incluso llega a ser un poco menor a concentraciones altas.

Por lo tanto no es muy recomendable el uso de este impulsor a velocidades muy altas, pues el consumo energético es muy grande y no así la remoción de contaminante, que por lo contrario es un poco menor.

La ventaja de este impulsor esta en que teniendo ya un equipo que opere a una determinada velocidad, la remoción no se va a ver muy afectada sin embargo si se notará en el consumo de energía que es muy dependiente de la velocidad. Este será analizado más adelante en comparación con los consumos energéticos de los otros impulsores.

### 7.6.2 Impulsor de tres paletas planas (A100)

Siguiendo el procedimiento anterior, se hicieron las pruebas 17-20 de lavado con el impulsor A100, midiendo en consumo de potencia en intervalos de 10 minutos. La grafica 7.20 ilustra el comportamiento de las cuatro diferentes experiencias.

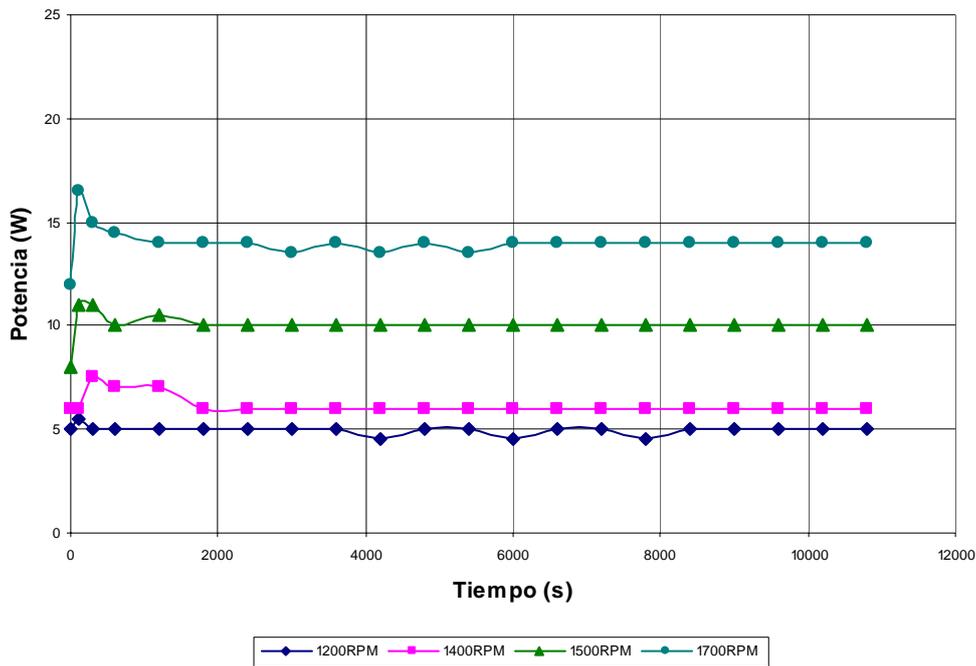


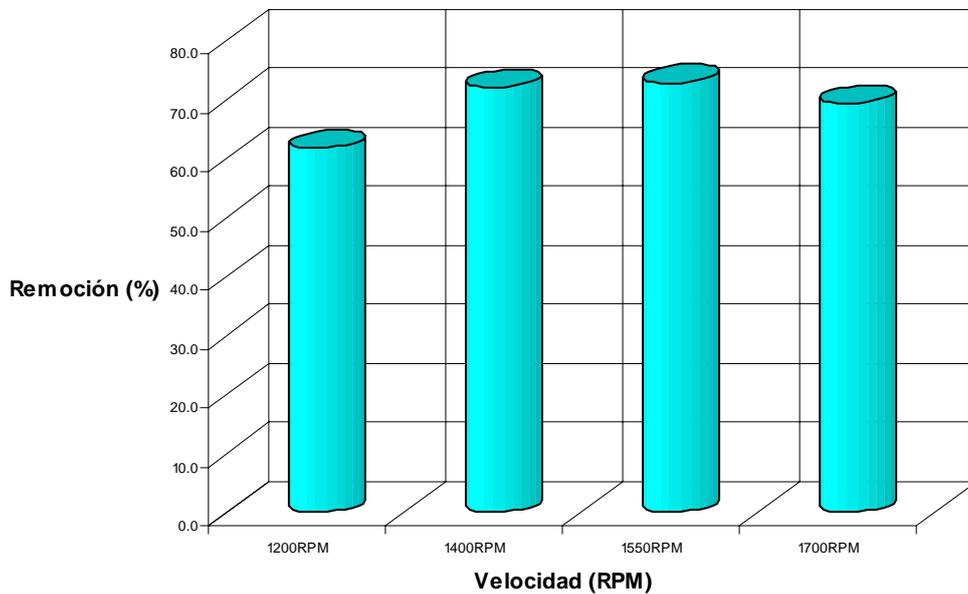
Fig 7.20: A100 Potencia de lavado

En estas pruebas podemos apreciar que también hay una relación directa entre la velocidad de agitación y la potencia consumida. Sin embargo en este caso, la potencia es más sensible a la aumento de velocidad a velocidades mayores. No se espera un comportamiento tan lineal pues el incremento en potencia aumenta muy rápidamente con el aumento en velocidad.

En este caso, las medidas de potencia son más estables que con el impulsor R100, aunque al igual que este, es más inestable a altas velocidades. Al igual que en el caso

anterior, el tiempo de molido de las partículas y el tiempo en llegar la mezcla a ser homogénea, es menor conforme se aumenta la velocidad, pero de nuevo no es tan rápido como con el impulsor R100.

Se realizó la extracción en hexano de los contaminantes remanentes en el suelo lavado para conocer su eficiencia. (Figura 7.21)



*Fig 7.21: A100 Remoción de lavado*

Como se aprecia la remoción de hidrocarburos empleando el impulsor A100 es más dependiente de la velocidad de agitación que el R100. Según la tendencia hay un máximo de remoción a las velocidades intermedias, es decir, que este impulsor tiene un rango de velocidades donde es eficiente pues a una velocidad baja su remoción no fue tan buena como tampoco a la máxima velocidad.

Los impulsores radiales como el R100 y A100, generan una gran turbulencia, y ambos observan este comportamiento, donde la remoción no es la óptima a la máxima

velocidad. Por tanto se puede decir que estos impulsores tienen un efecto negativo en la remoción cuando ésta se lleva a cabo a velocidades elevadas. Además teniendo en cuenta el considerable aumento en el consumo de potencia, resulta no ser recomendable ninguno de estos impulsores para altas velocidades.

### 7.6.3 Cuatro paletas a 45° (A200)

Finalmente se llevó a cabo las pruebas de lavado 20-24 con el impulsor A200. El comportamiento de las medidas de potencia se ilustra en la gráfica 7.22:

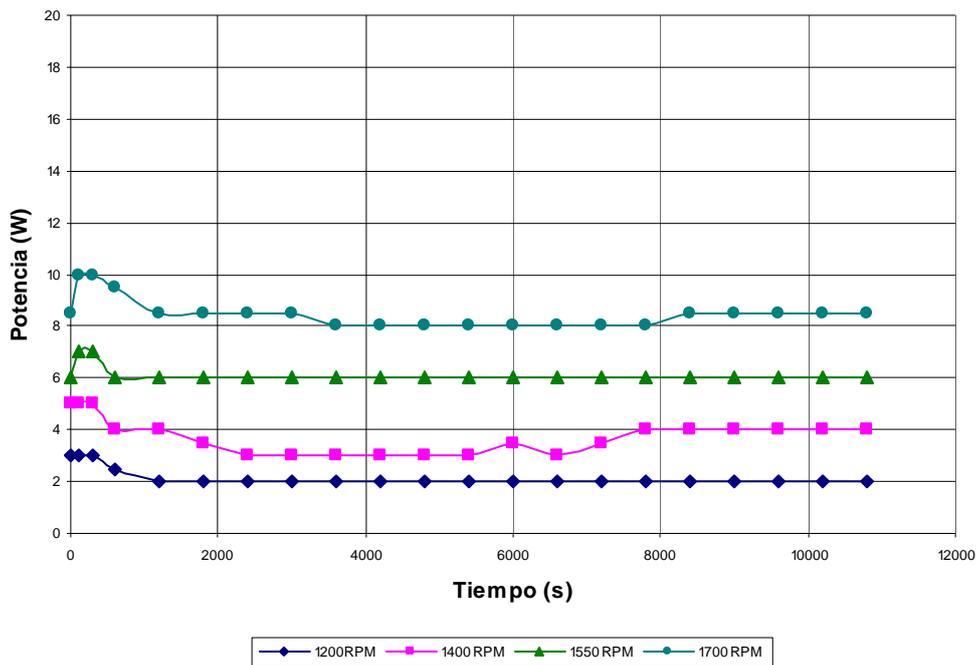


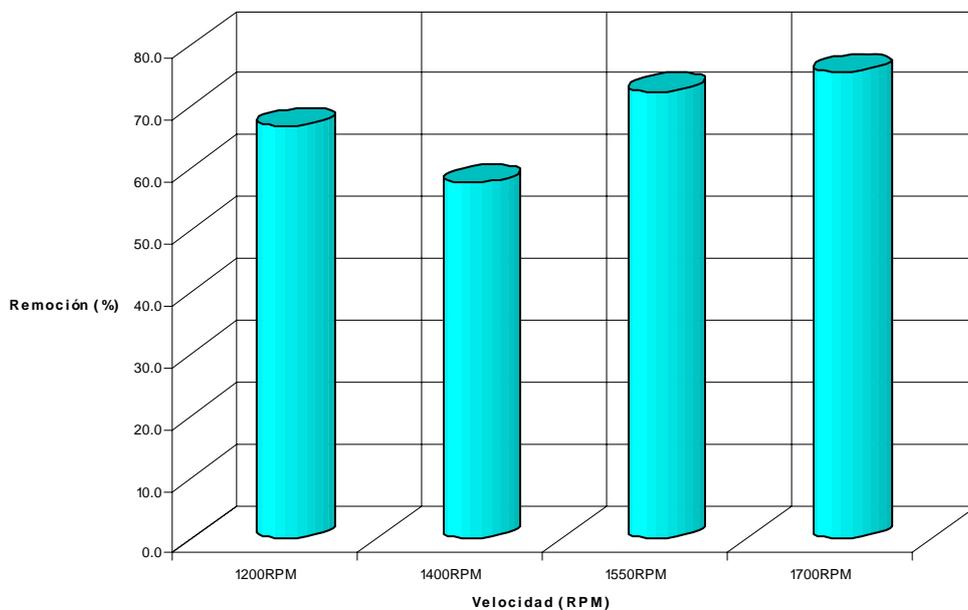
Fig 7.22: A200 Potencia de lavado.

Para este impulsor podemos observar que también hay una proporcionalidad directa de la potencia con la velocidad de mezclado, en este caso de una forma más lineal que para el impulsor A100. Concordando con las experiencias anteriores, el consumo de potencia para este impulsor es el menor de los tres impulsores y las medidas de potencia a altas

velocidades son más inestables. En este caso, el efecto de la inestabilidad por la velocidad se observa hasta la última velocidad, diferente a los casos anteriores donde dicho efecto se hacía notar aun a la velocidad de 1550 rpm.

Este impulsor es en el que se presenta más espuma y por más tiempo, pero como lo observado anteriormente, la presencia de espuma se reduce a velocidades mayores. Este impulsor es el más estable a altas velocidades pues no provoca tantas vibraciones en la agitación pero mantiene más tiempo la espuma y tarda más en crear una mezcla homogénea.

Con el fin de evaluar su eficiencia de lavado, se hizo la extracción en hexano del hidrocarburo presente en el suelo lavado. Los resultados de la eficiencia de lavado se presentan en la figura 7.23.



*Fig 7.23: A200 Remoción de lavado.*

Contrario a lo observado con los otros impulsores la remoción se vio afectada positivamente con el aumento de velocidad. La baja capacidad de corte de este impulsor y su capacidad de bombeo, hacen que, al aumentar la velocidad se incremente la capacidad de remoción del surfactante.

Por lo tanto se recomienda el uso de este impulsor a altas velocidades, pues su consumo de potencia y estabilidad no son muy importantes, pero la remoción es mayor.

Con el fin de comparar el consumo energético de cada impulsor, se hizo, como en las pruebas pasadas, el cálculo del área bajo la curva para obtener la energía asociada a los procesos de lavado. Los tres procesos se ilustran por medio de una misma gráfica (Figura 7.24).

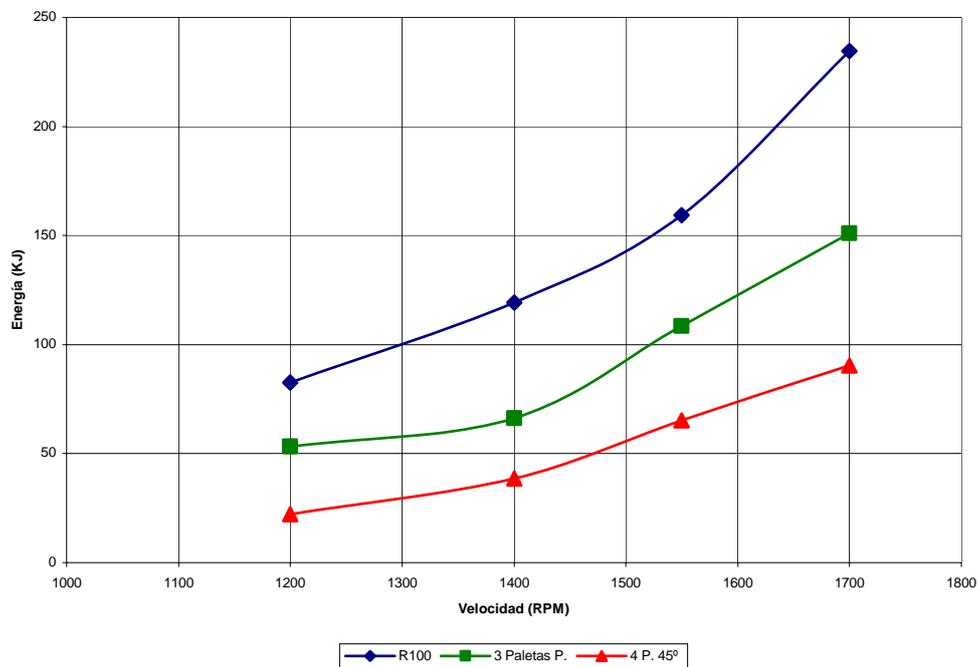
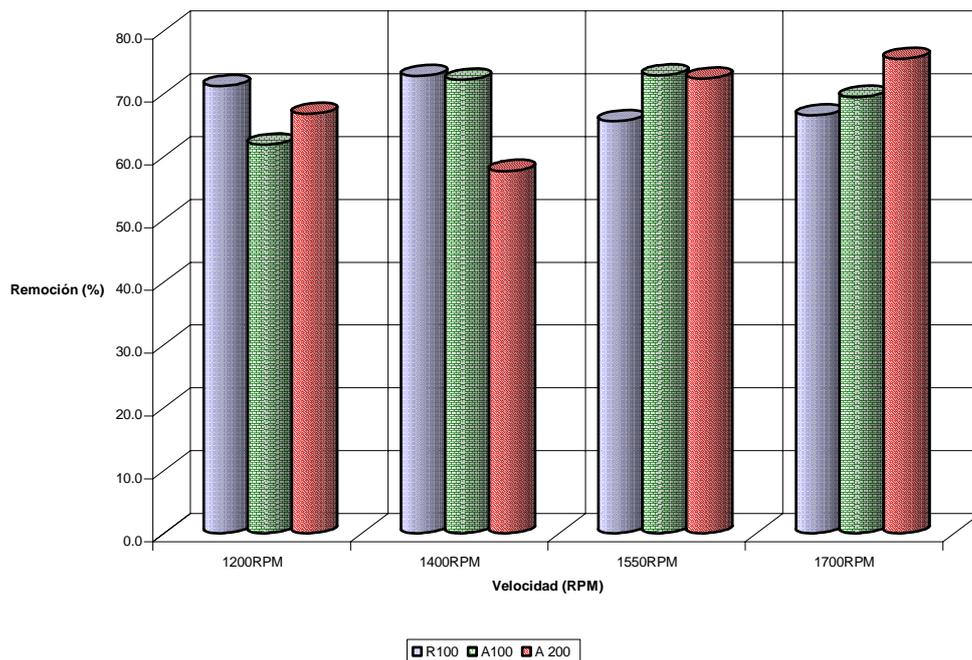


Fig 7.24: Energía de los procesos a concentración constante.

En esta grafica se confirma lo que ya se había hecho notar sobre la relación en la energía consumida entre los diferentes impulsores. El mayor consumo energético lo tiene el impulsor R100, seguido por el A100 de tres paletas planas y por último el A200.

Como se puede observar, los tres impulsores responden de la misma manera al aumento en velocidad, aumento de potencia proporcional al aumento de velocidad. Este aumento es de menor magnitud para el impulsor A200, pues para los otros el aumento es muy rápido.

Con el fin de comparar la eficiencia en remoción de los tres impulsores a diferentes velocidades, se preparó la figura 7.25.



*Fig. 7.25: Remoción de los procesos a diferentes velocidades.*

Como se observa, para cada condición hay un impulsor que es el óptimo en eficiencia de remoción de contaminante. Así, para 1200 y 1400 rpm el mejor es el impulsor R100, para 1550 rpm el A100 rpm y para 1700 rpm el A200. Hay que recordar, no obstante, el

consumo de energía de cada impulsor donde a pesar de tener remociones buenas a baja velocidad, la R100, presenta el mayor consumo de energía, siendo apenas un poco menor en su punto mínimo al punto máximo de A200. Es decir, el impulsor A200 puede ser usado a mayores velocidades, obteniendo muy buena remoción y consumo de energía moderado y menor a la mayoría de las velocidades de los otros impulsores.

De este modo la máxima remoción se obtiene con el impulsor A200 a 1700 rpm con un valor de 72.52 %, es decir, queda una concentración de TPH de 7833.6 mg/kg. Este valor se encuentra aún por encima de la norma pero por una diferencia muy pequeña, por lo que si se acopla a otro proceso de lavado, el resultado final será seguramente el de un suelo totalmente utilizable dentro de los parámetros ni buscados.

Por tanto se puede decir que el mejor impulsor para este caso por su bajo consumo energético, su menor sensibilidad a la velocidad y su alta remoción de TPH, es el de cuatro paletas a 45° (A200).

## **7.7 Gráficas de eficiencia de lavado**

Con el fin de evaluar la eficiencia real de lavado de cada proceso se construyeron las graficas de remoción contra energía asociada (Figuras 7.26-7.28). Con estas es posible determinar el tipo de impulsor óptimo y el proceso óptimo según los objetivos que se persigan.

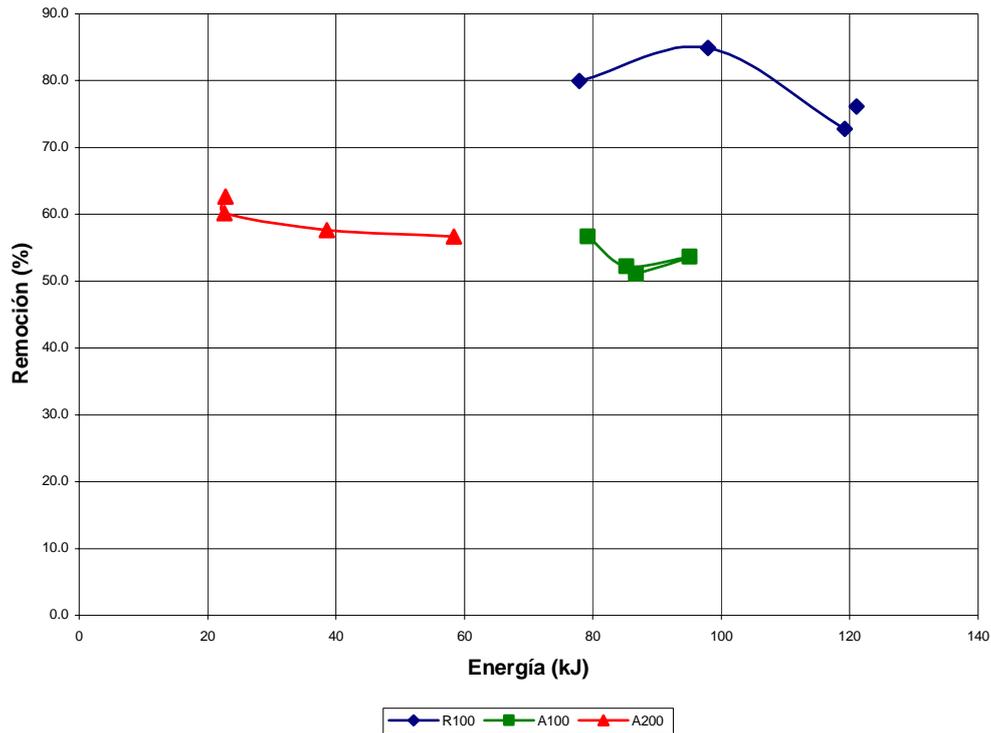
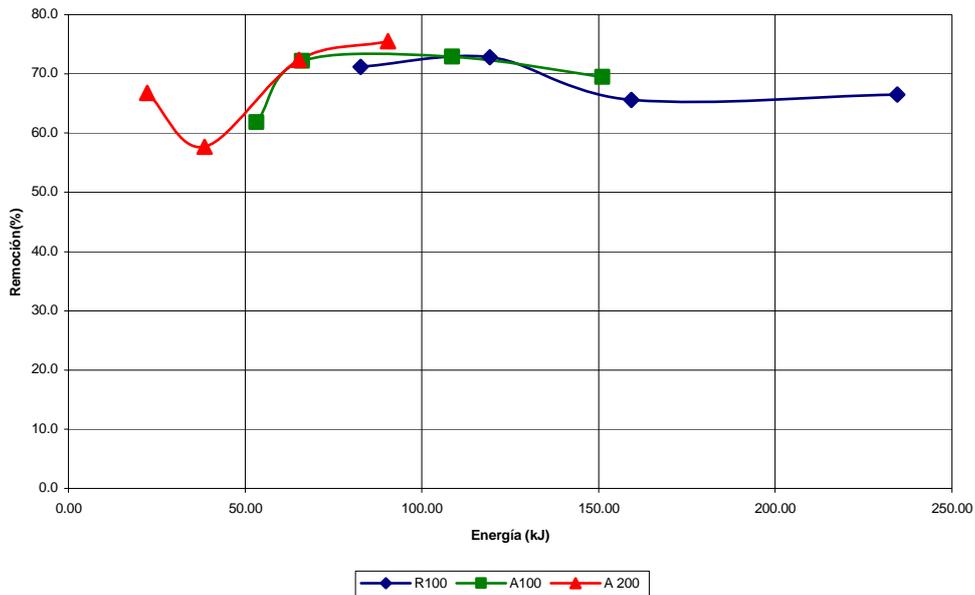


Fig. 7.26: Eficiencia de lavado de los procesos a velocidad constante.

Del proceso de lavado a una velocidad constante variando la concentración de suelo para cada impulsor obtenemos que el mejor punto de remoción lo da el R100 con un 84.9% de remoción consumiendo 97.95 kJ de energía con una concentración de 20% de suelo. Así mismo, la menor energía se obtiene con el impulsor A200 con un valor de 22.65 kJ y una remoción de 60.15% a una concentración de suelo de 20%. El impulsor A100 no presenta ningún punto óptimo para remoción o para consumo de energía que pueda superar a los otros dos impulsores.

De este modo para lograr una máxima remoción se escogería trabajar con R100 y para lograr un menor consumo de energía con una remoción aceptable, sería con A200; ambos procesos preferentemente a 20% de concentración de sólidos.



*Fig. 7.27: Eficiencia de los procesos a concentración constante.*

Para el proceso de lavado a diferentes velocidades con una misma concentración de suelo a lavar hay muchos puntos donde puede ser difícil tomar la decisión por alguno de los impulsores. La mayor remoción fue alcanzada por el impulsor de 4 paletas inclinadas a 45° (A200) con un valor de 75.5% y una energía de 90.43 kJ a 1700 rpm y el menor consumo de energía esta dado por el mismo impulsor con un valor de 22.7 kJ con una remoción de 66.76% a una velocidad de 1200 rpm. El mayor consumo energético y el segundo lugar en remoción lo logro el R100 y en niveles intermedios a estos impulsores se encuentra el A100.

En este caso se recomienda totalmente el uso del impulsor A200 por su bajo consumo energético y su alta remoción, haciéndolo el más eficiente de los tres.

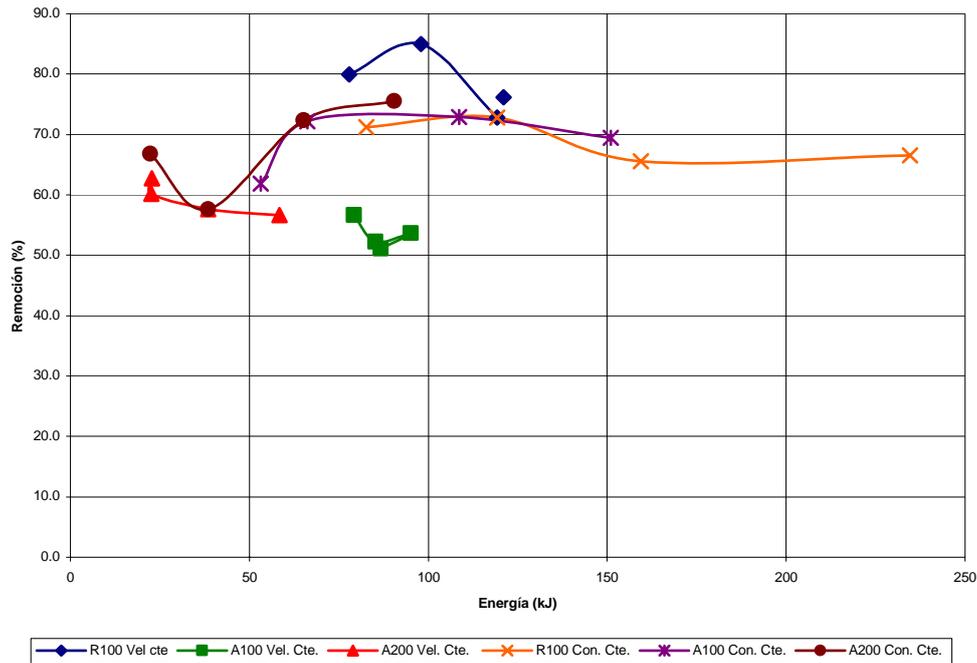


Fig. 7.28: Eficiencia de lavado de ambos procesos, remoción contra energía.

Comparando ambos procesos destaca la alta remoción del R100 y el bajo consumo energético de A200. Cabe recordar que ambos procesos tienen condiciones diferentes, sin embargo si es necesario tomar una cierta condición de trabajo se debe de fijar el parámetro con mayor importancia, ya sea la remoción o el gasto energético.

## 7.8 Pruebas de lavado a concentración constante y dos impulsores

Las combinaciones de impulsores fueron escogidas de acuerdo a lo que recomienda la literatura, donde uno de los impulsores deberá de ser siempre el que presente el mayor esfuerzo de corte de corte. (Sánchez *et al*, 1992). En este caso el impulsor de corte está siempre en la posición superior y en la inferior el de bombeo o de menor capacidad de corte. Así se tiene siempre un impulsor Rusthon (R100) como el de mayor altura en el sistema y otro R100, A100 y A200 como el más cercano al fondo del tanque.

Con estas pruebas de lavado se pretende evaluar el efecto del uso de dos impulsores en el lavado y como depende este de la velocidad de agitación. Dicha velocidad es la misma para cada impulsor y se escogió de modo que fuera superior al  $N_{js}$  donde el sistema fuera aún estable. Lo último es de vital importancia pues, como es de esperarse, el sistema desarrolla mayor potencia con el uso de dos impulsores que con uno solo y las vibraciones del motor hacen que la flecha oscile y los impulsores impacten al tanque. Este efecto es más o menos evidente dependiendo del sistema de impulsores que se utilicen. El caso más extremo es la combinación de dos impulsores Rushton, pues como ya se ha visto, este impulsor es el que genera mayor potencia y esfuerzo de corte. Estando combinado con otro igual el efecto se duplica y a altas velocidades el sistema es muy inestable. De modo similar sucede con las otras combinaciones de impulsores pero en menor proporción. De este modo, las velocidades para cada tipo de experiencias serían diferentes.

Cabe señalar, que los  $N_{js}$  para estas experiencias, son menores que las anteriores. Esto se puede explicar de acuerdo a dos aspectos. El primero es la cercanía del impulsor inferior al fondo, dado que en este caso es de sólo 3 cm, mientras que en los anteriores era de 5 cm. El segundo es por el uso de otro impulsor que facilita la suspensión de los sólidos por encima del impulsor inferior, aprovechándose con mayor eficiencia la energía de este en la suspensión de las partículas del fondo.

De acuerdo con lo ya mencionado, se hicieron las pruebas que se muestran en la tabla 7.5.

Tabla 7.5: Pruebas de lavado a concentración constante con dos impulsores

Prueba	Velocidad (RPM)	Impulsor	Concentración de suelo (%)
25	600	R100/R100	30
26	700	R100/R100	30
27	800	R100/R100	30
28	900	R100/R100	30
29	900	R100/A200	30
30	1200	R100/A200	30
31	1400	R100/A200	30
32	1550	R100/A200	30
33	800	R100/A100	30
34	900	R100/A100	30
35	1200	R100/A100	30
36	1400	R100/A100	30

### 7.8.1 Rushton con Rushton (R100/R100)

Los resultados de las pruebas con la combinación R100/R100 se muestran a continuación en la figura 7.29.

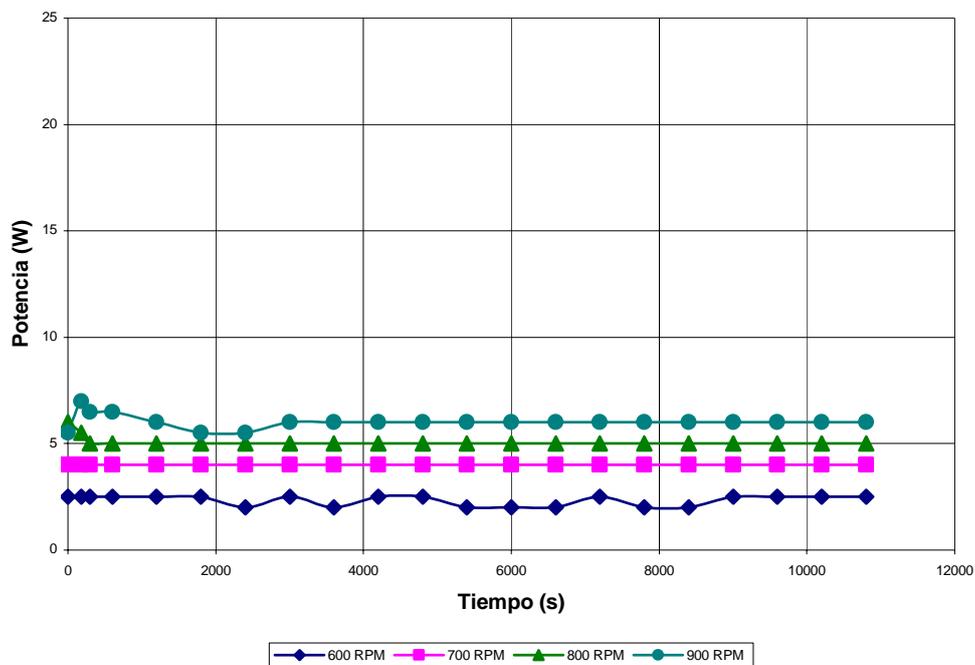
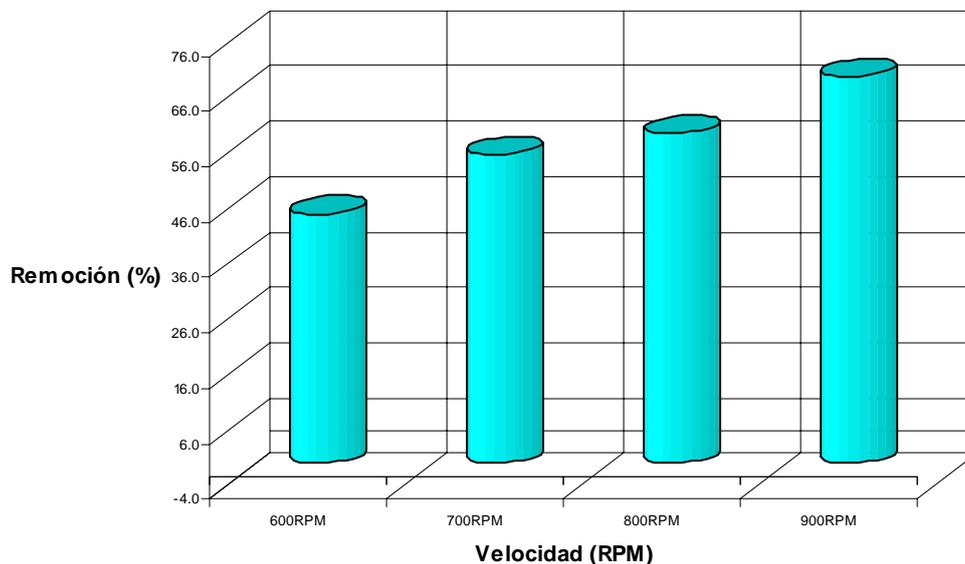


Fig. 7.29: Potencia del sistema R100/R100

Como ya se dijo, con este impulsor se probaron las velocidades menores, siendo de la mitad de magnitud de las probadas anteriormente. La tendencia observada concuerda con lo esperado, en cuanto, la potencia aumenta conforme aumenta la velocidad de agitación y las medidas de potencia tienden a una constante mucho más rápido. En este caso, la observación experimental, demuestra que la homogenización de la mezcla se lleva a cabo mucho más rápido pero con presencia constante de espuma. En contraste con las experiencias pasadas, estas muestran una espuma constante a lo largo del proceso y mucho más abundante.

La presencia de esta espuma, puede explicar que las remociones de hidrocarburo, no fueran de la magnitud esperada, como se puede observar en las graficas de remoción porcentual.



*Fig. 7.30: Remoción del sistema R100/R100*

De acuerdo con lo esperado inicialmente, los resultados demuestran una marcada dependencia de la remoción con respecto a la velocidad de agitación. Sin embargo la

remoción máxima fue apenas del 69.8%. La baja eficiencia en remoción puede ser explicada por que las velocidades utilizadas son menores y por tanto quizá se necesitaría más tiempo para alcanzar el máximo de lavado. Así mismo, la generación de la espuma observada, no favorece el proceso de lavado, sino por lo contrario, hace que el surfactante tenga menor eficiencia para remover el hidrocarburo, además de que la presencia de aire disminuye la potencia real del sistema.

### 7.8.2 Rushton con 4 paletas a 45° (R100/A200)

Los resultados de las pruebas con la combinación R100/A100 se muestran en la figura 7.31.

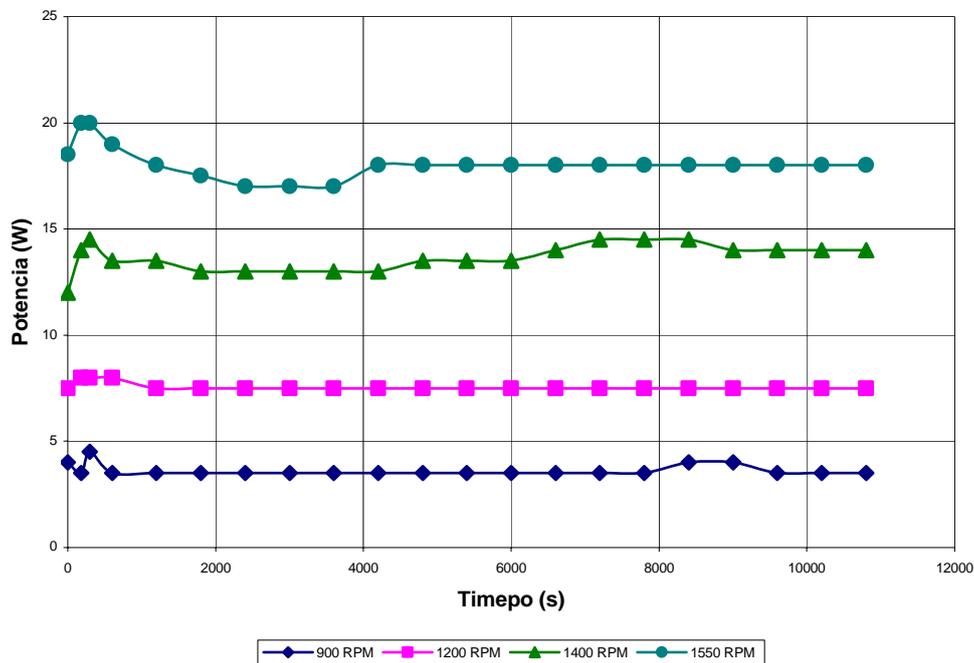


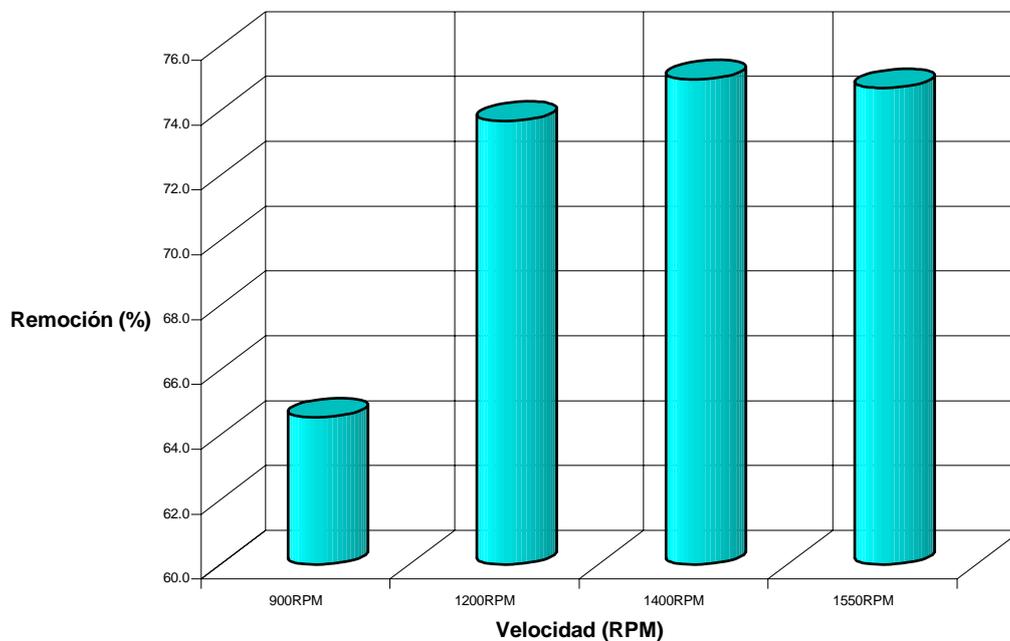
Fig. 7.31: Potencia del sistema R100/A200

Las velocidades de este lavado pudieron ser las máximas, por efecto del impulsor A200 que consume menos energía y da poco esfuerzo de corte, lo que favorece la estabilidad del sistema al girar a altas velocidades.

A la más baja velocidad (900 rpm) se observa aun, un poco de sedimento en el fondo cerca de los deflectores, por tanto esta velocidad es muy cercana ya al  $N_{js}$ . Esta condición permite anticipar que la remoción no será muy buena pues se dispone de muy poca energía en el sistema para el lavado.

Las tendencias observadas confirman lo esperado en cuando a que la potencia depende directamente de la velocidad de agitación, sin embargo, las medidas de potencia no son muy estables y presentan cambios, asociados con cambios en la altura de la espuma; persistente en todos los caso.

La homogenización de la mezcla se observa más rápido a velocidades mayores, siendo este momento cuando se estabilizan las mediciones de potencia.



*Fig. 7.32: Remoción del sistema R100/A200*

La remoción de este sistema respalda lo esperado en cuanto a la primera velocidad, dado que se obtuvo la menor remoción de esta combinación de pruebas. Como ya se dijo, esto se explica por la cercanía de esta velocidad con el  $N_{js}$  del sistema. En los demás casos la remoción fue mucho mayor pero ya no depende tanto de la velocidad de agitación. Una vez por encima de la velocidad mínima de suspensión ( $N_{js}$ ), la remoción parece no tener mucha relación con la velocidad de agitación y, dado la dependencia de la potencia con la velocidad aplicada, no se recomendaría aplicar más velocidad al sistema.

### 7.8.3 Rushton con 3 paletas planas (R100/A100)

Los resultados obtenidos con la combinación R100/A100 se muestran en la figura 7.33.

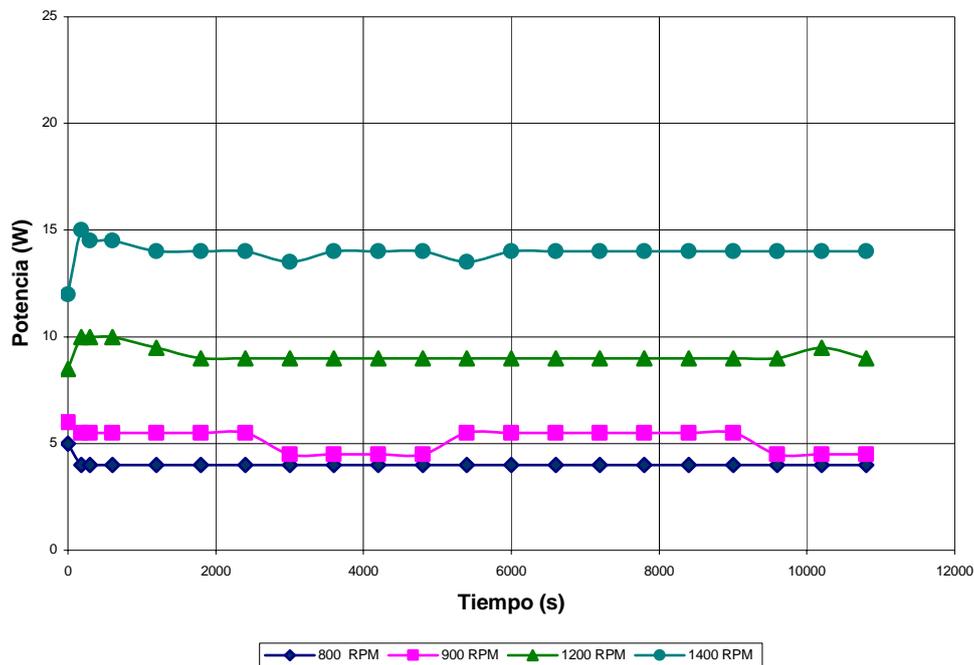
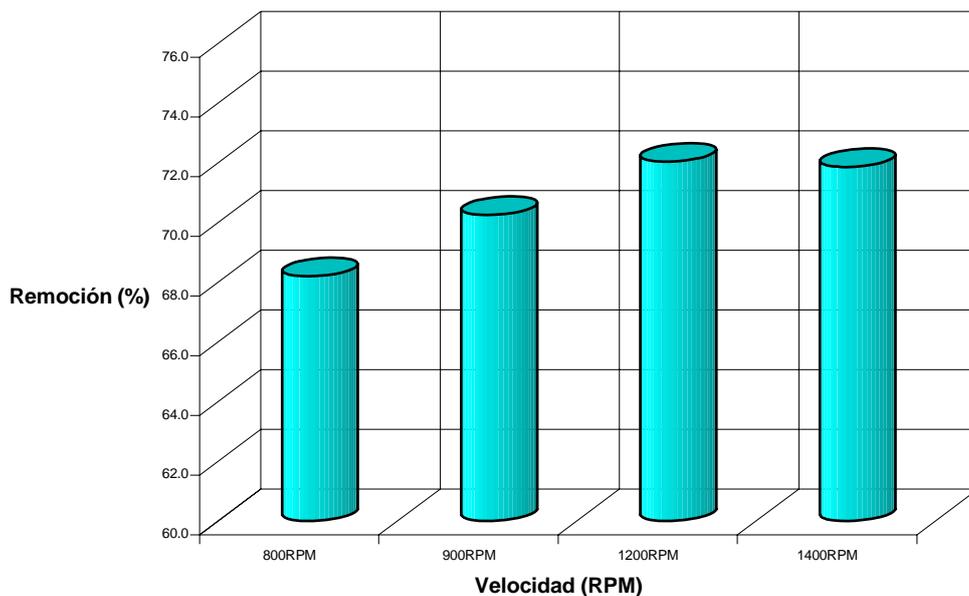


Fig. 7.33: Potencia del sistema R100/A100.

Este sistema presenta, al igual que R100/R100, mucha inestabilidad, sobre todo en la medición de potencias. Esta es dependiente directamente y en manera creciente de la

velocidad. Presente mucha espuma que varía en altura en todo el proceso y, aunque la homogenización sucede rápido, la persistencia de la espuma, disminuye la eficiencia en la remoción e inestabilidad en las mediciones de potencia.

De acuerdo a lo observado durante la experiencia y que el hecho de que ambos impulsores son de corte y flujo radial; se observa un traslape en los patrones de flujo de ambos. Esto se presenta sobre todo, como un traslape, del efecto del impulsor R100 sobre el A100, ocasionando un desperdicio de energía e inestabilidad. Sería recomendable usar esta combinación de impulsores a mayor separación entre ellos y a velocidades no muy altas.



*Fig. 7.34: Remoción del sistema R100/A100*

En cuanto a la remoción, para este sistema, se observa que es menor a la presentada por el anterior (R100/A200) y es más dependiente de la velocidad, hasta un cierto punto donde la variación es mínima. Como ya se había hecho notar anteriormente, la menor remoción se presenta en velocidades cercanas al  $N_{js}$ , concordando con lo esperado. Por

tanto, para esta combinación de impulsores se debe encontrar la velocidad que resulta en el mejor lavado y no sobre pasarla, puesto que la remoción no aumenta como lo hace el consumo energético.

Este sistema requiere que se encuentre un punto óptimo en cuanto a la separación entre impulsores y la velocidad de agitación, pues por la configuración del mismo, es muy fácil el desperdicio de energía, así como también, el que no sea suficiente para llevar a cabo el proceso.

La energía asociada a los procesos de lavado se muestra en la figura 7.35, a continuación.

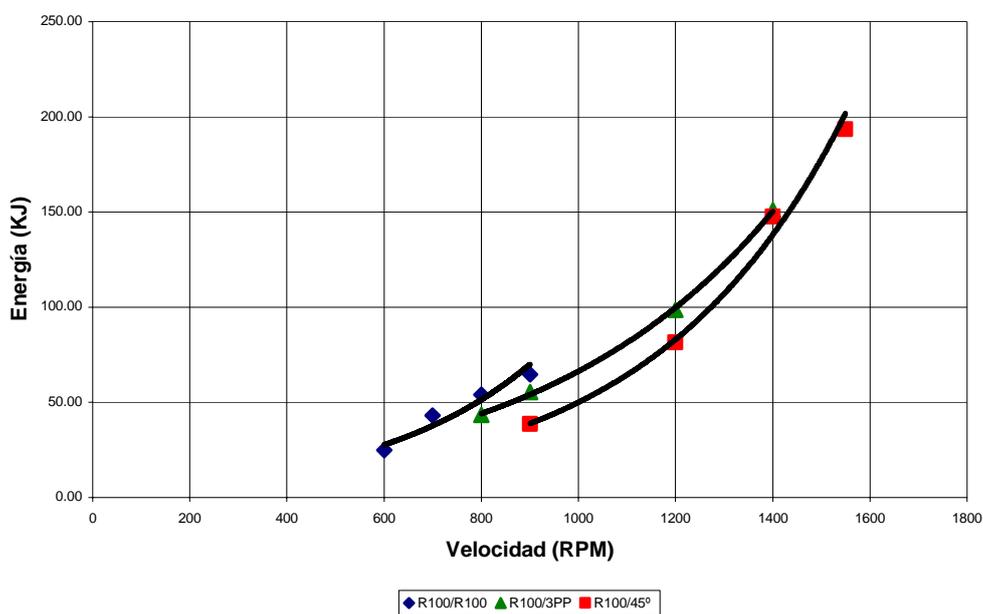


Fig. 7.35: Energía de lavado con dos impulsores.

De la integral bajo la curva de cada proceso, se obtiene la energía requerida para el lavado. Como se puede observar, el comportamiento es diferente la combinación de los comportamientos observados para los impulsores individuales.

En el caso de R100/R100, el aumento de la energía respecto a la velocidad aumenta pero se llega a una atenuación del efecto. Se hizo un ajuste de los puntos obtenidos a una curva exponencial obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.9247, lo que indica que no es un mal ajuste. La ecuación obtenida es:

$$\text{Ec. } E = 4.37e^{0.0031N} \quad (1)$$

Donde

E, es la energía aplicada al sistema en kilojoules.

N, es la velocidad de agitación en revoluciones por minuto.

Por medio de esta ecuación podemos predecir el comportamiento energético a una velocidad dada para este sistema

Para el caso R100/A200 la dependencia de la energía con la velocidad es la más acentuada, lo que difiere del sistema con un solo impulsor A200 que es el menos dependiente de la velocidad. Sin embargo como en los casos anteriores, para velocidades iguales, el sistema con menor consumo energético es el de A200 y aun que en combinación con R100, es el que tiene mayor dependencia con la velocidad, se puede decir que presentará menor magnitud de energía consumida a una velocidad dada igual a la de los otros dos sistemas.

El ajuste exponencial, para este sistema, presenta un coeficiente de correlación de 0.9956 y la ecuación obtenida es:

$$\text{Ec. } E = 3.961e^{0.0025N} \quad (2)$$

De acuerdo con lo dicho, el valor de la ordenada al origen, es el menor de los tres sistemas, por lo que en efecto es el sistema que presenta menor energía a una velocidad dentro del rango que se probó.

Finalmente, para el sistema R100/A100, el comportamiento es intermedio, como sucedió siempre con el impulsor A100. Es muy marcada también la dependencia de la energía con la velocidad y llega a semejarse mucho con el sistema R100/A100. Según el modelo con coeficiente de ajuste de 0.9987; la ecuación resultante es:

$$\text{Ec. } E = 8.590e^{0.002N} \quad (3)$$

A la velocidad de 1550 rpm, la energía para este sistema y el R100/A200 será la misma, y en velocidades superiores, el menor consumo de energía ya no será con este último sistema, sino con el R100/A100. Sin embargo es necesario recordar que la remoción para el caso de R100/A200 alcanza un máximo y no se incrementa con la velocidad y, que para el sistema R100/A100, es necesario un punto óptimo de velocidad para la remoción. Por tanto no es necesario llegar a velocidades tan altas donde ya se presente esta inversión en el comportamiento.

Por la particularidad de que en el sistema de dos impulsores no se usaron las mismas velocidades para cada prueba, se hace la comparación de las remociones de cada uno por medio del número de Reynolds asociado a cada velocidad de lavado.

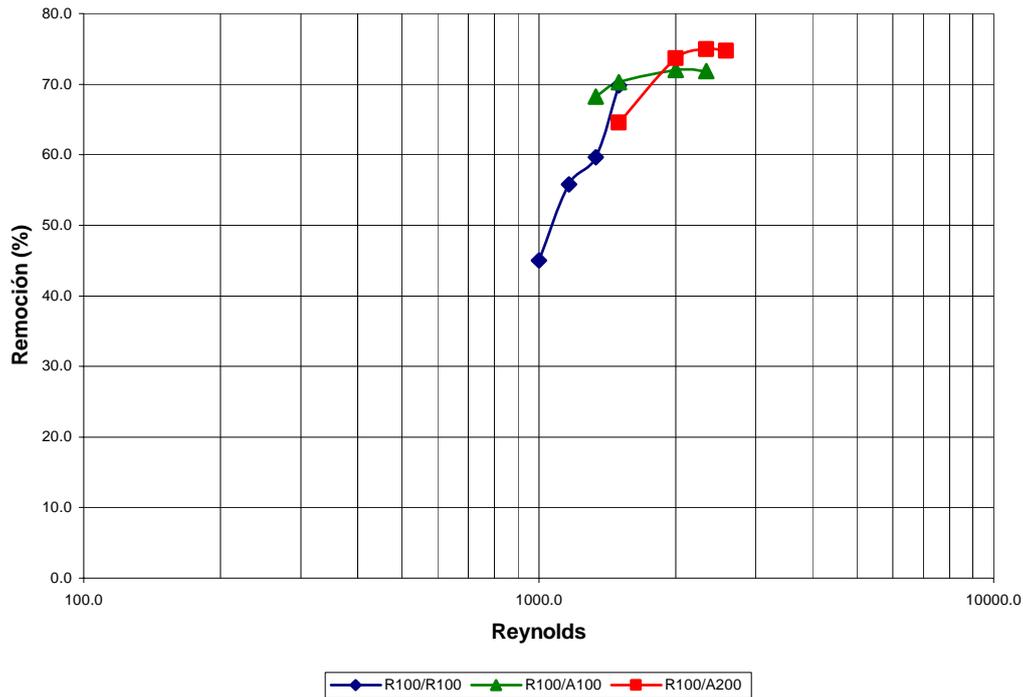


Fig. 7.36: Remoción del lavado con dos impulsores.

De este modo es posible comparar las remociones de los 3 sistemas y se puede observar que la mejor remoción se obtiene con la combinación R100/A200, que concuerda con lo obtenido en las pruebas individuales, donde ambos impulsores mostraron el mejor rendimiento. Como ya se había indicado, este sistema alcanza un máximo de remoción a una velocidad y ya no aumenta, por lo que es hasta este punto donde es conveniente llevar a cabo el lavado.

Cabe destacar que el sistema R100/R100 obtuvo las remociones más pobres pero también se probó a velocidades menores. Observando esta tendencia, es posible que a mayores velocidades su remoción sea muy buena, pues es el más dependiente de la velocidad. Sin embargo el gasto energético sería también mucho mayor.

En todos los casos de dos impulsores, se observó que la espuma aumenta la altura de la mezcla de agitación casi en el doble que la inicial. Así, si la altura inicial es de 10 cm.,

llega incluso a ser de 16.5 cm. para el sistema R100/A100 a 1200 rpm. Por tanto es importante cuidar, en el diseño del tanque, que la altura sea por lo menos del doble que la altura correspondiente al volumen de lavado.

### 7.9 Gráfica de eficiencia de lavado con dos impulsores

La eficiencia de lavado para cada una de las combinaciones se muestra a continuación en la figura 7.37.

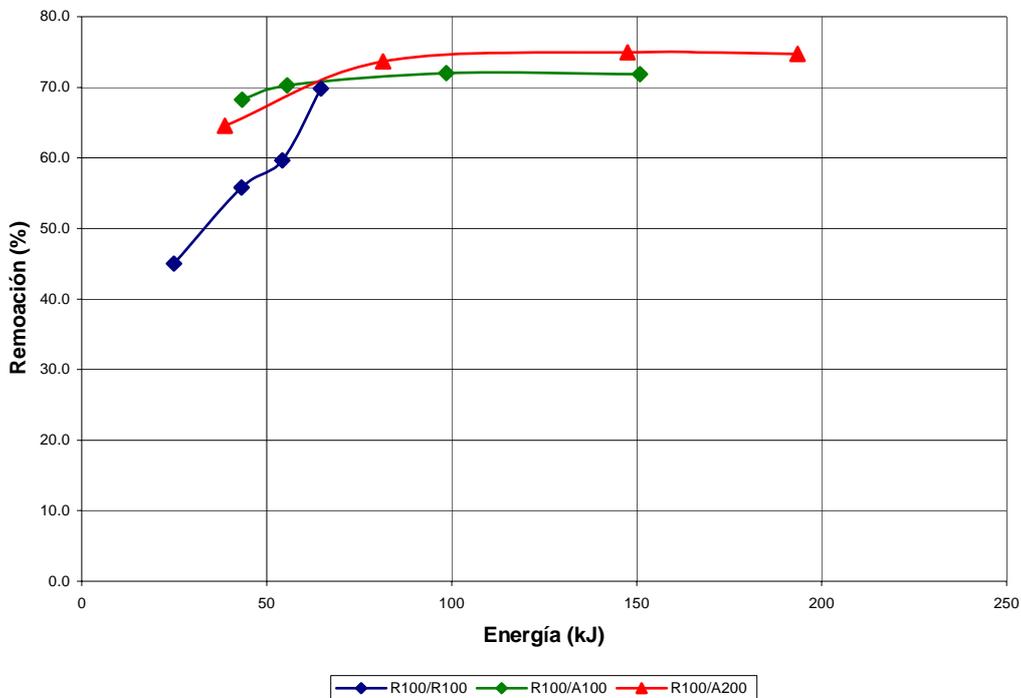


Fig. 7.37: Eficiencia del lavado con dos impulsores.

Como se observa, el mejor lavado fue con el sistema R100/A200, donde se obtuvo una remoción muy alta (73.67%) desde 1200 rpm, consumiendo 81.4 kJ que es menor que la energía consumida por los otros sistemas a esta velocidad. Sin embargo el sistema R100/R100 aumenta su remoción con respecto a la velocidad, y por tanto en energía, a una mayor tasa que los otros. Con esto se puede predecir que este sistema será mucho más eficiente a velocidades iguales. Es necesario, hacer hincapié, en las ventajas y

desventajas de cada sistema, pues aun que, aparentemente, el sistema más eficiente es el de R100/R100, es también el que presenta la mayor inestabilidad. Es de esperarse que la tendencia de este sistema, también tienda a un máximo, como los otros sistemas, pero posiblemente este máximo sea mayor que el de R100/A200 y con un consumo energético menor o similar.

En general, para todas las pruebas realizadas, los impulsores que destacan son el Rushton por su alta remoción y consumo de energía y el de 4 paletas inclinadas por su buena remoción y bajo consumo energético.

### **7.10 Efecto de la concentración del suelo**

Con el fin de hacer una mejor evaluación de la influencia de la cantidad de suelo en la solución sobre el consumo de potencia y la eficiencia de lavado se realizaron las siguientes graficas que comprenden estos aspectos, para cada uno de los impulsores (fig. 7.38-7.40)

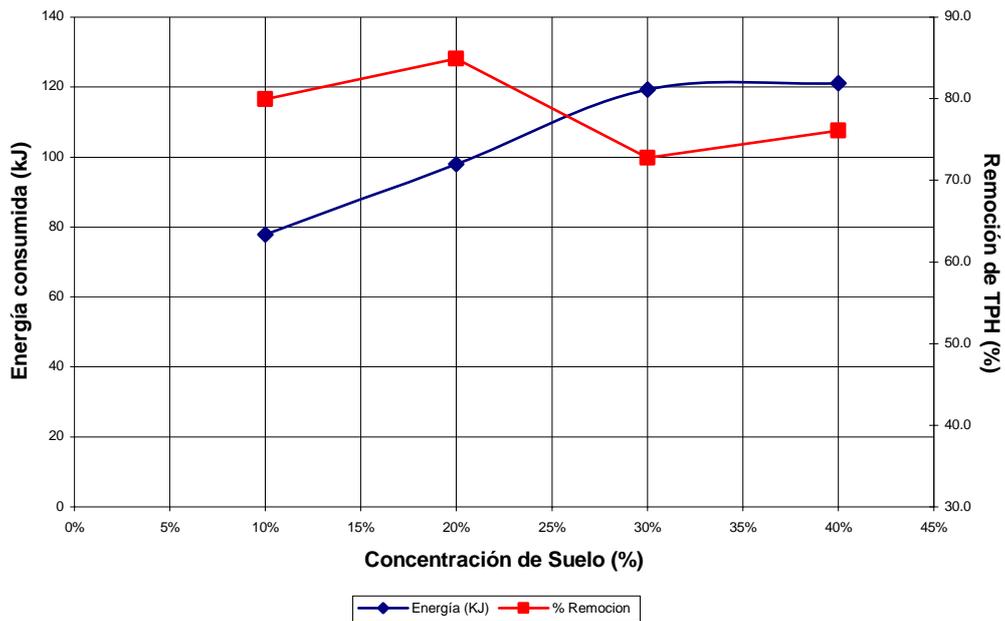


Fig. 7.38: Efecto de la concentración del suelo para el impulsor Rushton.

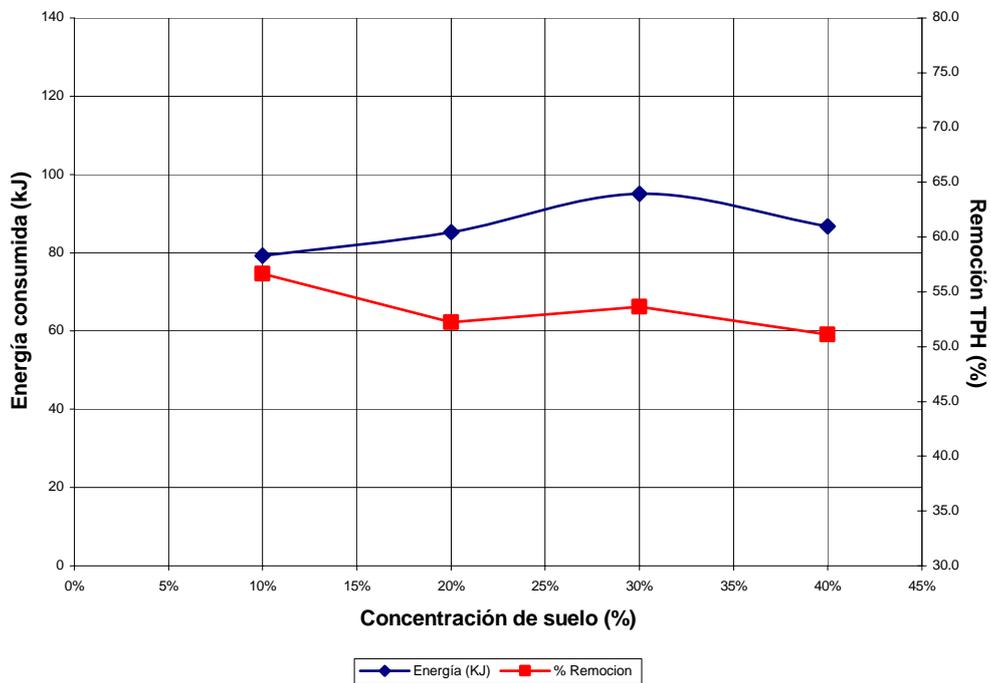
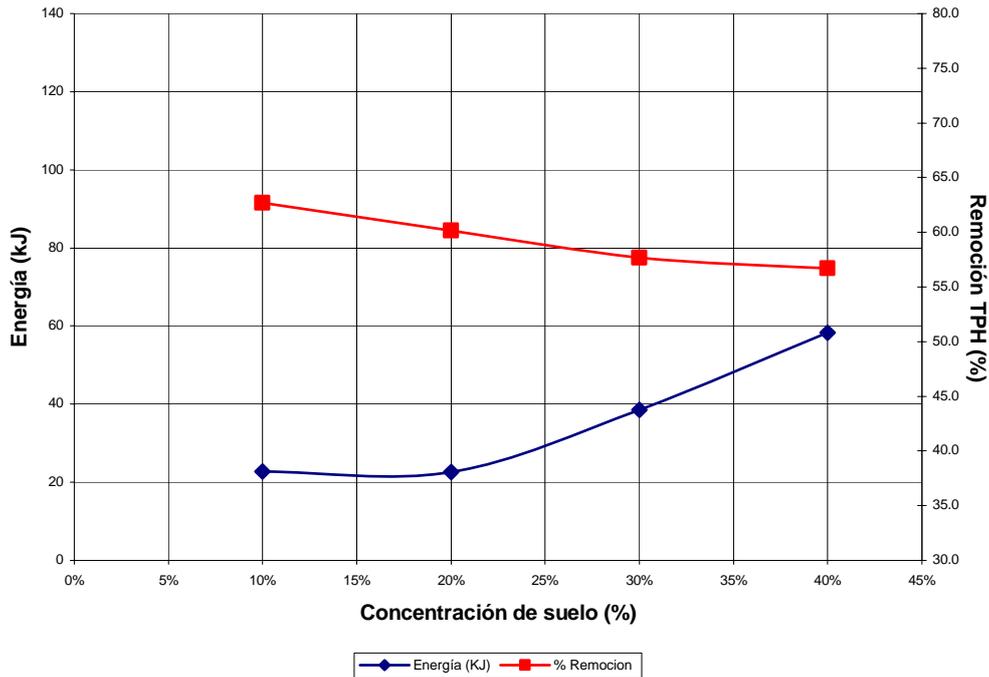


Fig. 7.39: Efecto de la concentración del suelo para el impulsor de tres paletas planas.



*Fig. 7.40: Efecto de la concentración del suelo para el impulsor de cuatro paletas inclinadas 45°*

Como ya se ha hecho notar, la influencia de la cantidad de suelo sobre los parámetros evaluados, es diferente según la geometría del impulsor. Así, para R100, un aumento en la energía, se traduce en una disminución en el lavado, para A100 y A200 el comportamiento de la remoción respecto a la energía consumida es muy parecida; un aumento en energía representa una disminución en la eficiencia de lavado. De aquí que el suministrar energía extra al sistema no sea benéfico, sino contraproducente, en cuestión de consumo de potencia, gasto de materiales y disminución en la efectividad de la técnica. Dado que, el aumento de energía en este caso, depende del aumento en la cantidad de suelo presente es, por tanto, mejor realizar el lavado a bajas concentraciones de suelo (no mayor al 20%).

### 7.11 Efecto de la velocidad de agitación.

De forma similar a los resultados anteriores, se evaluó por medio de graficas el comportamiento de la energía requerida y del lavado obtenido, al variar la velocidad para cada impulsor y los resultados se muestran en las figuras 7.41-7.43.

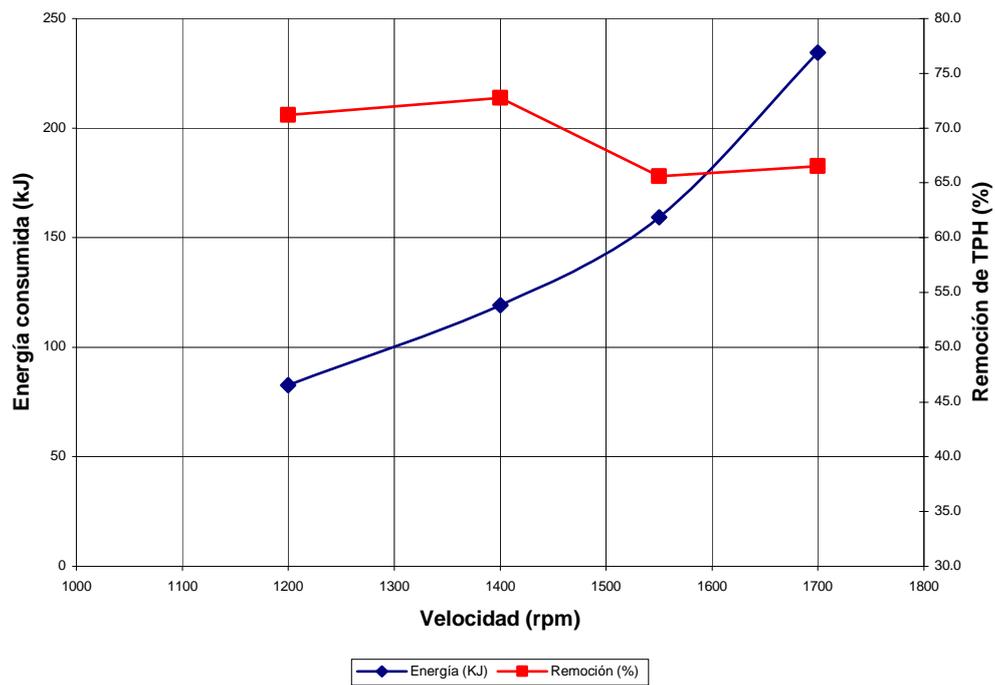


Fig. 7.41: Efecto de la velocidad de agitación para el impulsor Rushton.

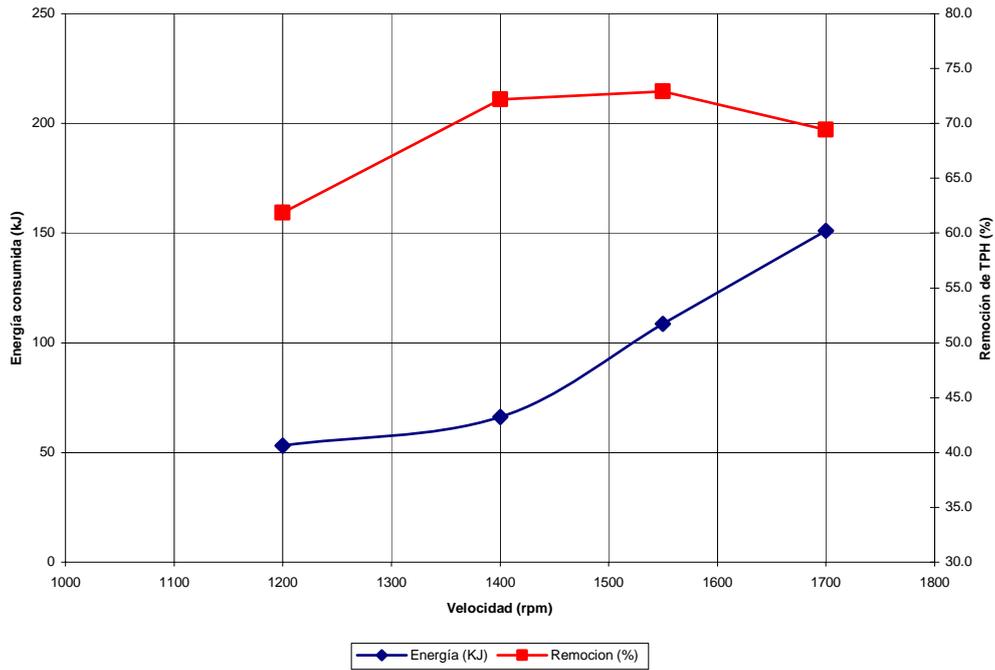


Fig. 7.42: Efecto de la velocidad de agitación para el impulsor de tres paletas planas.

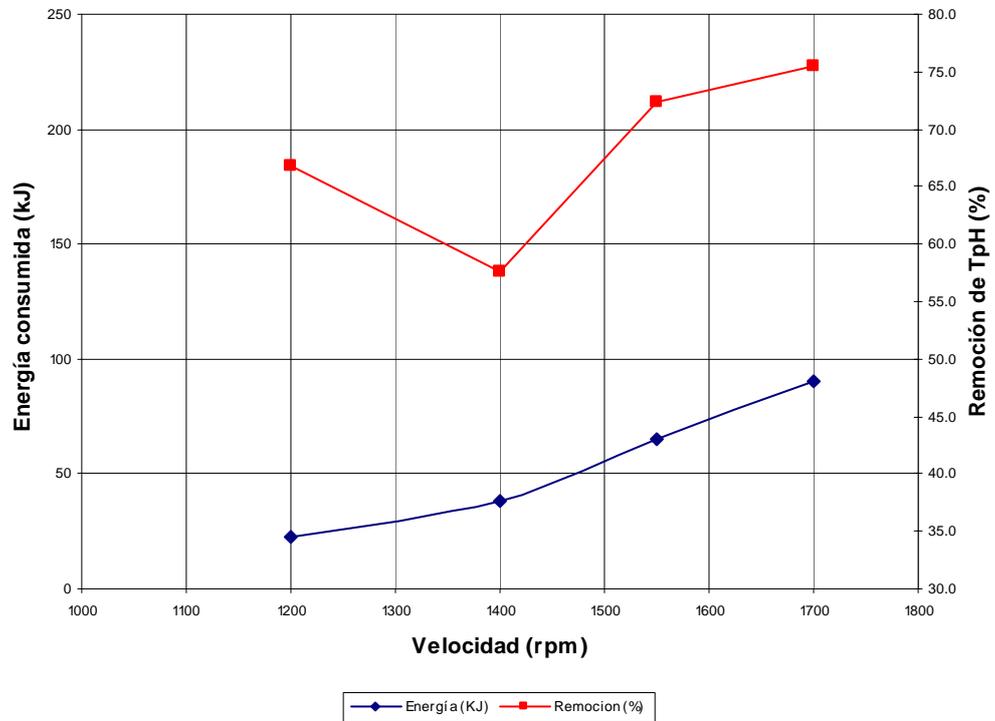


Fig. 7.43: Efecto de la velocidad de agitación para el impulsor de cuatro paletas inclinadas 45°

Como es posible apreciar, para los impulsores R100 y A100, el aumento de velocidad de agitación no favorece significativamente el lavado, por lo contrario, lo hace de menor eficacia, al mismo tiempo que si aumenta la energía consumida. Por tanto para estos dos impulsores, no es recomendable que se usen a velocidades muy altas. Quizá dicho comportamiento se observa, dado que la gran capacidad de corte de ambos impulsores a altas velocidades.

Por otro lado, para el impulsor A200, si resulta un mejor lavado a velocidades mayores. Por tanto, un aumento en el bombeo en la mezcla de lavado, representa un aumento en la remoción de hidrocarburo y para impulsores con buena capacidad de bombeo como el A200, si se recomienda una velocidad de agitación más alta.

### **7.12 Efecto de la velocidad de agitación sobre dos impulsores**

De manera análoga se analizó el efecto de la velocidad para los sistemas de dos impulsores. Los resultados se muestran en las figuras 7.44-7.46.

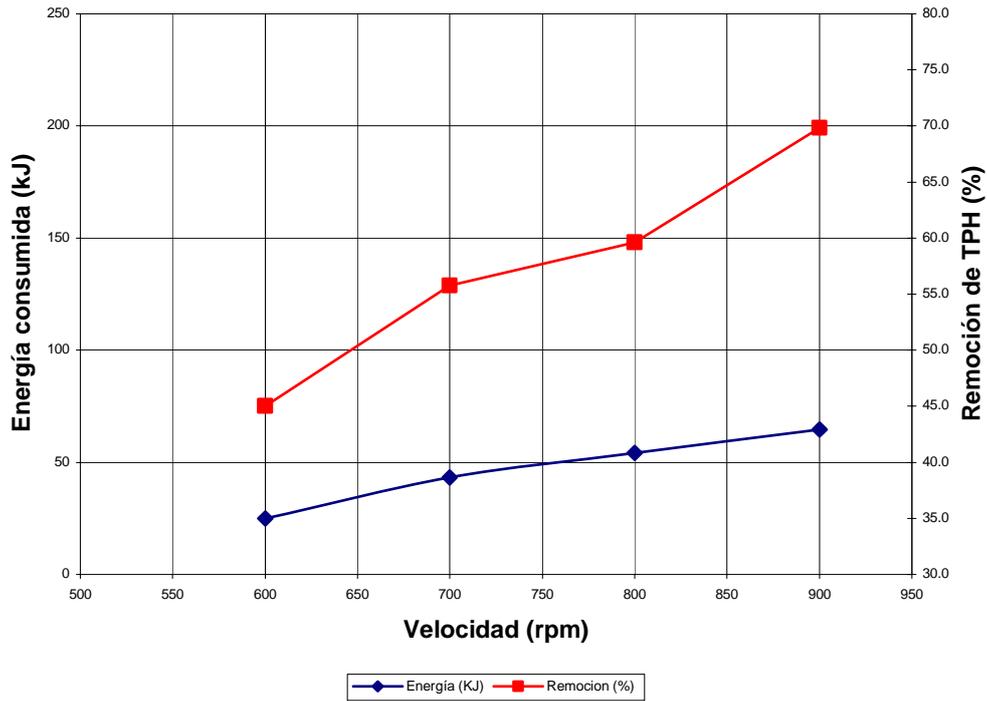


Fig. 7.44: Efecto de la velocidad sobre el sistema R100/R100.

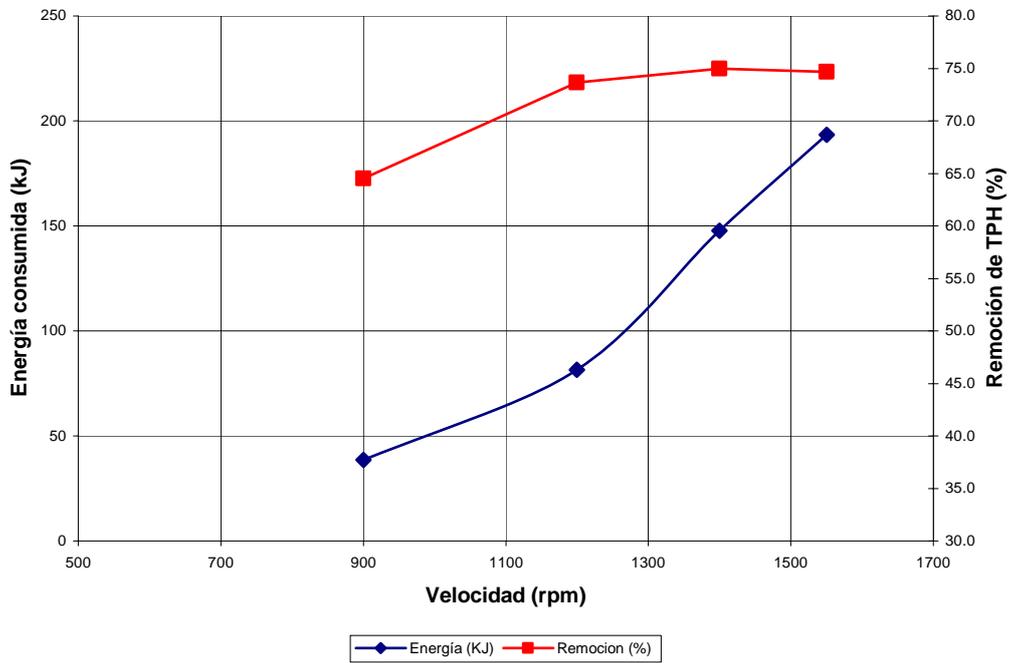
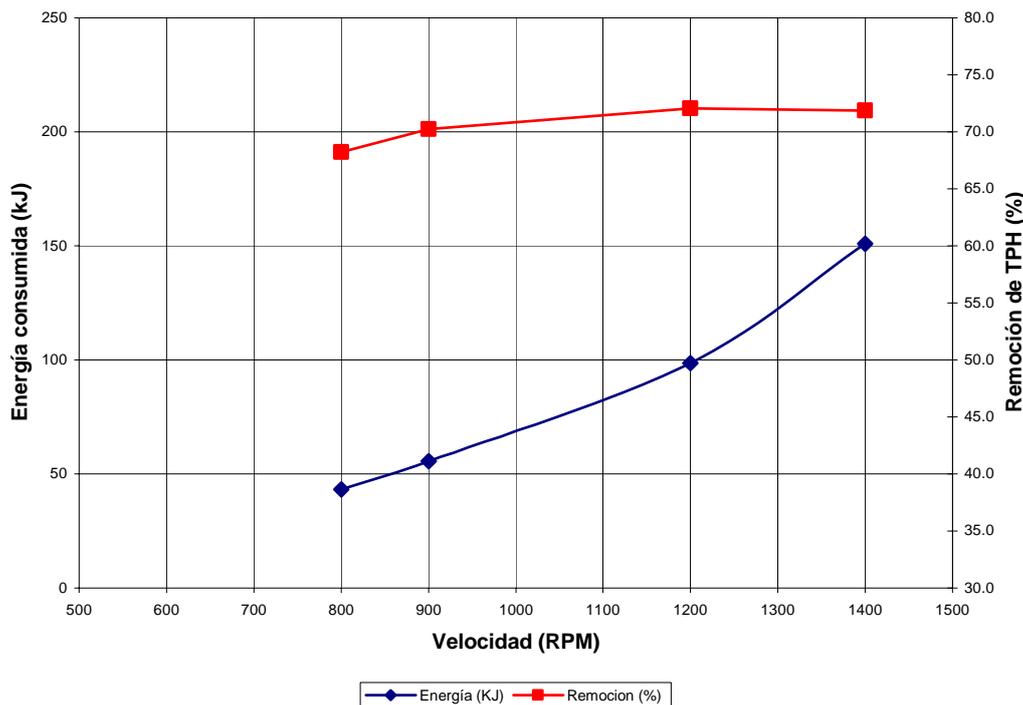


Fig. 7.45: Efecto de la velocidad sobre el sistema R100/A100.



*Fig.7.46: Efecto de la velocidad de agitación sobre el sistema R100/A100.*

En general para estos sistemas, el empleo de velocidades mayores en el lavado, si se tradujo en un aumento en la eficacia del lavado, sin embargo, la tendencia es que se llegue a un punto de remoción máximo y después haya una disminución. Esto parece estar respaldado en las experiencias con un solo impulsor, donde los impulsores radiales, reportan un decremento en la capacidad de lavado con el aumento considerable de velocidad. En estos casos, por tratarse de un sistema compuesto donde ambos impulsores contribuyen a la agitación y lavado, el comportamiento es mucho más discreto, pero a fin de cuentas muy similar. Lo anterior se observa sobre todo en los sistemas donde se pudieron alcanzar velocidades mayores como en el R100/A200 y R100/A100. En dichos sistemas primero se observa un aumento en la remoción de hidrocarburo, una sección prácticamente constante y por último un ligero decremento. Este comportamiento sea posiblemente igual para el sistema R100/R100, sólo que las velocidades evaluadas corresponden a la sección donde aumenta la remoción con el aumento de la velocidad. Esta suposición es razonable por dos razones: dado que la

máxima velocidad empelada para este sistema fue la menor para los otros sistemas y por el comportamiento observado para el impulsor R100 en las pruebas previas.

Por tanto, para un sistema de dos impulsores es necesario llegar a un punto óptimo de lavado, donde la remoción por energía empleada sea la máxima, pues un exceso es contraproducente en todos sentidos.

### **7.13 Velocidad mínima de agitación.**

En muchas de las pruebas de lavado se evaluó la velocidad mínima en la que se lleva a cabo la suspensión de todas las partículas sólidas ( $N_{js}$ ). Estas determinaciones aportan datos de  $N_{js}$  reales para los sistemas de lavado de suelos.

Hay que recordar que hay muchas variables que influyen directamente sobre el  $N_{js}$  como lo son el tipo de impulsor, la distancia de este al fondo del tanque, viscosidad y densidad de la solución y en este caso en particular: la forma, tamaño, densidad, porosidad y rigidez de las partículas de suelo. Esto difiere totalmente de los modelos teóricos, que fueron desarrollados a partir de partículas uniformes en todos estos aspectos.

Los resultados de dichas mediciones se muestran en la tabla 7.6.

Tabla 7.6: Velocidad mínima de agitación  $N_{js}$ .

Impulsor	Suelo (% w/v)	Velocidad (rpm)	$N_{js}$ (rpm)	$N_{js}$ Promedio (rpm)	$N_{js}$ Teórico (rpm)
A100	30	1400	1100	967	64.2
		1200	957		
		1550	860		
		1700	950		
	40	1400	1230	1230	66.6
A200	10	1400	877	877	55.6
	20	1400	1117	1117	60.9
	30	1400	1206	1128	64.2
		1200	1034		
		1550	1233		
		1700	1039		
	40	1400	1208	1208	66.6
R100	30	1200	677	669.7	64.1
		1550	666		
		1700	666		
R100/R100	30	600	481	491.5	58.7
		700	497		
		800	537		
		900	451		
R100/A200	30	900	900	812.5	58.7
		1200	832		
		1400	704		
		1550	814		
R100/A100	30	900	560	622	58.7
		800	690		
		1200	558		
		1400	680		

El modelo teórico fue calculado con la siguiente ecuación de Armenante *et al*, 1998.

$$N_{js} := 3.06 \left( \frac{T}{D} \right) \cdot 1.33 \exp \left( 0.44 \frac{C_b}{T} \right) \cdot D^{-0.63} \cdot X^{0.13} \cdot d_p^{0.20} \cdot v^{0.1} \cdot \left( \frac{g \cdot \Delta p}{\rho L} \right)^{0.45} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde los valores de los parámetros empleados fueron los que se indican en la tabla 7.7.

Tabla 17: Nomenclatura teórica para la determinación de  $N_{js}$

Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
T	Diámetro del tanque	0.1	m
D	Diámetro del impulsor	0.05	m
C <sub>b</sub>	Distancia del impulsor al fondo	0.05	m
X	Porcentaje de peso en sólidos	20-40	g/g
dp	Tamaño de partícula	0.25	mm
v	Viscosidad cinemática del líquido	1.00E-06	m <sup>2</sup> /s
g	Constante de gravedad	9.81	m/s <sup>2</sup>
$\Delta\rho$	Diferencia de densidades sólido-líquido	1569	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_L$	Densidad del líquido	1000	kg/m <sup>3</sup>

Como se puede fácilmente notar, hay una gran diferencia entre los valores de  $N_{js}$  calculados por medio de la ecuación empírica con respecto a los obtenidos en las mediciones experimentales. La razón de dicha diferencia estriba en que el modelo empírico considera condiciones ideales, como una agitación uniforme y partículas sólidas de tamaños, formas y densidades iguales. La mezcla de lavado experimental está muy lejos de dichas condiciones tanto en la composición de la fase sólida como de la solución de lavado misma. Por tanto queda demostrado que aun hace falta mucha precisión en los modelos empíricos de velocidad mínima de agitación para la solución real de un lavado de suelos.

Las velocidades de agitación empleadas en las pruebas de lavado, son mayores a los  $N_{js}$  correspondientes para cada caso. En el caso donde son muy cercanas, se esperaba un lavado pobre, pues la energía suministrada sobrante después de la suspensión de las partículas, es la que se emplea propiamente en el lavado. En la literatura se ha recomendado lavar apenas por encima del  $N_{js}$ , lo que no es adecuado, es mucho mejor realizar el lavado a velocidades muy por encima de este.

Como se puede observar en los resultados, las experiencias son muy poco predecibles pues hacer estimaciones de velocidades de agitación para el proceso, basándose en determinaciones teóricas de  $Njs$ , sería inadecuado. Así mismo, las velocidades no pudieron ser las mismas para dos impulsores por la inestabilidad que ocasionan al sistema por vibración. Por tanto, las condiciones de lavado tuvieron que ser modificadas de lo planeado durante el transcurso de las experiencias y no fue posible desarrollar un modelo de diseño experimental del tipo multifactorial o  $3^k$ , donde aunado a la escasez de suelo a evaluar, es necesario fijar condiciones de lavado desde un inicio. Para la interpretación de datos se intentó evaluar por medio de Anova, sin embargo, al ser diferentes el número de variables a considerar, en muchos casos se obtuvieron valores inadecuados de respuesta. De cualquier modo, por medio del análisis de las gráficas y resultados obtenidos se puede interpretar cuáles son las variables con mayor peso para determinar la remoción de contaminante o de energía suministrada al sistema.

## 7.14 Escalamiento

Como en todo proceso de ingeniería, debe de pensarse siempre en llevarlo de la escala piloto, a escala real para la cual fue diseñado el proceso. Para ello es necesario establecer condiciones y criterios de escalamiento.

De manera muy sencilla se proponen aquí dos posibles vías para llevar a cabo dicho escalamiento, tomando en cuenta que para lavar toneladas de suelo es necesario excavar dichas toneladas, transportarlas y lavarlas, quizá mas de una sola vez, en varios tanques, tomando en cuenta la reutilización y tratamiento del agua residual generada.

### 7.14.1 Número de potencia

De manera análoga con una bomba, la potencia empleada por un impulsor depende del bombeo volumétrico efectivo y la cabeza que este desarrolla:

$$P = Q_p \cdot \Delta H \quad \text{Ec. (5)}$$

para cualquier geometría de impulsor se tiene:

$$P = N_Q \cdot N \cdot D^3 \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde  $N_Q$  es el número de potencia. Este número guarda una relación con el número de Reynolds. La forma de las curvas individualmente es representativa de otros impulsores abiertos donde el número de potencia es constante para una geometría dada en régimen turbulento y decrece con incremento de la relación  $D/T$ . De modo que para régimen turbulento se tiene la expresión:

$$P = N_Q \cdot N \cdot D^3 \cdot \rho \cdot \Delta \cdot H \quad \text{Ec. (7)}$$

La cabeza de potencia desarrollada por el impulsor depende del corte y la disipación ocasionada por la turbulencia y es análogo a la pérdida por la fricción de las paredes en un flujo dentro de un ducto.

El número adimensional de mezclado conocido como número de potencia ( $Po$ ), resulta de la integración de las contribuciones de la resistencia de fricción de las paredes y del fondo del tanque cilíndrico y la resistencia de forma de las placas deflectoras radiales que nos da como resultado la potencia suministrada por el impulsor.

Haciendo un análisis dimensional y tomando en cuenta el diámetro del impulsor, su velocidad de giro y la densidad de la solución se tiene la expresión de número de potencia:

$$Po = \frac{P}{\rho \cdot N^3 \cdot D^5} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde

- $Po$  = Numero de potencia adimensional
- $P$  = Potencia del impulsor
- $\rho$  = Densidad de la solución
- $N$  = Velocidad de agitación
- $D$  = Diámetro del impulsor

pleando la siguiente gráfica (figura 7.47) se puede escalar las dimensiones del tanque y del impulsor, según la potencia desarrollada en función del número de Reynolds. (Uhl y Van Essen, 1986)

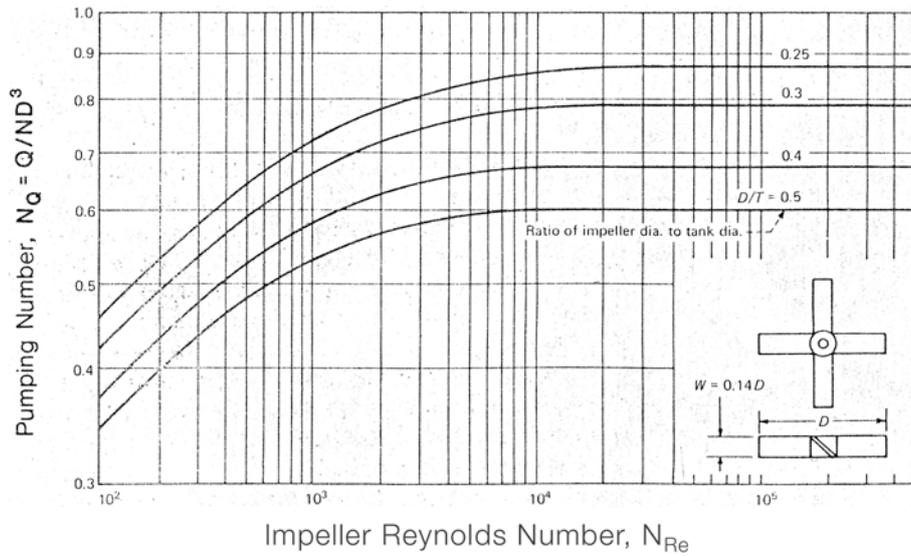


Fig. 7.47. Diagrama de Reynolds vs Numero de potencia ( $Po$ )

Así mismo, es posible llevar a cabo el escalamiento si se obtiene la cantidad de energía empleada en el lavado por litro, ya sea que esta dependa de la cantidad de suelo empleado en el lavado o de la velocidad de agitación. Así se tienen las siguientes relaciones de energía consumida para los 600 ml. de solución de lavado, presentados en las tablas 7.8, 7.9 y 7.10.

Tabla 7.8: Lavado a una misma velocidad

R100			
Suelo	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
10%	77.85	129.75	12.01
20%	97.95	163.25	15.12
30%	119.25	198.75	18.40
40%	121.075	201.79	18.68
A100			
Suelo	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
10%	79.2	132.00	12.22
20%	85.2	142.00	13.15
30%	95.1	158.50	14.68
40%	86.7	144.50	13.38
A200			
Suelo	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
10%	22.8	38.00	3.52
20%	22.65	37.75	3.50
30%	38.55	64.25	5.95
40%	58.35	97.25	9.00

Tabla 7.9: Lavado a concentración constante

R100			
Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
1200	82.65	137.75	12.75
1400	119.25	198.75	18.40
1550	159.35	265.58	24.59
1700	234.53	390.88	36.19
A100			
Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
1200	53.18	88.63	8.21
1400	66.21	110.35	10.22
1550	108.57	180.95	16.75
1700	151.02	251.70	23.31
A200			
Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
1200	22.28	37.13	3.44
1400	38.55	64.25	5.95
1550	65.19	108.65	10.06
1700	90.44	150.73	13.96

Tabla 7.10: Lavado con dos impulsores a una misma concentración

R100/R100			
Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
600	24.90	41.50	3.84
700	43.20	72.00	6.67
800	54.17	90.28	8.36
900	64.64	107.73	9.97
R100/45°			
Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
900	38.66	64.43	5.97
1200	81.41	135.68	12.56
1400	147.60	246.00	22.78
1550	193.52	322.53	29.86
R100/3PP			
Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	kJ/L	Potencia (W/L)
800	43.29	72.15	6.68
900	55.55	92.58	8.57
1200	98.57	164.28	15.21
1400	150.90	251.50	23.29

Para la toma de decisión acerca de las condiciones óptimas de lavado es necesario tener en cuenta los resultados obtenidos de cada proceso y jerarquizar de acuerdo a los requerimientos deseados, entre máxima remoción o menor consumo de energía.

Con el fin de resumir los resultados obtenidos se presenta la tabla 7.11.

*Tabla 7.11: Resultados de las experiencias de lavado*

	Suelo (%)	Energía (kJ)	Remoción (%)	Velocidad (rpm)	Energía (kJ)	Remoción (%)
R100	10	77.85	79.98	1200	82.65	71.19
	20	97.95	<b>84.93</b>	1400	119.25	72.77
	30	119.25	72.77	1550	159.35	65.59
	40	121.075	76.11	1700	234.53	66.51
A100	10	79.2	56.66	1200	53.18	61.86
	20	85.2	52.21	1400	66.21	72.2
	30	95.1	53.62	1550	108.57	72.92
	40	86.7	51.11	1700	151.02	69.45
A200	10	<b>22.8</b>	62.69	1200	<b>22.28</b>	66.77
	20	22.65	60.15	1400	38.55	57.65
	30	38.55	57.65	1550	65.19	72.39
	40	58.35	56.68	1700	90.44	<b>75.52</b>
R100/R100				600	24.90	45.02
				700	43.20	55.77
				800	54.17	59.61
				900	64.64	69.81
R100/A100				800	43.29	68.2
				900	55.55	70.26
				1200	98.57	72.04
				1400	150.90	71.87
R100/A200				900	38.66	64.53
				1200	81.41	73.68
				1400	147.60	<b>74.96</b>
				1550	193.52	74.69

En esta tabla es posible identificar los datos presentados con anterioridad que revelan que el impulsor más eficiente en cuanto a remoción es el R100 y en cuanto a energía es el A200. También la combinación de éstos en el sistema dual de impulsores, presentan el mejor aprovechamiento de energía en una remoción alta en comparación con las otras experiencias con dos impulsores. Es posible también notar que la variable que mayor

influencia tiene sobre la remoción es la geometría del impulsor y por su parte, la energía, es principalmente función de la velocidad de agitación.

## 7.15 Costos

### 7.15.1 Lavado de suelos

Anteriormente se ha estimado que el costo del lavado de suelos es aproximadamente de 140 US\$/m<sup>3</sup> o de 67 US\$/kg TPH removido. Esto coloca esta técnica por debajo del tratamiento por biopilas que es aproximadamente de 94.2 US\$/m<sup>3</sup>. (Iturbe *et al*, 2004). Cabe destacar que para el cálculo de este costo se toma en cuenta la construcción de las instalaciones de lavado, excavar el suelo, trasladarlo, el costo de los surfactantes, costo de la energía y el costo de otros procesos como el cribado y el secado. La cantidad de suelo tratado fue de 2463 Ton y 1642 m<sup>3</sup>, de los cuales 1500 m<sup>3</sup> fueron tratados en tan solo unas semanas por lavado de suelos. Es necesario aclarar que los costos anteriores están calculados para un proceso de lavado de suelos en estanques construidos *ex profeso* y con un sistema de agitación diferente. Lo más correcto para calcular el costo es tomar en cuenta los costos de instalación de un tanque agitado por medio de un impulsor de medidas y geometría determinadas, conectado a un motor con un cierto consumo de potencia. Para ello se pueden usar los valores anteriores de consumo energético por cada litro de lavado.

Considerando que se estableciera una planta de tratamiento por lavado permanente, el costo de instalación sería único y fijo para todos los casos, por lo que se amortizaría y sería menor el costo final de cada lavado. Esto es diferente para el caso de biopilas donde hay que considerar su construcción y destrucción cada vez que se va a emplear la

técnica y el costo relacionado al largo tiempo que es necesario darle seguimiento a los tratamientos.

Es importante recalcar que el consumo de energía para la agitación no es muy alto, en especial comparación con las técnicas térmicas, pues se emplea aproximadamente 12.9 Watts por litro de agua o 43.4 Watts por kilogramo de suelo lavado. Además un aspecto positivo de esta técnica reside en corto tiempo que requiere el tratamiento y en el ahorro económico que esto puede representar, sobre todo en caso de emergencia o de multas ambientales.

#### 7.15.2 Aguas residuales

Es necesario recordar que este proceso tiene un efluente de aproximadamente 3.34 litros de agua por kilogramo de suelo tratado. Tomando en cuenta los análisis del agua resultante de otros procesos de lavado por surfactantes en un tanque agitado (Climent, 2007), resulta que en ocasiones el efluente tiene una contaminación dentro de los límites permisibles por la norma (NOM-002-ECOL-1996). Sin embargo se recomienda acoplar al proceso de lavado de suelo, un sistema de tratamiento del agua para su recirculamiento dentro del mismo proceso. Actualmente, es más fácil tratar agua contaminada que suelo, debido al gran énfasis que se ha hecho en el estudio de metodologías de tratamiento. Dentro de las principales técnicas de tratamiento de aguas aplicables al caso de contaminación por hidrocarburos se tienen la coagulación-floculación, sistemas de degradación biológica y sistemas de oxidación avanzada. Adicionalmente se encuentra en la literatura, estudios sobre la biodegradabilidad de surfactantes en agua como producto de lavado de suelos (Torres *et al*, 2006), así como el tratamiento de los mismos por medio de oxidación fotocatalítica (Bandala *et al*, 2007)

y su tratamiento en conjunto con hidrocarburos en agua a través también de oxidación fotocatalítica (Bandala *et al*, 2008).

Uno de los procesos que se ha probado ser de alta eficacia en la remoción de contaminantes provenientes de un lavado de suelos por surfactantes es el de coagulación floculación que permite la completa eliminación del hidrocarburo y surfactante del agua. Con el fin de no acrecentar los costos y por su alta eficiencia en la floculación se pueden usar electrolitos inorgánicos como el sulfato de aluminio que además no requiere se modifique el pH del agua (Belloc, 2007). Este proceso contribuye con un costo adicional de 0.03USD\$/L al proceso de lavado de suelos. Para el mismo, se debe de disponer de un tanque de tratamiento con agitación moderada donde se lleva acabo la coagulación y floculación, y un tanque de sedimentación, donde se extraerán los lodos y el reajuste de pH. Estos lodos normalmente tienen que ser incinerados para poder ser dispuestos por rebasar los límites permisibles por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Finalmente el proceso completo puede redondearse a un costo de 170US\$/m<sup>3</sup> de suelo tratado.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

En principio, se determinó que el suelo de trabajo estaba seriamente contaminado con fracciones de hidrocarburo, en tanto la prueba de clasificación edafológica de granulometría indicó que se trataba de arena fina mal graduada. Dadas estas características, se consideró apropiada la técnica de remediación mediante el lavado auxiliado con tensoactivos.

El suelo fue lavado con el surfactante de tipo no iónico, nonil fenol hexa-etoxilado, conocido comercialmente como Emulgin 600 (EW 600), a una concentración de 0.5% w/v en solución acuosa, con base en lo obtenido de las pruebas de surfactante óptimo y de concentración de lavado. Con respecto a la duración del lavado, se determinó que esta sería de 180 minutos, según se deriva de la prueba de cinética de lavado.

Aplicado el procedimiento en los términos anteriormente señalados, se obtuvieron los siguientes resultados:

- 1) Se observó que la remoción de hidrocarburos alcanza un máximo en el punto del tiempo donde ya no es posible obtener más remoción del contaminante.
- 2) De acuerdo a las gráficas de potencia contra tiempo, se pueden apreciar cambios en las tendencias por emulsificación de los contaminantes en el agua. Además es importante hacer notar la distribución del gasto de energía a lo largo del proceso,

ya que se consume energía en la suspensión de sólidos, en los patrones de flujo responsables del lavado y en corrientes no deseadas en los deflectores.

- 3) El impulsor con mayor esfuerzo cortante fue el que presentó la máxima eliminación de contaminante y un elevado consumo de energía. Sin embargo no se puede generalizar a los impulsores radiales, pues el de tres paletas planas (A100) no ofreció, como tal, una ventaja en cuestión de remoción o una fuerte eficiencia en cuestión energética. El impulsor de mayor bombeo (A200) tuvo el menor consumo de energía y su remoción fue aceptable, por lo que se puede decir que para estas condiciones es eficiente. Es posible recomendar el uso de este impulsor para el lavado, sobre todo cuando se trate de suelos con bajos niveles de contaminación, donde no se requiera un gran esfuerzo de corte para obtener los valores de polución permisibles.
  
- 4) De la misma manera se tiene que la velocidad de agitación favoreció el lavado en el caso del impulsor tipo axial, no así en los de tipo radial, lo que difiere de lo esperado. Se consignó que, a velocidades muy elevadas la capacidad de corte de los impulsores radiales impide el buen contacto del surfactante con el contaminante, pues la dispersión puede ser excesiva. Con esto se concluye que es necesario favorecer el contacto, ya sea con esfuerzo cortante o con bombeo, sin provocar un exceso de turbulencia que lo imposibilite.
  
- 5) Con respecto a la energía se pudo comprobar que el gasto se incrementa en relación a la velocidad, aunque depende en gran medida, de la geometría del impulsor. Se determinó que no existe la misma relación para el aumento de

concentración de sólidos. Esto se observó dado que, para cada agitador, hay un intervalo donde es independiente de la concentración. Por tanto, el consumo de energía es intrínseco a cada sistema de lavado, en particular, de la geometría del impulsor empleado.

- 6) En la utilización del sistema de dos impulsores, se registró que no ofrece una ventaja apreciable sobre los que cuentan con tan sólo uno. En sentido contrario a lo propuesto, el porcentaje de remoción no fue significativo y, en algunos casos fue incluso menor. Por otra parte, el consumo energético resultó superior al de los sistemas con un solo impulsor, además de que se constató una inestabilidad en el mismo. Las ventajas residen principalmente en que el  $N_{js}$  es menor, por lo que se pueden emplear velocidades más bajas para llevar a cabo el lavado. No es conveniente excederse en esta variable, pues resulta contraproducente, ya que a velocidades medias es posible obtener buenos resultados de lavado y consumos de energía medios. Es preciso enfatizar que la mejor combinación se obtuvo con el impulsor de cuatro paletas inclinadas.
  
- 7) Es factible que el uso de más de un impulsor permitirá elevar el volumen de lavado, lo que no ocurre con uno sólo, pues se corre el riesgo de que su rango de acción no sea suficiente para efectuar un lavado óptimo en toda la mezcla. En este caso, como no se aumentó el volumen de lavado diseñado para un impulsor, no resultó muy conveniente el uso de dos. Empero, con base en las observaciones y los resultados se puede concluir que su eficiencia está en relación directa con las dimensiones del trabajo a realizar.

- 8) En las pruebas de *Njs* realizadas, se evidenció una notable diferencia con respecto a lo esperado por el modelo teórico. Esto demuestra la disparidad entre los modelos desarrollados con base a condiciones fijas e ideales y los fenómenos de lavado reales. Una previsión razonable es realizar las pruebas de *Njs* en una etapa previa al desarrollo de un sistema de lavado, de manera experimental. Se sugiere hacer un mayor énfasis en el desarrollo de experiencias que nos permitan elaborar un modelo más apegado a la realidad y que posea una mayor capacidad de aplicación.
- 9) Se concluye que el proceso de saneamiento del suelo aplicado es recomendable por las siguientes razones: a) En principio, tiene la ventaja de que el consumo energético es inferior en comparación al que requieren otros métodos, en especial los térmicos; b) La rapidez con la que se alcanzan resultados supera la de otras alternativas disponibles, como la biorremediación; c) Por último, un aspecto que debe de tomarse en cuenta es que puede llegar a reducir en más del 50% la presencia de contaminante, por lo que, si se acopla a otro proceso o a una secuencia del mismo, se puede optimizar el nivel de eficiencia.

## **8.2 Recomendaciones**

- 1) Con respecto a los efluentes, imprescindibles en todo proceso de lavado, se tiene que el agua contiene partículas suspendidas, hidrocarburo y surfactante, como principales contaminantes. Se propone llevar a cabo un análisis del agua que fue utilizada en el lavado, y, de ser viable, que se someta a un tratamiento, de modo que pueda ser recirculada dentro del mismo proceso con el propósito de reducir

al mínimo el uso de este insumo. El método que se propone para tratar el agua es el de floculación-coagulación, mediante el uso de agentes floculantes (electrolitos inorgánicos), lo que permitirá aprovechar la cantidad de surfactantes incorporados.

- 2) Para el uso de dos impulsores, se recomienda hacer mayores estudios con condiciones de operación tales que las relaciones de mezclado sean mayores a la unidad y haya mayor espaciamiento entre impulsores. Esto permitirá el lavado de volúmenes mayores y que no exista desperdicio de energía en la agitación cuando esté demasiado cerca un impulsor de otro.

## 9. APÉNDICES

### 9.1 ELECCIÓN DE SURFACTANTE

Tabla 9.1: Remoción por surfactante utilizado

Surfactante	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %
Agua	0.1257	4.6523	4.6090	21.29	27272.5	102.4759	102.6016	0.930
Agua de mar	0.1485	4.8754	4.8265	7.01	30767.5	104.0495	104.198	1.003
Texapon 40	0.1408	4.7022	4.6574	11.83	30231.5	112.1122	112.253	0.953
Maranil	0.0951	4.7119	4.6748	40.45	20343.0	102.5534	102.6485	0.787
Surfacpol 203	0.1044	4.9748	4.9273	34.63	21188.2	110.2864	110.3908	0.956
Surfacpol G	0.1054	4.5208	4.4792	34.00	23530.9	101.0807	101.1861	0.920
SDS	0.0833	4.7628	4.7214	47.84	17642.9	104.0038	104.0871	0.868
TW 20	0.1224	4.7092	4.6707	23.36	26205.7	118.7314	118.8538	0.817
TW 80	0.1152	5.5417	5.4940	27.86	20968.5	108.9632	109.0784	0.862
Brij 35	0.0776	4.7453	4.7122	51.41	16468.1	109.0677	109.1453	0.699
TW 60	0.1174	4.8161	4.7665	26.49	24630.1	102.3624	102.4798	1.030
Emulgin 1000	0.0835	4.8102	4.7789	47.71	17472.8	102.4509	102.5344	0.651
EW 600	0.0745	3.2224	3.1978	53.35	23297.5	102.3415	102.416	0.764
Polafix CAPB	0.1219	4.6814	4.6403	23.67	26270.0	103.1312	103.2531	0.879
EW 600 1.0	0.0953	4.8238	4.7819	40.33	19929.3	108.6233	108.7186	0.868
EW 600 0.5	0.0745	3.2224	3.1931	53.35	23331.5	102.3415	102.416	0.909
EW 600 0.25	0.1074	4.9058	4.8561	32.75	22116.4	110.009	110.1164	1.013
Suelo	0.1597	5.0353	4.9902	0.00	32003.0	102.584	102.7437	0.897

### 9.2 CINÉTICAS DE LAVADO

Tabla 9.2: Cinéticas de lavado

Rushton			3 paletas planas			4 Paletas inclinadas		
Velocidad	1400 RPM		Velocidad	1400 RPM		Velocidad	1400 RPM	
Altura	1D		Altura	3/5 D		Altura	1D	
Muestra	Tiempo	Absorbancia	Muestra	Tiempo	Absorbancia	Muestra	Tiempo	Absorbancia
1	3	0.065	1	3	0.0325	1	5	0.0525
2	5	0.101	2	9	0.086	2	10	0.1165
3	10	0.211	3	12	0.117	3	15	0.163
4	20	0.265	4	15	0.121	4	20	0.175
5	30	0.34	5	18	0.143	5	30	0.208
6	40	0.412	6	21	0.136	6	40	0.241
7	50	0.51	7	24	0.15	7	50	0.38
8	60	0.61	8	27	0.179	8	60	0.39
9	70	0.612	9	30	0.178	9	70	0.46
10	80	0.752	10	35	0.193	10	80	0.43
11	90	0.78	11	40	0.21	11	90	0.444
12	100	0.812	12	45	0.231	12	100	0.508
13	110	0.93	13	50	0.27	13	110	0.552
14	120	0.92	14	65	0.295	14	120	0.51
15	130	0.95	15	80	0.348	15	130	0.52
16	140	1.12	16	95	0.396	16	140	0.542
17	150	1.115	17	110	0.418	17	150	0.58
18	160	1.13	18	125	0.418	18	160	0.56
19	170	1.13	19	140	0.458	19	170	0.546
20	180	1.11	20	155	0.458	20	180	0.584
21	190	1.13	21	170	0.452	21	190	0.604
22	200	1.21	22	185	0.474	22	200	0.6
23	210	1.2	23	200	0.466	23	210	0.62
24	220	1.14	24	215	0.444	24	220	0.58
			25	230	0.44	25	230	0.574
			26	245	0.46			

### 9.3 DETERMINACIÓN DE TPH DE PRUEBAS DE LAVADO

Variando la concentración de suelo

Tabla 9.3.1: Concentración de TPH variando la concentración de suelo

R100									
Suelo	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Energia (KJ)
10%	0.0320	5.0076	4.9938	79.98	6407.9239	108.9330	108.9650	0.275	77.85
20%	0.0242	5.0339	5.0189	84.93	4821.8163	108.5953	108.6195	0.299	97.95
30%	0.0444	5.1109	5.0941	72.77	8715.8862	104.1646	104.2090	0.328	119.25
40%	0.0304	5.0188	4.9989	81.00	6081.3335	105.7115	105.7419	0.396	
40%	0.0401	5.0684	5.0497	75.19	7941.1208	92.3417	92.3818	0.370	
40%	0.0448	5.0441	5.0253	72.14	8914.9422	137.2018	137.2466	0.373	
Promedio		5.0438	5.0246	76.11				0.380	121.075
A100									
Suelo	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Energia (KJ)
10%	0.0705	5.1162	5.0834	56.66	13868.5814	118.7497	118.8202	0.640	79.2
20%	0.0762	5.0032	4.9826	52.21	15293.0786	110.5271	110.6033	0.411	85.2
30%	0.0739	5.0007	4.9793	53.62	14841.5327	92.5966	92.6705	0.429	95.1
40%	0.0787	5.0499	5.0304	51.11	15644.7303	137.3887	137.4674	0.385	86.7
A200									
Suelo	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Energia (KJ)
10%	0.0599	5.0332	5.0169	62.69	11939.6524	92.4326	92.4925	0.324	22.8
20%	0.0636	5.0044	4.9872	60.15	12752.6217	118.7167	118.7803	0.344	22.65
30%	0.0676	5.0062	4.9882	57.65	13551.9180	110.3515	110.4191	0.359	38.55
40%	0.0697	5.0469	5.0274	56.68	13863.9066	137.2264	137.2961	0.386	58.35

Variando la velocidad de agitación

Tabla 9.3.2: Concentración de TPH variando la velocidad de agitación

R100										
Velocidad	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Reynolds	Energia (KJ)
1200RPM	0.0460	5.0068	4.9894	71.19	9219.6081	118.7650	118.8110	0.348	2000.0	82.65
1400RPM	0.0444	5.1109	5.0941	72.77	8715.8862	104.1646	104.2090	0.3	2333.3	119.25
1550RPM	0.0553	5.0399	5.0217	65.59	11012.1465	110.3432	110.3985	0.361	2583.3	159.35
1700RPM	0.0537	5.0270	5.0099	66.51	10718.8172	92.2698	92.3235	0.341	2833.3	234.53
A100										
Velocidad	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Reynolds	Energia (KJ)
1200RPM	0.0612	5.0323	5.0142	61.86	12205.2157	137.1999	137.2611	0.359	2000.0	53.175
1400RPM	0.0507	5.8898	5.8646	72.20	8898.3882	104.1125	104.1632	0.429	2333.3	66.21
1550RPM	0.0436	5.0489	5.0300	72.92	8667.9237	109.0207	109.0643	0.374	2583.3	108.57
1700RPM	0.0490	5.0302	5.0111	69.45	9778.3172	104.1002	104.1492	0.380	2833.3	151.02
A 200										
Velocidad	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Reynolds	Energia (KJ)
1200RPM	0.0546	5.1559	5.1341	66.77	10634.6930	118.7562	118.8108	0.422	2000.0	22.275
1400RPM	0.0676	5.0062	4.9882	57.65	13551.9180	110.3515	110.4191	0.359	2333.3	38.55
1550RPM	0.0461	5.2376	5.2165	72.39	8837.2936	137.1791	137.2252	0.402	2583.3	65.19
1700RPM	0.0401	5.1388	5.1189	75.52	7833.6483	105.6580	105.6981	0.386	2833.3	90.435
R100/R100										
Velocidad	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Reynolds	Energia (KJ)
600RPM	0.0979	5.6050	5.5636	45.02	17596.5495	108.9659	109.0638	0.739	1000.0	24.9
700RPM	0.0782	5.5531	5.5252	55.77	14153.3690	104.0526	104.1308	0.503	1166.7	43.2
800RPM	0.0683	5.3038	5.2839	59.61	12926.0062	105.6529	105.7212	0.375	1333.3	54.165
900RPM	0.0574	5.9650	5.9405	69.81	9662.4561	108.9547	109.0121	0.410	1500.0	64.635
R100/A200										
Velocidad	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Reynolds	Energia (KJ)
900RPM	0.0572	5.0633	5.0387	64.53	11352.1734	103.0553	103.1125	0.486	1500.0	38.655
1200RPM	0.0443	5.2807	5.2586	73.68	8424.2517	104.1119	104.1562	0.418	2000.0	81.405
1400RPM	0.0431	5.3998	5.3783	74.96	8013.6634	105.7268	105.7699	0.398	2333.3	147.6
1550RPM	0.0457	5.6654	5.6421	74.69	8099.8202	101.0481	101.0938	0.411	2583.3	193.515
R100/A100										
Velocidad	Masa removida (gr)	Masa inicial (gr)	Masa inicial base seca (gr)	% Remocion	Concentracion (ppm)	Masa inicial	Masa final (gr)	Humedad %	Reynolds	Energia (KJ)
800RPM	0.0525	5.1829	5.1590	68.20	10176.3962	101.0370	101.0895	0.461	1333.3	43.29
900RPM	0.0502	5.3021	5.2737	70.26	9518.9024	108.8904	108.9406	0.535	1500.0	55.545
1200RPM	0.0472	5.2978	5.2758	72.04	8946.5410	103.0452	103.0924	0.416	2000.0	98.565
1400RPM	0.0468	5.2214	5.1986	71.87	9002.4965	108.9133	108.9601	0.437	2333.3	150.9

Tabla 9.3.3: Valores del número de Reynolds

Reynolds		
Parámetro	Valor	Unidades
Viscosidad	0.1	kg/m*s
Densidad	1000	Kg/m <sup>3</sup>
Diametro (T)	0.1	m

#### 9.4 PRUEBAS DE LAVADO VARIANDO LA CONCENTRACIÓN DEL SUELO

Ruston

Tabla 9.4.1: Pruebas de lavado variando la concentración de suelo para Rushton

Tiempo (s)	10% Suelo		20% Suelo		30% Suelo	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)	Potencia (W)	Torque (Ncm)	Potencia (W)	Torque (Ncm)
0	8	10	9	11	11	12
300	7	10	8	10	10	11
600	7	10	8	10	12	13
1200	7	10	8	10	12	12
1800	7	10	10	11	12	12
2400	7	10	10	11	12	12
3000	6	9	10	11	12	12
3600	7	10	10	11	12	12
4200	7	10	9	11	12	12
4800	7	10	9	11	12	12
5400	7	10	9	11	11	12
6000	7	10	9	11	11	12
6600	7	10	9	11	11	11
7200	7	10	9	11	10	11
7800	7	10	9	11	10	11
8400	8	10	9	11	10	11
9000	8	10	9	11	10	11
9600	8	10	9	10	10	11
10200	8	10	9	11	10	11
10800	8	10	8	10	10	11

Tabla 9.4.2: Error experimental y varianza

Tiempo (s)	40% Suelo		40% Suelo		40% Suelo		40%		Desviacion			
	Potencia (W)	Torque (Ncm)	Potencia (W)	Torque (Ncm)	Potencia (W)	Torque (Ncm)	Promedio	1	2	3	Promedio	Porcentaje
0	11	12	10	11	10	12	10.3	0.333	0.333	0.667	0.444	4.30
300	10	12	9	11	11	12	10.0	1.000	1.000	0.000	0.667	6.67
600	10	11	10.5	11.5	13	13	11.2	0.667	1.833	1.167	1.222	10.95
1200	11	13	10.81	11	12	13	11.3	0.460	0.730	0.270	0.487	4.32
1800	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
2400	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
3000	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
3600	11	13	11	13	11.5	13	11.2	0.167	0.333	0.167	0.222	1.99
4200	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
4800	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
5400	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
6000	11	13	11	13	11.5	13	11.2	0.167	0.333	0.167	0.222	1.99
6600	11	13	11	13	11.5	13	11.2	0.167	0.333	0.167	0.222	1.99
7200	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
7800	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
8400	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
9000	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
9600	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
10200	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92
10800	11	13	11	13	12	13	11.3	0.333	0.667	0.333	0.444	3.92

Tres paletas planas

Tabla 9.4.3: Pruebas de lavado variando la concentración de suelo para 3 paletas planas

Tiempo (s)	10% Suelo		20% Suelo		30 % Suelo		40 % Suelo	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	6	10	8	10	8.5	10	8	10
300	7.5	10	8	10	10	10	9	10
600	7	9.5	8	10	9.5	10	8	10
1200	6.5	9.5	8	10	9	10	8	10
1800	6.5	9.5	8	10	9	10	8	10
2400	6.5	10	7.5	10	9	10	8	10
3000	7	10	7.5	10	9	10	8	10
3600	7	10	7.5	10	9	10	8	10
4200	7	10	7.5	10	9	10	8	10
4800	7	10	8	10	9	10	8	10
5400	7	10	8	10	9	10	8	10
6000	7.5	10	8	10	8.5	10	8	10
6600	7.5	10	8	10	8.5	10	8	10
7200	8	10	8	10	8.5	10	8	10
7800	8	10	8	10	8.5	10	8	10
8400	8	10	8	10	8.5	10	8	10
9000	8	10	8	10	8.5	10	8	10
9600	8	10	8	10	8.5	10	8	10
10200	8	10	8	10	8.5	10	8	10
10800	8	10	8	10	8.5	10	8	10

Cuatro paletas inclinadas

Tabla 9.4.4: Pruebas de lavado variando la concentración de suelo para 4 paletas inclinadas

Tiempo (s)	10% Suelo		20% Suelo		30% Suelo		40% Suelo	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	4	9	4	9	5	8	6	9
300	3.5	8	3	8	5	9	6	9
600	3	8	3	8	4	8	6	9
1200	2	8	2	8	4	8	5.5	9
1800	2	8	2	8	3.5	8	5	8
2400	2	8	2	8	3	8	5	8
3000	2	8	2	8	3	8	5	8
3600	2	8	2	8	3	8	5	8
4200	2	8	2	8	3	8	5	8
4800	2	8	2	8	3	8	5	9.5
5400	2	8	2	8	3	8	6	9
6000	2	8	2	8	3.5	8	5.5	9.5
6600	2	8	2	8	3	8	5.5	9
7200	2	8	2	8	3.5	8	5.5	9
7800	2	8	2	8	4	8	5.5	9
8400	2	8	2	8	4	8	5.5	9.5
9000	2	8	2	8	4	8	5.5	9.5
9600	2	8	2	8	4	8	5.5	9.5
10200	2	8	2	8	4	8	5.5	9.5
10800	2	8	2	8	4	8	5.5	9.5

9.5 PRUEBAS DE LAVADO VARIANDO LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN

Ruston

Tabla 9.5.1: Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton

Tiempo (s)	1200 RPM		1400 RPM		1550 RPM		1700 RPM	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	7	10	11	12	13	14	19	14
120	7	10	11	12	14	14	24.5	17
300	9	11	10	11	16	12	24	17
600	9	11	12	13	15.5	14.5	23	16
1200	8	11	12	12	15	14	22	16
1800	8	11	12	12	15	14	21.5	16
2400	7.5	10	12	12	14.5	14	21	16
3000	7.5	10	12	12	14.5	14	21.5	16
3600	7.5	10	12	12	14.5	14	21.5	16
4200	7.5	10	12	12	15	14	22	16
4800	7.5	10	12	12	15	14	22	16
5400	7.5	10	11	12	15.5	15	22	16
6000	7.5	10	11	12	15	14	22	16
6600	7.5	10	11	11	14.5	14	21.5	16
7200	7.5	10	10	11	14.5	14	22	16
7800	7.5	10	10	11	14.5	14	21.5	16
8400	7.5	10	10	11	14.5	14	21.5	16
9000	7.5	10	10	11	14.5	14	21.5	16
9600	7.5	10	10	11	14.5	14	21	16
10200	7.5	10	10	11	14.5	14	21	16
10800	7.5	10	10	11	14.5	14	21	16

Tres paletas planas

*Tabla 9.5.2 Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para 3 paletas planas*

Tiempo (s)	1200 RPM		1400RPM		1500RPM		1700RPM	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	5	9	6	10	8	11	12	11
120	5.5	9	6	10	11	12	16.5	13.5
300	5	9	7.5	11	11	12	15	13
600	5	8	7	11	10	12	14.5	13
1200	5	8	7	11	10.5	12	14	13.5
1800	5	8	6	10	10	12	14	12
2400	5	8	6	10	10	12	14	12
3000	5	8	6	10	10	12	13.5	12
3600	5	8	6	10	10	12	14	12
4200	4.5	8	6	10	10	12	13.5	12
4800	5	8	6	10	10	12	14	12
5400	5	8	6	10	10	12	13.5	12
6000	4.5	8	6	10	10	12	14	12
6600	5	8	6	10	10	12	14	12
7200	5	8	6	10	10	12	14	12
7800	4.5	8	6	10	10	12	14	12
8400	5	8	6	10	10	12	14	12
9000	5	8	6	10	10	12	14	12
9600	5	8	6	10	10	12	14	12
10200	5	8	6	10	10	12	14	12
10800	5	8	6	10	10	12	14	12

Cuatro paletas inclinadas

*Tabla 9.5.3 Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para 4 paletas inclinadas*

Tiempo (s)	1200RPM		1400 RPM		1550 RPM		1700 RPM	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	3	7.5	5	8	6	8	8.5	10
120	3	7	5	8	7	9	10	10
300	3	7	5	9	7	9	10	10
600	2.5	7	4	8	6	9	9.5	10
1200	2	7	4	8	6	9	8.5	10
1800	2	7	3.5	8	6	9	8.5	10
2400	2	7	3	8	6	9	8.5	10
3000	2	7	3	8	6	8	8.5	10
3600	2	7	3	8	6	8	8	10
4200	2	7	3	8	6	8	8	10
4800	2	7	3	8	6	8	8	10
5400	2	7	3	8	6	8	8	10
6000	2	7	3.5	8	6	8	8	10
6600	2	7	3	8	6	8	8	10
7200	2	7	3.5	8	6	8.5	8	10
7800	2	7	4	8	6	9	8	10
8400	2	7	4	8	6	9	8.5	10
9000	2	7	4	8	6	9	8.5	10
9600	2	7	4	8	6	9	8.5	10
10200	2	7	4	8	6	9	8.5	10
10800	2	7	4	8	6	9	8.5	10

## 9.6 PRUEBAS DE LAVADO VARIANDO LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN CON DOS IMPULSORES

Rushton / Rushton

*Tabla 9.6.1: Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton/Rushton*

Tiempo (s)	600 RPM		700 RPM		800 RPM		900 RPM	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	2.5	6	4	7	6	8	5.5	10
180	2.5	6	4	7	5.5	8	7	9
300	2.5	6	4	7	5	8	6.5	9
600	2.5	6	4	7	5	8	6.5	9
1200	2.5	6	4	7	5	8	6	9
1800	2.5	6	4	7	5	7.5	5.5	8
2400	2	6	4	7	5	7.5	5.5	8
3000	2.5	6	4	7	5	7	6	8
3600	2	6	4	7	5	7	6	8
4200	2.5	6	4	7	5	7	6	8
4800	2.5	6	4	7	5	7	6	8
5400	2	6	4	7	5	7.5	6	8.5
6000	2	6	4	7	5	7.5	6	8.5
6600	2	6	4	7	5	7.5	6	8
7200	2.5	5	4	7	5	7	6	8.5
7800	2	6	4	7	5	7	6	9
8400	2	6	4	7	5	7	6	9
9000	2.5	6	4	7	5	7	6	9
9600	2.5	6	4	7	5	7	6	9
10200	2.5	6	4	7	5	7	6	9
10800	2.5	6	4	7	5	7	6	9

Rushton / Cuatro paletas inclinadas

*Tabla 9.6.2 Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton/4 paletas inclinadas*

Tiempo (s)	900 RPM		1200 RPM		1400 RPM		1550 RPM	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
0	4	8	7.5	10	12	13	18.5	16
180	3.5	8	8	11	14	13	20	17
300	4.5	8	8	11	14.5	13	20	16
600	3.5	8	8	11	13.5	13	19	16
1200	3.5	8	7.5	10	13.5	13	18	16
1800	3.5	7.5	7.5	10	13	13	17.5	15.5
2400	3.5	7	7.5	10	13	13	17	15
3000	3.5	7	7.5	10	13	13	17	15
3600	3.5	7	7.5	10	13	13	17	16
4200	3.5	7.5	7.5	10	13	13	18	16
4800	3.5	8	7.5	10	13.5	13	18	16
5400	3.5	8	7.5	10.5	13.5	13	18	16
6000	3.5	8	7.5	10.5	13.5	13	18	16
6600	3.5	8	7.5	10.5	14	14	18	16
7200	3.5	8	7.5	10.5	14.5	13.5	18	16
7800	3.5	8	7.5	10.5	14.5	14	18	16
8400	4	8	7.5	10.5	14.5	14	18	16
9000	4	8	7.5	10.5	14	14	18	15.5
9600	3.5	8	7.5	10.5	14	14	18	15.5
10200	3.5	8	7.5	10.5	14	14	18	15.5
10800	3.5	8	7.5	10.5	14	14	18	15.5

Rushton / Tres paletas planas

*Tabla 9.6.3 Pruebas de lavado variando la velocidad de agitación para Rushton/3 paletas planas*

Tiempo (s)	900 RPM		800 RPM		1200 RPM		1400 RPM	
	Potencia (W)	Torque (Ncm)						
960	6	8	5	7	8.5	10	12	13
1020	5.5	8	4	7	10	11	15	14
960	5.5	8	4	7	10	11	14.5	14
960	5.5	8	4	7	10	11	14.5	14
960	5.5	8	4	7	9.5	11	14	13
930	5.5	8	4	7	9	11	14	13
900	5.5	8	4	7	9	11	14	13
900	4.5	8	4	7	9	11	13.5	13
960	4.5	8	4	7	9	11	14	13
960	4.5	8	4	7	9	11	14	13
960	4.5	8	4	7	9	11	14	13
960	5.5	8	4	7	9	11	13.5	13
960	5.5	8	4	7	9	11	14	13
960	5.5	8	4	7	9	11	14	13
960	5.5	8	4	7	9	11	14	13
960	5.5	8	4	7	9	11	14	13
960	5.5	8	4	7	9	11	14	13
930	5.5	8	4	7	9	11	14	13
930	4.5	8	4	7	9	11	14	13
930	4.5	8	4	7	9.5	11	14	13
930	4.5	8	4	7	9	11	14	13

## 10. REFERENCIAS

Armenante M. y Uehara N. (1998) (A) *Effect of low off-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete suspension of solids in stirred tanks*. Chemical Engineering Science. 53: 1757-1775

Armenante M., Uehara E. y Susanto J. (1998) (B) *Determination of correlations to predict the Minimum Agitation Speed for Complete Solid Suspension in Agitated Vessels*. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 76 : 413-419

Bandala E., Pleáez M., Salgado M. y Torres L. (2007) *Degradation of sodium dodecyl sulphate in water using solar driven Fenton-like advanced oxidation processes*, Journal of Hazardous Materials, 10:1-4

Bandala E., Velasco Y. y Torres L. (2008) *Decontamination of soil washing wastewater using solar driven advanced oxidation processes*, Journal of Hazardous Materials, 16:1-6.

Bakker A., Fasano J. y Myers K., (1998) *Effects of flow Pattern on the solids Distribution in a Stirred Tank*, The On Line CFM Book.

Belloc C., (2007) *Tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado de suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo, México*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

Bird R.B., Stewart W.E. y Lightfoot E. N., (2003) *Fenómenos de transporte*, Editorial Reverté S.A., México.

Boon L., Hoeks F., van der Lans R., Bujalski W., M.Om Wolff y Nienow A. (2001) *Comparing a range of impellers for "stirring as foam disruption"*, The Journal of Biochemical Engineering, 10: 183-195.

Climent M. (2007) *Estudio de mezclado en el lavado de suelos contaminados por hidrocarburos*, México, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

Doroteo E. (2008) *Efecto de algunas variables sobre el consumo de potencia y la eficiencia de lavado de un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo*, México, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM.

Duran A. (2006) *Ingeniería Ambiental, Material didáctico*, Facultad de Química, UNAM, México, D.F.

Èrcoli E., Fuentes B. J., Gilobert M., Galvez J. y Arreghini M. (1995). *Tratamiento biológico de lodos de refinería. Segundo simposio de producción de hidrocarburos*. Tomo1, pp.497-506. Instituto del Petróleo. Mendoza, Argentina

Fernández L. C. (2004) *Atenuación natural de sitios contaminados con hidrocarburos*, Reporte final IMP/PBP/PIMAS/D.00023

Iturbe R, Flores C., Chavez C., Bautista G. y Torres L. (2004) *Remediation of Contaminated Soil using Soil Washing and biopile Methilologies at Field Level*, J Soils & Sediments (OnlineFirst)

Leharne Steve, Comunicación personal, Universidad de Greenwich Medway, Instituto de Ingeniería UNAM, Septiembre 14, 2008

Leyva D. (2006) *Comparación de técnicas de saneamiento en su suelo contaminado por hidrocarburos del petróleo de Tabasco*, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM.

López J. (2004) *Cambios Físicos, Químicos y Biológicos en un suelo contaminado con hidrocarburos debido al senado con la técnica de lavado de suelos*, México, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Luthy G., Aiken G., Brusseau M., Cunningham S., Gschwend P., Pignatello J., Reinhard M., Traina S., Weber W. y Westall J. (1997) *Sequestration of Hydrophobic Organic Contaminants by Geosorbents*. Environmental Science & Technology. 31:3341-3347.

Madrigal I. (1998) *Alternativas de tratamiento para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos en México*, México, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

Norma Mexicana, NMX-AA-134-SCFI-2006. (2006) Suelos- Hidrocarburos fracción pesada extracción y gravimetría.

Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-1996. (1996) Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana, NOM-002-SEMARNAT-1996. (1998) Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SEMARNAT-1997. (1998) Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002. (2003) Protección Ambiental, Lodos y Biosólidos Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Norma Oficial Mexicana, NOM-115-SEMARNAT-2003. (2003) Que establece las especificaciones de protección ambiental que deben observarse en las actividades de perforación y mantenimiento de pozos petroleros terrestres para la exploración y producción en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales.

Norma Oficial Mexicana, NOM-116-SEMARNAT-2003. (2003) Que establece las especificaciones de protección ambiental para prospecciones sismológicas terrestres que se realicen en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.

Norma Oficial Mexicana, NOM- 117-SEMARNAT-1998. (1998) Que establece las especificaciones de protección ambiental para la instalación y mantenimiento mayor de los sistemas para el transporte y distribución de hidrocarburos y petroquímica en estado líquido y gaseoso, que se realicen derechos de vía terrestres existentes, ubicados en zonas agrícolas, ganaderas y eriales.

Norma Oficial Mexicana, NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. (2003) Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.

Norma Oficial Mexicana, NOM-141-SEMARNAT-2003. (2003) Que establece los requisitos para la caracterización del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.

Norma Oficial Mexicana, NOM-143-SEMARNAT-2003. (2003) Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos.

Öscan-Taskin G. y Hongyuan W. (2002, *The effect of impeller-to-tank diameter ratio on the rate of settling of solids*, *Chemical Engineering Science*, 58: 2011-2022

Quadri G. 1994. *Industria y Política Ambiental*. El Nacional. Sábado 18 de Junio. México

PEMEX (2006) Petróleos de México, disponible en [www.desarrollosustentable.pemex.com](http://www.desarrollosustentable.pemex.com), fecha de consulta: 14 de abril de 2008.

Salager JL. (2002) *Surfactantes Tipos y Usos*, *Facultad de Ingeniería*, Universidad de los Andes. Venezuela.

Sánchez A. Martínez A., Torres L. y Galindo E. (1992), *Power Consumption of the Three Impeller Combinations in Mixing Xanthan Fermentation Broths*, *Process Biochemistry*, 27: 351-365

Saval, B. S. (1995) *Acciones para la Remediación de Suelos en México. Segundo Minisimposio Internacional sobre Contaminantes del Agua y Suelo*. Instituto de Ingeniería. UNAM.

Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental, Marzo 2006, México

Shin-ichi, K.; Motoda, Mitsunori, Takahashi Koji e Horiguchi Hiro (2007) *The Influence of the Bottom Shape of an Agitated Vessel Stirred by Dual Impellers on the Distribution of Solid Concentration*, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 40 (8): 617-621.

Torres L., Orantes L. e Iturbe R. (2003) *Critical micellar concentrations for three surfactants and their diesel-removal efficiencies in petroleum-contaminated soils*, Journal of Environmental Geosciences, 10(1):28-36

Torres L., Orantes L. e Iturbe R. (2006) *Biodegradation of two Non-Ionic Surfactants Used for In Situ Flushing of Oil-Contaminated Soils*, Journal of Environmental Chemistry, 43(5): 251-255

Torres L., Aguirre A., Verdejo A. e Iturbe R., *Enhanced Soil-washing for soils which are highly contaminated with crude oil*. WIT Transactions on Ecology and Environment, 81: 541-550

Torres L. y Zamora E., (2002) *Preparation and power consumption of surfactant-fuel oil-water emulsions using axial, radial, and mixed flow impellers*, Elsevier Science, pp. 2289-2302

Uhl V. y Von Essen J. (1986) *Scale-Up of Equipment for Agitating Liquids*, Mixing Theory and Practice, 3: 199-264

Urum K., Grigson S., Pekdemir T. y McMenamy S. (2005) *A comparison of the efficiency of different surfactants for removal of crude oil from contaminated soils*, Chemosphere, 62: 1403-1410.

Van Deuren J., Lloyd T., Chhetry S. Liou R y Peck J. (2002) *Remediation Technologies screening matrix and reference guide*, 4<sup>o</sup> ed.

Verma S. y Kumar V. (1998) *Relationship between Oil-Water Interfacial Tension and Oily Soil Removal in Mixed Surfactant Systems*, Journal of Colloid and Interface Science, 207:1-10

Volke S. y Velasco T. (2002) *Tecnologías de remediación de suelos contaminados*. México, INE-SEMARNAT.

Wilson D. y Clarke A. (1994) *Hazardous waste site. Soil Remediation Theory and application of innovative technologies*, Marcel Dekker, New York, pp 497-547

Xinghui Xia, Li Lin y Jialin Xu (2000) *Mixed surfactant washing of petroleum contaminants from soils sediments in the unsaturated zone*, Journal of Environmental Sciences, 12(1):108-114.

Yongfu, H. y Takahashi K. (1995) *Particle impeller impact for a six bladed 45° pitched turbine in an agitated vessel*, Journal of Chemical Engineering of Japan, 28 (6): 786-789