



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFFECTO DE ALGUNAS VARIABLES SOBRE EL CONSUMO DE POTENCIA
Y LA EFICIENCIA DE LAVADO DE UN SUELO CONTAMINADO
POR HIDROCARBUROS DE PETRÓLEO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

EDGAR SALVADOR DOROTEO REYES



MÉXICO, DF.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



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	Rodolfo Torres Barrera.
Vocal	Víctor Manuel Luna Pabello.
Secretario	Luis Gilberto Torres Bustillos.
1er Suplente	Alfonso Duran Moreno.
2do Suplente	Jose Agustín Garcia Reynoso.

Universidad Nacional Autónoma de México.

Instituto de Ingeniería.

Coordinación de Ingeniería Ambiental.



Asesor.

Luis Gilberto Torres Bustillos.



Sustentante.

Edgar Salvador Doroteo Reyes.

Dedicatoria

A mis Padres, Salvador y Aurelia por su apoyo incondicional en mi formación.

A mi hermana Ingrid por su impulso y apoyo.

Agradecimientos.

A mi Universidad Nacional Autónoma de México por darme las herramientas para enfrentar la realidad.

Al Dr. Luis Torres por su dirección y valiosos comentarios.

A la Dra. Rosario Iturbe Argüelles por sus comentarios y apoyo.

A mis amigos Andres, Erick y Adriana por sus consejos.

Al Instituto de Ingeniería por brindarme el apoyo para llevar acabo la experimentación.

A todos los miembros del jurado por el tiempo invertido en la revisión y por sus comentarios a la tesis.

La habilidad es lo que permite hacer ciertas cosas.

La motivación determina lo que se hace.

La actitud cuán bien se hace.

ÍNDICE

Apartado	Página.
Índice	II
Índice de figuras, graficas y tablas	V
1.- Introducción	1
2.- Marco Teórico	4
2.1.- Mezclado	4
2.1.1.- Definición de mezclado	4
2.1.2.- Elementos de un equipo de mezclado	4
2.1.3.- Tipo de Impulsores	7
2.1.4.- Efecto de deflectores	8
2.1.5.- Comportamiento de los fluidos en recipientes mezcladores	9
2.1.6.- Suspensión de sólidos	10
2.1.7.- Reducción de tamaño de partícula en dispersiones	11
2.1.8.- Números adimensionales, útiles en la operación de mezclado	11
2.1.9.- Escalamiento	12
2.2.- Suelo	14
2.2.1.- Definición de suelo	14
2.2.2. Composición del suelo	14
2.3.- Contaminación de suelos en México	17
2.3.1.- Industria petroquímica	18
2.3.2.- Industria minera	19
2.3.3.- Agroquímicos	19
2.3.4.- Estaciones de servicio	20
2.3.5.- Disposición de residuos peligrosos	20
2.4.- Remediación de suelo	21
2.4.1.- Clasificación de técnicas de remediación	21
2.4.2.- Sitios remediados y Costos.	26
2.5.- Surfactantes	27

2.5.1.- Clasificación de los surfactantes	27
2.5.2.- El dodecil benceno sulfato de sodio (SDS)	28
2.6.- Normatividad mexicana	30
2.6.1.-NOM-138-SEMARNAT/SS-2003	30
2.6.2.- NOM-ECO-002-CNA	33
3.- Objetivos	36
3.1.- Objetivo general	36
3.2.- Objetivos específicos	36
4.- Planteamiento del problema	37
5.- Hipótesis	37
6.- Materiales y métodos	39
6.1.- Material, sustancias y equipo usado en el desarrollo de este trabajo	39
6.2.- Metodología experimental	41
6.2.1.- Origen del suelo	41
6.2.2.- Caracterización del suelo	41
6.2.3.- Lavado asistido por surfactante	47
6.2.4.- Error experimental	52
7.- Resultados	55
7.1.- Granulometría del suelo	55
7.2.- Pruebas preliminares con suelo original	57
7.3.- Cinéticas de lavado	61
7.4.- Efecto de la granulometría	63
7.5.- Efecto de la concentración del suelo	67
7.6.- Efecto de la velocidad de agitación	72
7.6.1.- Determinación de potencia y torque en el sistema	73
7.7.- Determinación de humedad del suelo	86
7.8.- Determinación de remociones de lavado	87
7.9.- Repetibilidad de la medición de la remoción de hidrocarburo	89
7.10.- Energía consumida y remoción	90
7. 11.- Caracterización del agua residual	97

8.- Propuesta de tratamiento del agua residual	99
9.- Conclusiones	100
10.- Apéndice	102
11.- Referencias	128

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Objeto	Página
Tabla 1.- Elementos de un mezclador	4
Fig. 1.- Impulsores	8
Tabla 2.-Ecuaciones de similitud hidráulica y fuerzas	13
Tabla 3.- Fragmentos minerales del suelo	15
Tabla 4.- Propiedades del suelo según su composición	15
Tabla 5.- Clasificación de suelos	16
Fig. 2.- Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999	18
Tabla 6.- Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>	22
Tabla 7.- Principales ventajas y limitaciones del lavado de suelo	25
Fig. 3.- Dodecil benceno sulfato de sodio	29
Tabla 8.- CMC de algunos compuestos	30
Tabla 9.- Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante	31
Tabla 10.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo	32
Tabla 11.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo	32
Tabla 12.- Límites máximos permisibles en agua	34
Tabla 13.- Materiales usados durante el trabajo	39
Tabla 14.- Sustancias usadas durante el trabajo	40
Tabla 15.- Equipo usado durante el trabajo	41
Fig. 4.- Esquema del equipo de lavado	47
Fig. 5.- Tanque con deflectores	48
Fig. 6.- Motor digital	49
Tabla 16.- Relaciones D/T	50
Fig. 7.- Operación del equipo de mezclado	51
Fig. 8.- Distribución de peso por tamaño de partícula	55

Fig. 9.- Curva granulométrica	56
Fig. 10.- Cinética de lavado para impulsor A-310	58
Fig. 11.- Cinética de lavado para impulsor A-100	58
Fig. 12.- Cinética de lavado para impulsor R-100	59
Fig. 13.- Cinética de lavado para impulsor A-310	61
Fig. 14.- Cinética de lavado para impulsor A-100	62
Fig. 15.- Cinética de lavado para impulsor R-100	62
Fig. 16.- Granulometría (0.15-0.85mm)	64
Fig. 17.- Granulometría (0.15-3.38mm)	64
Fig. 18.- Granulometría (0.15- 3.35 mm)	65
Fig. 19.- Área bajo la curva. (0.15-2.38 mm)	66
Fig. 20.- Efecto de la granulometría del suelo sobre el consumo de potencia	67
Fig. 21.- Efecto de la concentración 10% w/w	68
Fig. 22.- Efecto de la concentración 20% w/w	69
Fig. 23.- Efecto de la concentración 30% w/w	70
Fig. 24.- Efecto de la concentración 40% w/w	70
Fig. 25.- Efecto de la concentración del suelo sobre el consumo de potencia	71
Tabla 17.- Características de impulsores	73
Fig. 26.- Impulsor A-310, velocidad de 1000 rpm	73
Fig. 27.- Impulsor A-310, velocidad de 1200 rpm	74
Fig. 28.- Impulsor A-310, velocidad de 1400 rpm	74
Fig. 29.- Impulsor A-310, velocidad de 1600 rpm	75
Fig. 30.- Impulsor A-310, velocidad de 1800 rpm	75
Fig. 31.- Impulsor A-100, velocidad de 1000 rpm	76
Fig. 32.- Impulsor A-100, velocidad de 1200 rpm	77
Fig. 33.- Impulsor A-100, velocidad de 1400 rpm	77
Fig. 34.- Impulsor A-100, velocidad de 1600 rpm	78
Fig. 35.- Impulsor A-100, velocidad de 1800 rpm	78

Fig. 36.- Impulsor R-100, velocidad de 1000 rpm	79
Fig. 37.- Impulsor R-100, velocidad de 1200 rpm	79
Fig. 38.- Impulsor R-100, velocidad de 1400 rpm	80
Fig. 39.- Impulsor R-100, velocidad de 1600 rpm	80
Fig. 40.- N_p vs N_{Re} para agua	82
Tabla 18.- Impulsores referidos a la fig. 40	83
Fig. 41.- Emulsiones combustóleo-surfactante-agua (Torres, et. al., 2002)	85
Fig. 42.- Lavado de suelo con diferentes impulsores	85
Tabla 19.- Porcentaje de humedades de suelo. (Acrónimos tabla 52)	87
Tabla 20.- HTPs antes y después del proceso de lavado. (Acrónimos tabla 52)	89
Tabla 21.- Errores porcentuales de las corridas	90
Tabla 22.- Parámetros estadísticos calculados	90
Fig. 43.- Porcentaje de remoción, Impulsor A-310	91
Fig. 44.- Porcentaje de remoción, Impulsor A-100	92
Fig. 45.- Porcentaje de remoción, Impulsor R-100	94
Fig. 46.- Consumo de energía en el lavado de suelos	95
Tabla 23.- Análisis del agua residual generada en el lavado de suelos.	97
Tabla 24.- Tabla comparativa del agua residual con la norma NOM-ECO-002-CNA	98
Tabla 25.- Granulometría y HTPs del suelo inicial	102
Tabla 26.- Potencia y torque. Efecto de la granulometría, (0.15-0.85mm)	102
Tabla 27.- Potencia y torque. Efecto de la granulometría, (0.15-2.38mm)	103
Tabla 28.- Potencia y torque. Efecto de la granulometría, (0.15-3.35mm)	104
Tabla 29.- Cinética de lavado para impulsor A-310	105
Tabla 30.- Cinética de lavado para impulsor A-100	106
Tabla 31.- Cinética de lavado para impulsor R-100	107
Tabla 32.- Potencia y Torque. Concentración del suelo 30% w/w	108

Tabla 33.- Potencia y Torque. Concentración del suelo 40% w/w	109
Tabla 34.- Potencia y Torque. Concentración del suelo 10% w/w	110
Tabla 35.- Energía consumida según el porcentaje de sólidos	110
Tabla 36.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1000 rpm	111
Tabla 37.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1200 rpm	112
Tabla 38.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1400 rpm	113
Tabla 39.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1600 rpm	114
Tabla 40.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1800 rpm	115
Tabla 41.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1000 rpm	116
Tabla 42.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1200 rpm	117
Tabla 43.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1400 rpm	118
Tabla 44.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1600 rpm	119
Tabla 45.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1800 rpm	120
Tabla 46.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1000 rpm	121
Tabla 47.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1200 rpm	122
Tabla 48.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1400 rpm	123
Tabla 49.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1600 rpm	124
Tabla 50.- Tabla de remociones y energía para diferentes impulsores	125
Tabla 51.- Potencia y Torque. Pruebas en agua para los tres impulsores	126
Tabla 52.- Acrónimos usados en la tabla 18 y 19y en las figuras 43, 44 y 45	127

1.- Introducción.

Actualmente el medio ambiente ha sufrido cambios muy importantes, esto a raíz de la interacción del hombre con la naturaleza. La contaminación del suelo, el aire y el agua son problemas ambientales que se deben atender con rapidez e inteligencia.

Parte de la contaminación que a modificado el equilibrio ecológico es la generada por la Industria Petroquímica, la cual es una actividad necesaria para la generación de combustibles y materia prima en procesos de transformación. La extracción, el transporte y la transformación son partes fundamentales en el proceso petroquímico, donde ocurren múltiples derrames, ya sea en suelo o agua, donde el impacto ambiental aunque pueden no tener efectos a corto plazo, en ocasiones son muy severos por la cantidad del contaminante y el desplazamiento de este.

Es por eso que hoy en día los derrames de hidrocarburos y demás sustancias químicas se consideran como emergencias ambientales debido al riesgo a la salud humana y a los recursos naturales.

En esta tesis el tema que se abordara es la contaminación del suelo; particularmente contaminado con hidrocarburos del petróleo en una zona de explotación petrolera Mexicana.

El suelo es denominado como heterogéneo y antropogénico, ya que es susceptible a interactuar con contaminantes tales como hidrocarburos, donde el impacto ocasionado por este agente puede ser revertido con la aplicación de técnicas de remediación.

La técnica de remediación en la que se enfocará el trabajo será la fisicoquímica, aunque existen muchas otras tales como biológica, química, etc., las cuales persiguen el mismo objetivo, disminuir la cantidad de contaminantes presentes en el suelo.

Esta técnica conocida como lavado de suelo asistido por surfactantes, busca que a partir de propiedades físicas y químicas del suelo, se pueda movilizar el contaminante a la fase acuosa y así obtener un suelo con menor concentración de hidrocarburos.

Para llevar a cabo el lavado, es necesario aplicar un mezclado, el cual es una operación unitaria que tiene la finalidad de homogeneizar una mezcla, en este caso un sólido (el suelo) con un líquido (surfactante diluido en agua).

El mezclado es una operación unitaria difícil de someter a análisis científico, pero de las más comunes y de gran importancia industrial. Las operaciones de mezclado forman parte de casi toda la industria productiva en procesos que involucren cambios físicos y químicos. En consecuencia, el mezclado es la operación central de varios procesos, como es el caso del proceso de lavado de suelos asistido por surfactantes.

2.- Marco Teórico.

2.1.- Mezclado.

2.1.1.- Definición de mezclado.

El mezclado es una de las operaciones unitarias de la ingeniería química más difíciles de someter a un análisis científico. Hasta el presente no se ha desarrollado ninguna fórmula o ecuación aplicable al cálculo de grado de la realización de una mezcla, o la velocidad con que se realiza, en determinadas condiciones. (Climent, 2007)

Puede ser definido como 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 en el caso de reacción química. (Holland, 1995)

Otra definición usada es la siguiente: homogeneización de una mezcla donde interactúan dos o más componentes, y una o más fases, las cuales aprovechando sus características físicas y químicas realizan un proceso en particular.

2.1.2.- Elementos de un equipo de mezclado.

En la tabla 1 se muestra las principales características que se deben tomar en cuenta para el diseño de un equipo de mezclado, desde las partes mecánicas hasta el comportamiento de los componentes de la mezcla heterogénea.

Tabla 1.- Elementos de un mezclador (Oldshue, 1983)

1. Diseño del Proceso	a) Fluido mecánico de los impulsores.
	b) Régimen de flujo requerido por el proceso
	c) Escalamiento: Hidráulico, similaridad.
2. Características en la potencia consumida por el impulsor.	d) Relación del impulsor vs hp, velocidad, y diámetro.
3. Diseño mecánico.	e) Impulsores.
	f) Forma del tanque.
	g) Características generadas por el motor.

Impulsor.

Es un dispositivo rotatorio que fuerza a los líquidos, gases y sólidos a moverse en cierta dirección. El movimiento provocado por él se describe mediante patrones de flujo primario y secundario. El movimiento primario es el flujo rotacional o tangencial del fluido. La mayor parte de la energía transferida del impulsor al fluido es consumida por este movimiento, aun cuando es de menor importancia en procesos relacionados con el mezclado. (Oldshue, 1983)

El movimiento secundario esta asociado a componentes axiales o radiales. En procesos de mezclado, el movimiento secundario es la parte mas importante del patrón de flujo y solo una pequeña fracción de la energía transferida al fluido está relacionada a este movimiento.

Ningún diseño de impulsor es capaz de tener un rendimiento óptimo bajo condiciones de proceso, por lo que el rendimiento del mismo proceso depende de la adecuada selección de este. (Torres, 2002)

Razón D/T.

Es la relación entre el diámetro del impulsor (D), y el diámetro del tanque (T) tiene un efecto muy significativo en el proceso, ya que esta razón tiene efectos en la turbulencia generada, es decir, en el patrón de flujo y la potencia consumida.(Climent, 2007)

Altura del impulsor respecto al fondo del tanque.

La altura del impulsor juega un papel muy importante en el proceso de mezclado ya que de esto depende la capacidad de bombeo del impulsor tanto como de la potencia consumida. La literatura muestra que la altura del impulsor con respecto al fondo del tanque debe ser un diámetro de impulsor.

La posición del impulsor es fundamental puesto que una excentricidad excesiva o demasiado pequeña en una dirección provocara remolinos erráticos y giros mayores, además de tensiones peligrosas en el eje. (Segura, 1998)

Geometría del tanque.

La geometría del tanque es importante para cualquier proceso de mezclado, según Oldshue (1983) la óptima es aquella donde el tanque es cilíndrico y vertical, ya que la energía consumida es aprovechada en mayor proporción, que utilizando cualquier otra geometría. Cabe resaltar que esto muchas veces depende del proceso y sobre todo los costos de operación que éste conlleve.

Razón z/T.

En general es aceptado que la razón ideal para la mayoría de los tanques de mezclado es en el cual, la altura del liquido (z), debe ser igual al diámetro del tanque (T), pero en la práctica suele ser 0.6 y 0.7. (Oldshue, 1983)

Base del tanque.

La forma de la base tiene un efecto muy significativo en los patrones de flujo que se desarrollan en el tanque, normalmente se prefiere la base toroidal que la plana, ya que esta permite que la turbulencia aumente con menor potencia suministrada al sistema.

Deflectores.

Son bandas planas verticales, colocadas radialmente a lo largo de la pared del tanque, por lo general son cuatro deflectores, con anchuras comunes de 1/10 y 1/12 del diámetro del tanque. Su utilidad es aumentar la turbulencia y no permitir la formación de vórtice, aunque aumenta el consumo de potencia debido al esfuerzo de corte desarrollado por los deflectores. (Perry, 1985)

Velocidad y potencia de rotación del impulsor.

Los datos de velocidad se han utilizado para calcular la circulación y de descarga del impulsor, pero no se usan directamente para el diseño del tanque mezclador. Las velocidades de rotación para un impulsor se basan por lo común en pruebas o correlaciones de resultados y pruebas.

2.1.3.- Tipo de Impulsores.

Los impulsores se pueden dividir en dos clases, de flujo axial y de flujo radial. La clasificación depende del ángulo que forman las aspas con el plano de rotación del impulsor. (ver fig. 1)

Impulsores de flujo axial.

Los impulsores de flujo axial incluyen todos los que tienen aspas que forman un ángulo de menos de 90° con el plano de rotación. Las hélices y las turbinas de aspas inclinadas son representativas de este flujo. Con frecuencia se utilizan impulsores axiales para la agitación de 3.8 m³ o menos de 1.8 m de diámetro, cuando resultan satisfactorios menos de 2.2 kW para obtener resultados en el proceso. Los impulsores de paletas inclinadas se emplean en ejes de agitadores de entrada por la parte superior, cuando se desea una velocidad elevada de circulación axial y el consumo de energía es mayor a 3 HP. Una turbina de aspas inclinadas cerca de la superficie superior del líquido de un tanque, es muy eficaz para la inmersión rápida de partículas sólidas en flotación.(Takahashi, 1992)

Impulsores de flujo radial.

Este tipo de impulsores tiene aspas paralelas al eje de la flecha motriz. Los más pequeños de aspas múltiples, se conocen como turbinas, las mayores, de velocidades más bajas, con dos o cuatro aspas, se denominan ruedas de paleta.

El diámetro de una turbina se encuentra entre 0.3 a 0.6 el diámetro del tanque. Las aspas curvas ayudan en el arranque de un impulsor entre sólidos sedimentados. La mayor parte de las operaciones de agitación en gran escala de suspensiones sólido-líquido se hacen con ruedas de paletas o turbinas que se introducen en la parte superior. (Perry, 1985)



Fig. 1.- Impulsores

2.1.4.- Efectos de Deflectores.

Tanque sin deflectores.

Si se agita un líquido de baja viscosidad en un tanque sin deflectores mediante un agitador de flujo axial, habrá tendencia a que se desarrolle un patrón de flujo de remolino, sea cual sea el impulsor que se utilice. Se produce un vórtice debido a la fuerza centrífuga que actúa sobre el líquido que gira. A pesar de la presencia del vortex se obtiene un proceso satisfactorio. Sin embargo, existen límites para la velocidad de rotación que se pueden utilizar, puesto que, una vez que el vortex llega al impulsor, se puede producir un arrastre de aire importante, además esto genera una onda oscilante en el tanque que unida al remolino puede crear una gran fuerza fluctuante que actúa sobre el eje de rotación.

Tanque con deflectores.

Para agitación vigorosa de suspensiones delgadas se instalan deflectores en los tanques, que son bandas planas verticales, colocadas radialmente a lo largo de la pared del tanque de $1/10$ ó $1/12$ del diámetro de la base del tanque

Para número de Reynolds (N_{Re}) mayores a 10,000 los deflectores se utilizan con impulsores de turbina o propulsores de flujo axial sobre la línea central.

La utilización de deflectores da como resultado una gran circulación de la parte superior al fondo, sin que se formen remolinos ni se ejerzan fuerzas desequilibradas del fluido sobre el eje del impulsor.

2.1.5.- Comportamiento de los fluidos en recipientes mezcladores.

Durante el movimiento del fluido ocurren varios fenómenos en un recipiente, que se pueden utilizar para fomentar varios objetivos del proceso.

- Se desarrollan esfuerzos cortantes en el fluido cuando una de sus capas se desplaza con mayor o menor rapidez que otra capa adyacente o una superficie sólida. En flujo turbulento, el esfuerzo cortante se produce también debido al comportamiento de las corrientes parásitas aleatorias y transitorias, incluyendo los remolinos en gran escala, que se descomponen en ondas o fluctuaciones pequeñas. La escala de los remolinos grandes depende del tamaño del equipo. Por otra parte los remolinos pequeños disipan energía principalmente mediante el corte viscoso.
- Se desarrollan fuerzas de inercia cuando un fluido cambia de dirección o de velocidad. Con flujo turbulento, las fuerzas de inercia son mayores que las viscosas. El fluido en movimiento tiende a seguir desplazándose, hasta que se encuentra con una superficie sólida o algún otro fluido que se mueve en dirección diferente. Se desarrollan fuerzas durante la transferencia de cantidad de movimiento, lo cual hace que fluctúen de manera aleatoria la escala y la intensidad de turbulencia en el tanque.
- Las concentraciones de equilibrio entre las interfaces sólido-líquido, se desplazan o modifican debido a la difusión molecular y turbulenta entre el fluido primario y el adyacente a la interfase.

2.1.6.- Suspensión de sólidos.

La suspensión de sólidos por medio de tanques mecánicamente agitados es una de las operaciones más comunes en la industria química y en los campos relacionados como él de la ingeniería ambiental y más específicamente a lavado de suelos. En la mayoría de los casos, para lograr la suspensión total de los sólidos. Por ejemplo, todas las partículas sólidas se encuentren en contacto con la fase acuosa y ninguna permanezca en contacto con el fondo del tanque por más de uno o dos segundos. Por debajo de este estado de suspensión total el área interfacial entre el líquido y el sólido no es completamente eficiente. Por arriba de este estado el incremento en transferencia de masa será mínima y además se estará añadiendo al sistema una energía adicional que es inútil para algunos procesos, aunque para el lavado de suelos esta energía adicional genera mejores resultados. Según la literatura existen diferentes estados de suspensión. (Constantin, 2000)

El porcentaje de suspensión se calcula de la siguiente forma:

$$100 \left[\frac{\% \text{Peso.sólidos.punto.muestra}}{\% \text{Peso.sólidos.Tanque}} \right] = \% \text{suspensión}$$

El porcentaje de suspensión puede tener valores mayores, iguales o menores que el 100 por ciento. También se puede basar en una fracción específica de tamaños de partículas.

La uniformidad completa implica que el porcentaje de suspensión en cada punto es del 100%. Aunque la región más alta del líquido agitado es la más resistente a la uniformidad. El patrón de flujo primordialmente horizontal en esta capa no puede mantener en suspensión los sólidos de alta velocidad de asentamiento.

La altura del líquido en el tanque a la que se suspenden los sólidos se puede utilizar para describir el grado de suspensión, se expresa comúnmente como un porcentaje de sólidos de cada una de las diversas fracciones de tamaño de partícula.

2.1.7.- Reducción de tamaño de partícula en dispersiones.

La reducción de tamaño de partícula se logra tanto por la reducción del tamaño básico de las partículas de la fase sólida, como por el rompimiento de los aglomerados de partículas. En cualquiera de esos casos los factores primordiales, es la magnitud de corte de fluido que se aplica.

Cuanto más elevada es la velocidad periférica del impulsor, mayor es la velocidad y el esfuerzo cortante del fluido (Segura, 1998). Es necesario realizar pruebas comunes para determinar la geometría del equipo y la velocidad requerida por el impulsor. Los impulsores de turbina con una relación D/T baja o impulsores especiales, por ejemplo, discos planos o dentados se pueden utilizar para velocidades elevadas de rotación. En algunos procesos, la reducción de tamaño de partícula no es deseable y es necesario asegurarse de que no llega demasiado lejos.

2.1.8.- Números Adimensionales, útiles en la operación de mezclado.

En la ingeniería química, mecánica, etc., es común presentar las correlaciones en términos de números adimensionales. Para este caso, las relaciones de potencia se han reportado en función del número de potencia y el número de Reynolds.

Número de Reynolds (Re).

Para fluidos de comportamiento newtoniano se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{ND^2\rho}{\mu}$$

Donde:

Re	Número de Reynolds (adimensional)
N	Velocidad de agitación (1/seg)
D	Diámetro del impulsor (m)
μ	Viscosidad dinámica (m.Kg/seg)
ρ	Densidad del liquido (kg/m ³)

Número de potencia (N_p).

La potencia suministrada a un tanque agitado, es una variable que muestra la capacidad de un sistema de mezclado para mezclar un fluido. Para calcular la potencia suministrada para cada impulsor se utiliza la siguiente ecuación. (Oldshue, 1983)

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

Donde:

N_p Número de Potencia (adimensional)

N Velocidad de agitación (1/seg)

D Diámetro del impulsor (m)

P Potencia (Watts)

ρ Densidad del liquido (kg/m^3)

2.1.9.- Escalamiento.

Los efectos del mezclado son por lo regular estudiados con equipos a escala piloto. Si las velocidades se mantienen constantes, habrá una circulación mayor a lo largo del tanque. La similitud en la geometría significa que toda dimensión pertinente es similar y tiene un radio constante común. La similitud en dinámica requiere que todas las fuerzas involucradas deben igualmente tener constante el radio.

En la tabla 2 se muestra algunas ecuaciones que correlacionan variables necesarias en un equipo de mezclado, desde un prototipo hasta escalarlo a un equipo industrial, según las necesidades del proceso.

Tabla 2.-Ecuaciones de similitud hidráulica y fuerzas (Uhl, 1986)

Geometría	$\frac{X_M}{X_P} = X_R$
Dinámica	$\frac{(F_I)_M}{(F_I)_P} = \frac{(F_V)_M}{(F_V)_P} = \frac{(F_G)_M}{(F_G)_P} = \frac{(F_\sigma)_M}{(F_\sigma)_P} = F_R$
Fuerzas que interactúan dentro del proceso de mezclado.	$\frac{F_I}{F_V} = N_{Re} = \frac{ND^2\rho}{\mu}$
	$\frac{F_I}{F_G} = N_{Fr} = \frac{N^2D}{G}$
	$\frac{F_I}{F_\sigma} = N_{We} = \frac{N^2D^3\rho}{\sigma}$
Donde:	Dimensiones para M (modelo) y P (prototipo)
X	
X_R	Radio
F	Fuerza del modelo y del prototipo
I	Fuerza de inercia
V	Fuerza viscosa
G	Fuerza de gravedad
σ	Tensión interfacial

Esta fuente esta determinada por la clase de impulsor, velocidad y diámetro. Como complemento existen tres fuerzas de oposición: viscosidad, gravedad y tensión superficial. La similitud dinámica requiere que el radio de estas cuatro fuerzas, como en el modelo y el prototipo, debe ser común en ambos. (Uhl, 1986)

Los conceptos de similitud geométrica y dinámica dependen directamente de fuerzas de tipo viscoso, de inercia y de gravedad, expresados por el número de Reynolds, Froude y Weber, los cuales por su naturaleza son adimensionales.

2.2. Suelo.

2.2.1. Definición de suelo.

El nombre de suelo se deriva de la palabra en latín *solum*, la cual significa piso o superficie de tierra. El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, es el resultado de la interacción de varios factores ambientales, tanto geológicos, fisiográficos, climáticos, biológicos y el material parental que proviene de la roca madre. (Van, 2007)

El suelo se forma en un largo proceso en el que interviene el clima, los seres vivos y la roca más superficial de la litosfera. Este proceso es una sucesión ecológica en la que va madurando el ecosistema suelo. La roca es meteorizada por los agentes meteorológicos (frío/calor, lluvia, oxidaciones, hidrataciones, etc.) y así la roca se va fragmentando. Los fragmentos de roca se entremezclan con restos orgánicos: heces, organismos muertos o en descomposición, fragmentos de vegetales, pequeños organismos que viven en el suelo, etc. Con el paso del tiempo todos estos materiales se van estratificando y terminan por formar lo que llamamos suelo.

2.2.2. Composición del suelo.

En el suelo encontramos materiales procedentes de la roca madre fuertemente alterados, seres vivos y materiales descompuestos procedentes de ellos, además de aire y agua. Las múltiples transformaciones físicas y químicas que el suelo sufre en su proceso de formación llevan a unos mismos productos finales característicos en todo tipo de suelos: arcillas, hidróxidos, ácidos húmicos, etc.; sin que tenga gran influencia el material originario del que el suelo se ha formado.

El humus es el último estadio de la materia orgánica, rico en ácidos orgánicos suaves (ácidos húmicos), y actúa en las propiedades de agregación de las partículas (estructura), estando también íntimamente ligado a la materia mineral (complejo arcilla - humus) (Mirsal, 2004). Los suelos pueden estar constituidos por una o más de las fracciones presentadas en la tabla 3.

Tabla 3.- Fragmentos minerales del suelo (Van, 2007)

<i>Tipo</i>	<i>Tamaño (mm)</i>
Pedruscos	> 256
Guijarros	64 a 256
Grava	4 a 64
Gravilla	2 a 4
Arena gruesa	1 a 2
Arena	0.2 a 2
Arena fina	0.02 a 0.2
Limo	0.002 a 0.02
Arcilla	< 0.002

Las principales propiedades del suelo según el tipo de este se presentan en la tabla 4.

Tabla 4.- Propiedades del suelo según su composición (Van, 2007)

Característica/Tipo de suelo	arenoso	arcilloso	calizo
Permeabilidad	alta	nula	media
Almacenamiento de agua	poco	mucho	poco
Aireación	buena	mala	buena
Nutrientes	pocos	muchos	mucho calcio

En todo suelo hay materia orgánica, llamada humus. En un suelo del desierto puede estar en una proporción del 1%, mientras que en la turba la proporción llega al 100%. Una cifra media común a bastantes suelos sería la de un 5% (2% de carbono). Está formada por restos de organismos muertos, excreciones, etc.; tan profundamente transformados que ya no puede advertirse su estructura original. Su composición química es muy variada, pero como conforme pasa el tiempo los productos orgánicos que son más fácilmente degradables van desapareciendo, al final van quedando en mucha más proporción las moléculas orgánicas con enlaces resistentes a la degradación biológica (moléculas aromáticas con abundancia de ciclos y anillos, fenoles, funciones ácidas, etc.).

En la tabla 5 se muestra una clasificación de suelo según el tamaño de partícula y la cantidad de limo, arcilla, arena y grava.

Tabla 5.- Clasificación de suelos (Manual M-MMP-1-06, Granulometría de Materiales Compactables para Terracería.)

Tipo	Sub-tipos	Identificación		
Suelos con partículas menores a 7.5 cm.	Suelos gruesos. Mas de la mitad del material tiene un tamaño de partícula mayor a 0.075 mm	Grava. Mas de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla #4.	Grava limpia. Poco o nada de partículas finas.	Grava bien graduada, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (Cu) mayor a 4 y un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3.
			Grava mal graduada: mezcla de grava y arena con un poco o nada de finos.	Grava limosa: mezcla de grava, arena y limo.
			Grava con Finos. Cantidad apreciable de partículas finas.	Grava Arcillosa: mezcla de grava, arena y arcilla.
		Arena. Mas de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla #4.	Arena limpia. Poco o nada de partículas finas.	Arena bien graduada: mezcla de arena y grava con poco o nada de finos debe tener un Cu mayor a 6 y un Cc entre 1 y 3.
			Arena mal graduada: mezcla de arena y grava con poco o nada de finos.	Arena limosa: mezcla de arena, grava y limo.
			Arena con Finos. Cantidad apreciable de partículas finas.	Arena arcillosa: mezcla de arena, grava y arcilla.
	Suelos finos. Mas de la mitad del material tiene un tamaño de partícula menor a 0.075 mm	Limo y arcilla (limite liquido)	Menor de 50%	Limo de baja compresibilidad: mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava.
				Arcilla de baja compresibilidad: mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava.
				Limo orgánico de baja compresibilidad: mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava.
			Mayor de 50%	Limo de alta compresibilidad: mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava.
				Arcilla de alta compresibilidad: mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava.
				Limo orgánico de alta compresibilidad: mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava.
			Altamente Orgánicos.	

2.3.- Contaminación de suelos en México.

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes, pero muy difíciles de cuantificar, de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (Flores, 2004). El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados por el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km².

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros.

En el 2001 se reportaron 565 emergencias ambientales de las cuales 517 fueron derrames o fugas, 19 incendios, 17 explosiones y 12 otras. (PROFEPA,2002).

En la figura 2 se muestra una grafica de emergencias ambientales ocurridas en México entre el 1997 y 1999.

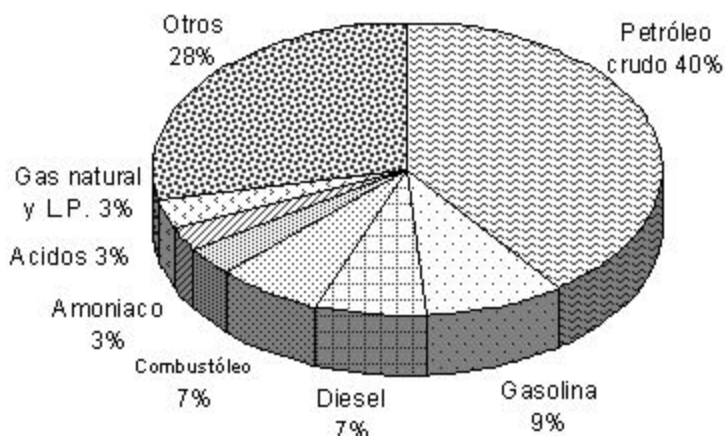


Fig. 2.- Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales reportadas a la PROFEPA entre 1997 y 1999. (Semarnat, 2007)

Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPCs), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAPs). De éstos, compuestos como los BPCs se han almacenado en tambores que en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente. Por su parte, los HAPs se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTPs).

A continuación se mencionan algunas de las principales fuentes de contaminación de suelos en México.

2.3.1.- Industria petroquímica.

La industria petroquímica en México se ha desarrollado aceleradamente, generando diversos satisfactores económicos. Sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con graves repercusiones a la salud de la población y al equilibrio ecológico de los ecosistemas. Entre las causas que han generado este deterioro ambiental por la contaminación de cuerpos de agua y suelos a lo largo de todo el país, se encuentran las siguientes: manejo inadecuado y

abandono de materiales y residuos peligrosos; mantenimiento inadecuado o falta de éste en instalaciones petroleras; explosiones en instalaciones de alto riesgo; fugas en ductos; derrames de hidrocarburos.

En el inventario de residuos peligrosos de PEMEX en el 2001 reportan la generación de más de 270 mil toneladas de residuos peligrosos. Aproximadamente el 86% del volumen total de estos residuos, corresponde a lodos y recortes de perforación (72%), lodos aceitosos (8%) y aceites gastados (6%).

Con respecto a los derrames y fugas de hidrocarburos, PEMEX reporta que durante el año 2001 hubo un total de 8,031 toneladas de hidrocarburos (crudo, diesel y gasolina) derramados en su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país (PEMEX, 2001). Esta última cifra es importante, ya que de esta manera puede estimarse la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames. Uno de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por actividades petroleras es Veracruz. De acuerdo con información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería "Lázaro Cárdenas" y el pantano de "Santa Alejandrina", ambos ubicados en el sureste de México. (INEGI, 2001)

2.3.2.- Industria minera.

Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país. La producción minera en México, se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco.

2.3.3.- Agroquímicos.

El uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México. Muchos de los plaguicidas

empleados en el país hasta la fecha, se han prohibido en otros países por su toxicidad. Sin embargo, el número de plaguicidas se incrementa a razón de 10% al año. Esto ha permitido que el número de productos que entran en contacto con la población, se incremente en más de seis veces.

Todas estas sustancias son compuestos químicos tóxicos y por su aplicación en tierras de cultivo, evidentemente son compuestos que se encuentran como contaminantes de grandes extensiones de suelos en todo el país. En México aún continúan en el mercado agroquímicos organoclorados como el ácido 2,4 dicloro-fenoxiacético (2,4-D), el pentaclorofenol (PCP) y dicofol, además de plaguicidas a base de carbamatos y los organofosforados como el malatión. (Instituto de Ecología, 2007)

2.3.4.- Estaciones de servicio.

Los productos combustibles como gasolina, diesel, combustóleo, gasóleo, gas avión y gas LP, son producidos y distribuidos en México por PEMEX. La distribución al menudeo de gasolina y diesel, se lleva a cabo en estaciones de servicio (gasolineras). Uno de los riesgos ambientales que involucra el manejo de estas estaciones, son los derrames o fugas de combustibles, que provocan la contaminación de los sitios en donde se encuentran los tanques de almacenamiento.

2.3.5.- Disposición de residuos peligrosos.

Debido al creciente volumen de residuos peligrosos generados en nuestro país y a las capacidades existentes para su manejo, frecuentemente se presenta la disposición clandestina de éstos en diversos sitios (tiraderos municipales, terrenos baldíos, patios de empresas, drenajes), ocasionando así un aumento de sitios contaminados con sustancias peligrosas de naturaleza tanto orgánica como inorgánica.

2.4.- Remediación de suelo.

El término tecnología de remediación implica el uso de cualquier operación unitaria o conjunto de ellas, que altere la composición de un contaminante peligroso a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan su toxicidad, movilidad o volumen en la matriz o material contaminado (Van, 2007). Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de residuos peligrosos sin tratamiento y sus posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente.

En la legislación mexicana el término remediación de suelos se entiende como el conjunto de acciones necesarias para recuperar y reestablecer sus condiciones, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable para la zona respectiva. En la citada norma, el término remediación se utiliza como sinónimo de restauración, reversión, saneamiento, limpieza, rehabilitación y regeneración. (Semarnat, 2007)

2.4.1.- Clasificación de técnicas de remediación.

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras; con base en su estado de desarrollo (tradicionales e innovadoras), al lugar en donde se realizan (*in situ* y fuera del sitio) y, en el caso de la contaminación por metales, con base en la alteración de propiedades del contaminante (separación/inmovilización o disolución/movilización). (Van, 2007)

Lugar de tratamiento.

Con base en el lugar en donde se lleva a cabo el tratamiento de un suelo, las tecnologías se pueden clasificar en tecnologías *in situ* y fuera del sitio:

In situ: Los tratamientos *in situ* son aquellos que permiten tratar el suelo contaminado sin la necesidad de excavar y transportar el suelo fuera de la zona (espacio) contaminada, lo

cual genera una disminución de los costos. Este tipo de tratamiento generalmente requiere de periodos largos, además de que existe la posibilidad de que el tratamiento de remediación no sea uniforme dada la variabilidad de las características del suelo y debido a que es más difícil de verificar la eficacia de los procesos empleados.

Fuera del sitio: Los tratamientos fuera del sitio son aquellos que requieren de una excavación del suelo contaminado antes de realizar los procesos de remediación, lo cual incrementa los costos. Este tipo de tratamiento, generalmente requiere de periodos cortos y presenta una mayor certeza en la uniformidad de los procesos empleados debido a que se puede obtener una adecuada homogeneización del suelo. En general, existe un mejor manejo del suelo contaminado (mezclado, tamizado), sin embargo, esto puede presentar condiciones de exposición a los trabajadores. Los tratamientos fuera del sitio, a su vez, se dividen en:

On site: El tratamiento se realiza en el mismo sitio en donde se realizó la excavación.

Off site: El tratamiento se realiza fuera del sitio en donde se excavó. Las ventajas y desventajas de los métodos *in situ* y *fuera del sitio* se muestran en la tabla 6.

Tabla 6.- Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación *in situ* y fuera del sitio (Instituto de Ecología)

Característica	<i>In situ</i>	<i>Fuera del sitio</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Permite tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar. • Potencial disminución de costos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tiempo de tratamiento. • Uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores tiempos de tratamiento. • Pueden ser inseguros en cuanto a la uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo. • Dificultad para verificar la eficacia del proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de excavar el suelo. • Aumento en costos e ingeniería para equipos. • Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante.

Por los métodos utilizados.

Remediación biológica.

La remediación biológica se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan el potencial metabólico de organismos vivos (plantas, hongos y bacterias, entre otros) para limpiar ambientes contaminados. La bioremediación de un suelo implica su descontaminación por vía biológica. En el caso de sitios contaminados con metales, los microorganismos pueden modificar su movilidad en el ambiente a través de cambios en sus características físicas o químicas.

Remediación fisicoquímica.

Los tratamientos fisicoquímicos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante. Son tratamientos económicamente factibles y la mayoría se encuentra disponible comercialmente, por lo cual son las técnicas más empleadas para la remediación de diferentes matrices contaminadas con residuos peligrosos desde hace décadas. Estas tecnologías involucran una variedad de procesos como: mezclado, filtración, neutralización, sorción, absorción, evaporación y floculación, entre otros.

Aunque las tecnologías fisicoquímicas pueden desarrollarse *in situ* o fuera del sitio, la principal desventaja de su aplicación en la remediación de sitios contaminados con metales radica en que la mayoría requiere de la excavación del suelo y de al menos un proceso secundario de tratamiento o disposición final del contaminante transformado, separado o inmovilizado, incrementándose los costos del tratamiento. (Volke, 2002)

- Lavado de suelos.

El lavado de suelos es una tecnología fuera del sitio, en la cual el suelo contaminado se excava y se lava con agua o soluciones de extracción en una unidad de lavado con el fin de disolver, suspender o precipitar el contaminante, lográndose así su transferencia a la fase acuosa. El lavado de suelos, a diferencia de la inundación, puede concentrar los contaminantes en un volumen menor de suelo, debido a la separación entre partículas finas y gruesas, reduciendo así el volumen del material contaminado (partículas finas).

Descripción del proceso

El proceso consiste de tres etapas: mezclado, lavado y enjuagado. Antes de iniciar, el material contaminado se tamiza para retirar las partículas de mayor tamaño. Posteriormente, el suelo se adiciona a la unidad de lavado, en donde se mezcla y se lava con el uso de agua con o sin aditivos, en un proceso en lote o continuo. Al finalizar el lavado del suelo, la fase líquida se envía a una planta de tratamiento de aguas, mientras que la fase sólida se enjuaga nuevamente con agua limpia.

- Agentes quelantes: Forman complejos solubles con iones metálicos. Uno de los más usados es el ácido etilendiamino tetracético (EDTA). Otros ácidos usados como agentes quelantes son los ácidos cítrico, málico y acético.
- Ácidos y bases: Movilizan, neutralizan o transforman el contaminante. Las soluciones ácidas se aplican principalmente para incrementar la solubilidad de muchos metales, mientras que las alcalinas se usan para remover fenoles y metales ligados a la fracción orgánica del suelo.

Aplicaciones y estado de desarrollo.

Esta técnica es efectiva para suelos arenosos actualmente se encuentra disponible comercialmente a escala industrial, que igualmente puede aplicarse en suelos contaminados con una variedad de compuestos orgánicos, inorgánicos y combustibles. (Instituto de Ecología, 2007)

Ventajas y limitaciones.

En general, el lavado de suelos es una alternativa relativamente económica para la remoción de contaminantes, ya que minimiza el volumen del material contaminado y, por consiguiente, disminuye la cantidad a confinar o a tratar. Actualmente, existen sistemas móviles para el lavado de suelos que se pueden transportar al sitio contaminado, disminuyendo costos y el riesgo de dispersar los contaminantes durante el transporte. Las principales ventajas y desventajas del lavado de suelos se presentan en la tabla 7.

Tabla 7.- Principales ventajas y limitaciones del lavado de suelo (Van, 2007)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos. • Efectivo para tratar suelos arenosos o muy permeables. • Disminuye la cantidad de material contaminado. • Son sistemas cerrados, en donde se pueden controlar las condiciones del sistema y las emisiones al ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere excavar y manipular el suelo. • Altas cantidades de materia orgánica dificulta el proceso de separación. • No es eficiente para tratar mezclas complejas. • Los contaminantes deben ser solubles. • Requiere agua el proceso. • Se necesitan procesos secundarios para tratar el agua generada.

Usos del suelo después del tratamiento y manejo de residuos

Generalmente, después del lavado de suelos se emplean técnicas de separación (sedimentación, filtración, centrifugación) con el propósito de separar las partículas más finas, en donde se adsorben los contaminantes del volumen original. Las partículas gruesas (limpias) se regresan al sitio, mientras que a las finas (contaminadas) se les realiza un nuevo tratamiento o se disponen adecuadamente en un sitio de confinamiento. Debido a que la mayor parte de las partículas depositadas en el sitio después del tratamiento son gruesas, éstas sólo tienen utilidad como soporte de infraestructuras, después de una adecuada compactación en el sitio y no para fines agrícolas.

Con respecto al agua generada es necesario realizar un tratamiento para proceder a su descarga, actualmente se usan tratamientos tales como la coagulación y floculación, en el cual, por medio de sustancias coagulantes como hidróxidos se separan las grasas y aceites del agua de descarga del proceso. Otros métodos igualmente factibles son la separación del contaminante por medio de membranas de intercambio iónico. Cualquiera de estos métodos genera lodos que contienen en alta concentración los contaminantes que son confinados, incinerados o separados para su uso en otros procesos.

2.4.2.- Sitios remediados y Costos.

La remediación de suelo es una actividad que actualmente a tenido un gran impacto en el sector publico y privado por lo que una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación de un sitio, suelo y subsuelo se deben plantear opciones para su limpieza y establecer los niveles de limpieza. Es decir el límite máximo de contaminación que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de remediación. En la actualidad existen normas que señalan los límites máximos permisibles de contaminación en suelos afectados por hidrocarburos, la caracterización del sitio y procedimientos para su restauración NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

Algunos sitios remediados por lavado de suelos se han llevado acabo por el Instituto de Ingeniería, UNAM, como fue el caso de un sitio en el sureste del país propiedad de Petróleos Mexicanos en el año 2000. Este sitio era una estación de distribución de derivados del petróleo que estuvo operando desde 1966 hasta el 2000, donde ocurrieron derrames masivos de petróleo y sus derivados.

En la caracterización inicial se encontraron concentraciones de entre 3,037 a 17,238 mg/kg de HTP, en un volumen de suelo por tratar de 1,640 m³, se llevo a acabo la técnica de lavado de suelos obteniendo remociones de aproximadamente 82%. Los costos generados por este proceso fueron de 140 dólares por m³ de suelo tratado o 67 dólares por kg de HTP removido. (Iturbe, 2004)

Los costos son cruciales en una remediación, por lo que a continuación se presentan costos aproximados asociados a los diferentes tratamientos de suelos:

Bioventilación genera un costo de 10 a 70 dólares por m³, lavado de suelos de 120 a 220 dólares por tonelada métrica, extracción de vapores de 10 a 50 dólares por m³, deshalogenación 270 dólares por m³, desorción térmica de 110 a 330 por tonelada métrica, extracción por solvente de 110 a 440 por tonelada métrica e incineración de 220 a 1110 dólares por tonelada métrica. Estos costos están sujetos a variación en función del grado de contaminación inicial y el nivel de limpieza requerido. (Osorio, 1998)

2.5.- Surfactantes.

La palabra surfactante (agente activo de superficie) es una sustancia que posee una actividad superficial o interfacial. Es necesario hacer resaltar que todos los anfífilos no poseen tal actividad, para que esto suceda es necesario que la molécula posea propiedades relativamente equilibradas, quiere decir, que no sea ni demasiado hidrófila ni demasiado hidrófoba.

Tensoactivo se refiere a una actividad o a una acción sobre la tensión superficial o interfacial, es decir sobre la energía libre de Gibbs. Este término es equivalente a surfactante solo si se supone que la actividad superficial o interfacial se traduce necesariamente por un descenso de la tensión, lo cual es verdad en la mayor parte de los casos que tienen un interés práctico. (Lange, 1999)

2.5.1.- Clasificación de los surfactantes.

- Los surfactantes aniónicos se disocian en un anión anfífilo y un catión, el cual es en general un metal alcalino o un amonio cuaternario. A este tipo pertenecen los detergentes sintéticos como los alquil benceno sulfonatos, los jabones (sales de sodio de ácidos grasos), los agentes espumantes como el lauril sulfato, los humectantes del tipo sulfosuccinato, los

dispersantes del tipo lignosulfonatos, etc. La producción de los surfactantes aniónicos representa alrededor del 55% de los surfactantes producidos anualmente en el mundo.

- Los surfactantes no iónicos están en el segundo rango por orden de importancia con un poco menos del 40% del total. En solución acuosa no se ionizan, puesto que ellos poseen grupos hidrófilos del tipo alcohol, fenol, éter o amida. Una alta proporción de estos surfactantes pueden tornarse relativamente hidrofílicos gracias a la presencia de una cadena poliéter del tipo polióxido de etileno. El grupo hidrófobo es generalmente un radical alquilo o alquil benceno y a veces una estructura de origen natural como un ácido graso, sobre todo cuando se requiere una baja toxicidad.

- Los surfactantes catiónicos se disocian en solución acuosa en un catión orgánico anfífilo y un anión generalmente del tipo halogenuro. La gran mayoría de estos surfactantes son compuestos nitrogenados del tipo sal de amina grasa o de amonio cuaternario.

- La combinación dentro de una misma molécula de dos caracteres: aniónico y catiónico producen un surfactante llamado anfótero, como por ejemplo los aminoácidos, las betaínas o los fosfolípidos; ciertos anfóteros son insensibles al pH, otros son de tipo catiónico a pH ácido y de tipo aniónico a pH alto.

- Los surfactantes poliméricos son producidos asociando estructuras polimerizadas de tipo hidrofílico o lipofílico, en forma de bloques o de injertos. Ciertos de estos surfactantes son indispensables en procesos donde están involucradas macromoléculas naturales como en la deshidratación de petróleo. (Salager, 2002)

2.5.2.- El dodecil benceno sulfato de sodio (SDS).

El tensoactivo aniónico más comúnmente utilizado en formulaciones de detergentes es el dodecil benceno sulfonato de sodio (sal del ácido sulfónico), debido a sus propiedades y su bajo costo, aunque a veces se utiliza en mezclas con el lauril etoxi sulfato de sodio.

Este último tiene propiedades similares al anterior, siendo más soluble y dando una buena eficiencia en aguas de mayor dureza. En la fig. 3 se muestra la estructura del dodecil benceno sulfato de sodio.

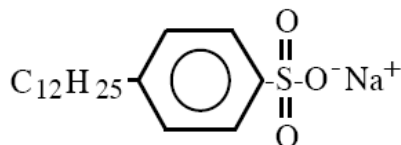


Fig. 3.- Dodecil benceno sulfato de sodio (Merck, 2007)

En el contexto de la industria de los surfactantes, el dodecil benceno sulfonato no es una sustancia pura, sino una mezcla de compuestos alquil bencénicos con una cadena alquilo entre C_{10} y C_{15} , la cual puede estar más o menos ramificada. Se llaman ABS (*alkyl benzene sulfonates*) los sulfonatos cuya cadena alquilo es cualquiera, es decir ramificada en la mayoría de los casos.

Los alquil benceno sulfonatos son sustancias muy solubles en agua en el rango de cadena C_{10-15} . El máximo poder detergente y espumante corresponde a $C_{12}-C_{13}$ a temperatura ambiente y C_{14} a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las mezclas tienden a producir mejores detergentes pero es más difícil producir polvos, especialmente por la higroscopicidad de los sulfonatos de alto peso molecular.

Los sulfonatos sódicos de petróleo se venden con un rango de peso molecular desde 350-400 (hidrosolubles) hasta 500-550 (liposolubles). En el rango de peso molecular 400-500 tienen un buen balance entre sus propiedades hidrofílica y lipofílica, y permiten producir tensiones interfaciales extremadamente bajas (0.001 mN/m). Por eso, y por su bajo costo, son buenos candidatos para los procesos de recuperación del petróleo por inyección de surfactante.

La concentración micelar de los surfactantes es un dato muy importante ya que determina en que momento se inicia la formación de micelas, que son agregados que

secuestran el contaminante según sea su afinidad. En la tabla 8 se muestran algunos valores de CMC.

Tabla 8.- CMC de algunos compuestos (Salager, 2002)

Surfactante	CMC (10^{-3} mol/L)
Octil sulfato Na	120
Decil sulfato Na	30
Dodecil sulfato Na	8
Tetradecil sulfato Na	2
Hexadecil sulfato Na	0.6
Octadecil sulfato Na	0.2
Dodecil sulfonato Na	9
Tetradecil sulfonato Na	2
Hexadecil sulfonato Na	0.5
Dodecil sulfato Li	9
Dodecil sulfato K	8
Dodecil sulfato Ca	3
Dodecil sulfato tetra butil amonio	1

2.6.- Normatividad Mexicana.

2.6.1.-NOM-138-SEMARNAT/SS-2003.

Los efectos que ha generado el hombre en la naturaleza han tenido repercusiones graves en el desarrollo y ciclo de la misma, por lo que este se vio en la necesidad de normalizar las causas de estos severos problemas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 se refiere a los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su

caracterización y remediación. Esta norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para quienes resulten responsables de la contaminación con hidrocarburo en suelos. Su vigilancia del cumplimiento corresponde a la SEMARNAT por conducto de PROFEPA (Diario Oficial, 2005). En la tabla 9 se muestra claramente que deberá analizarse si se llega a contaminar un suelo con un producto de refinación determinado.

Tabla 9.- Hidrocarburos que deberán analizarse en función del producto contaminante (Semarnat, 2005)

Producto contaminante	Hidrocarburos					
	Fracción pesada	HAPs	Fracción media	HAPs	Fracción ligera	BTEX
Mezclas	X	X	X	X	X	X
Petróleo crudo	X	X	X	X	X	X
Combustóleo	X	X				
Parafinas	X	X				
Petrolatos	X	X				
Aceites	X	X				
Gasóleo			X	X		
Diesel			X	X		
Turbosina			X	X		
Keroseno			X	X		
Creosota			X	X		
Gasavión					X	X
Gasolvente					X	X
Gasolinas					X	X
Gasnafta					X	X

En la tabla 10 se observan los límites máximos permisibles para diferentes fracciones de petróleo en el suelo, además estas dependen del tipo de suelo, que se clasifica según su uso.

Tabla 10.- Límites máximos permisibles para fracciones de hidrocarburos en suelo (Semarnat, 2005)

Fracción de hidrocarburos	Uso de suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Ligera	200	200	500
Media	1,200	1,200	5,000
Pesada	3,000	3,000	6,000

Igualmente se presenta en la tabla 11 una lista de los límites máximos de hidrocarburos de tipo cancerígenos, presentes en un tipo de suelo determinado aunque en este caso no se realizó un análisis del suelo en este rubro, por lo que solo se menciona.

Tabla 11.- Límites máximos permisibles para hidrocarburos específicos en suelo (Semarnat, 2005)

Hidrocarburos específicos	Uso del suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100
Benzo(a)pireno	2	2	10
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	10
Benzo(a)antraceno	2	2	10
Benzo(b)fluoranteno	2	2	10
Benzo(k)fluoranteno	8	8	80
Indeno/1,2,3-cd)pireno	2	2	10

2.6.2.- NOM-ECO-002-CNA.

Los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, no deben ser superiores a los indicados en la tabla 12. Para las grasas y aceites es el promedio ponderado en función del caudal, resultante de los análisis practicados a cada una de las muestras simples.

Los límites máximos permisibles establecidos en la columna instantáneo, son únicamente valores de referencia, en el caso de que el valor de cualquier análisis exceda el instantáneo, el responsable de la descarga queda obligado a presentar a la autoridad competente en el tiempo y forma que establezcan los ordenamientos legales locales, los promedios diario y mensual, así como los resultados de laboratorio de los análisis que los respaldan.

El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 (diez) y 5.5 (cinco punto cinco) unidades, determinado para cada una de las muestras simples. Las unidades de pH no deberán estar fuera del intervalo permisible, en ninguna de las muestras simple. (Comisión Nacional del Agua, 2007)

Tabla 12.- Límites máximos permisibles en Agua (Comisión Nacional de Agua)

Parámetros	(mg/L, excepto cuando se especifique otra)		
	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mg/L)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

3.- Objetivos.

3.1.- Objetivo general.

Estudiar la operación unitaria de mezclado, aplicado al lavado de un suelo contaminado con hidrocarburos de petróleo procedente de una zona de explotación petrolera en Tabasco.

3.2.- Objetivos Específicos.

- Caracterizar el suelo con el que se realizará la investigación.
- Estudiar la cinética de lavado del suelo para cada uno de los impulsores elegidos para la operación de lavado.
- Evaluar el efecto del tamaño de partícula sobre el consumo de potencia y la remoción de contaminantes durante el lavado asistido por surfactantes.
- Evaluar el efecto de la concentración de sólidos manteniendo el volumen de solución constante.
- Estudiar el consumo de potencia y eficiencia de remoción de contaminante en la operación de lavado a diferentes velocidades con impulsores distintos.
- Analizar los valores obtenidos a diferentes condiciones de operación, y así determinar cuales son las condiciones de operación necesarias para satisfacer el proceso.

4.- Planteamiento del Problema.

La explotación de petróleo crudo en México es una actividad económica fundamental ya que de esta depende en gran parte la economía del país. Por otro lado es común saber de la existencia de accidentes tales como derrames de fracciones de petróleo (gasolinas, diesel, etc) o de crudo, en suelo y agua, por lo que es necesario actuar de forma adecuada para solucionar este problema.

En el caso del suelo, por medio de una serie de técnicas fisicoquímicas se logra su remediación, estas técnicas es el lavado de suelos asistido por surfactantes, que consiste en llevar a cabo un lavado fuera del sitio, donde por medio de un surfactante diluido en agua, y contenido en un tanque se agrega el suelo contaminado y por medio de mezclado se desorbe el hidrocarburo del suelo.

5.- Hipótesis.

La correcta selección del tipo de impulsor, velocidad de agitación, concentración de sólidos y tamaño de partícula permitirá una óptima operación del proceso de lavado de suelos disminuyendo el consumo de energía e incrementando la eficiencia de lavado asistido por surfactantes.

6.- Materiales y métodos.

6.1.- Material, sustancias y equipo usado en el desarrollo de este trabajo.

Los materiales, sustancias y equipo empleados en el desarrollo de este trabajo se presentan en las tablas 13, 14 y 15.

Tabla 13.- Materiales usados durante el trabajo

Material	Capacidad	Marca
Espátula de Acero Inoxidable	----	----
Vaso de Precipitados	50 ml	Pyrex
Vaso de Precipitados	100 ml	Pyrex
Vaso de Precipitados	500 ml	Pyrex
Vaso de Precipitados	1000 ml	Pyrex
Probeta	250 ml	Pirex
Probeta	100 ml	Pyrex
Matraz bola	250 ml	Pyrex
Matraz bola	1000 ml	Heldoldh
Soxlets	300 ml	Kimax
Refrigerantes	----	Kimax
Tubo de ensayo	10 ml	Kimax
Tubo de ensayo	50 ml	Pyrex
Pipeta graduada	10 ml	Pyrex
Pipeta graduada	20 ml	Pyrex
Pipeta graduada	5 ml	Pyrex
Pipeta volumétrica	10 ml	Pyrex
Micropipeta	1 ml	Brand Transferpette.
Gradilla	50 tubos	----
Propipeta	----	Cienceware
Cartuchos de celulosa.	----	Whatman

Soporte Universal.	----	----
Mangueras de Caucho	----	----
Pinzas de Nuez.	----	----
Embudo de Plástico.	----	----
Guantes de Látex	----	Truper.
Jeringa	10 ml	Plastipack
Agitador de vidrio.	----	Kimax.
Mascarilla.	----	Cabel
Cronometro	----	Citizen.
Charolas de aluminio.	----	----
Garrafón	20 L	----
Pinzas Mecánicas	----	Truper
Llave Allen.	----	Truper
Flexometro	----	Truper
Pala de Jardinero.	----	Truper.
Cinta adhesiva	----	----
Matraz Aforado.	2L	Pirex
Matraz Aforado.	1L	Pirex

Tabla 14.- Sustancias usadas durante el trabajo

Sustancia	Procedencia o marca.	Sustancia	Procedencia o marca.
Suelo	Tabasco, Cinco Presidentes.	Sulfato Dodecil de Sodio.	J.T. Baker.
Hexano	J.T. Baker.	Agua destilada.	Instituto de Ingeniería.
Silicato de sodio deshidratado.	J.T. Baker.	Agua Corriente.	Instituto de Ingeniería.

Tabla 15.- Equipo usado durante el trabajo

Equipo	Marca	Equipo	Marca
Mallas normalizadas.	Monitox.	Mezclador de Flecha, tipo Digital.	Lightnin Lab Master Mixer.
Balanza Analítica.	Explorer Ohaus.	Campana de Extracción.	----
Estufa.	Fisher.	Rotavapor.	Heldolph
Desecador.	Nucelite	Equipo de medición de humedad.	Ohaus MB200.
Mantillos de Calentamiento.	----	Espectrofotómetro.	Milton Roy Spectronic 20D.
Impulsores	Lightnin		

6.2.- Metodología Experimental.

6.2.1.- Origen del suelo.

El suelo de estudio es un suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo, que provienen de una zona de explotación petrolera denominada batería no. 3 ubicada en el campo petrolero Cinco Presidentes en Huimanguillo, Tabasco.

La contaminación que presenta el suelo es debida a continuos derrames ocurridos en la batería no. 3 mientras ésta estuvo en operación, ya que actualmente esta inactiva. Anteriormente se habían realizado estudios con este suelo (Palmer, 2007), por lo que la cantidad con la que se trabajo para con esta investigación fue de 15 kg.

6.2.2.- Caracterización del suelo.

La caracterización del suelo consistió en determinar las características físicas y químicas del suelo. Se realizo la granulometría del suelo, humedad y el contenido de

hidrocarburos totales de petróleo (HTPs) en la mezcla del suelo en cada una de las fracciones de tamaño de partícula obtenidas de la granulometría.

Se realizaron análisis de contenido de carbón, hidrógeno, nitrógeno, contenido de agua, conductividad eléctrica, pH, y densidad, además de la caracterización de cantidad de calcio, potasio, sodio y magnesio. Las técnicas empleadas se describen a continuación.

Granulometría.

Esta técnica permite determinar cuantitativamente la distribución de las partículas del suelo según su tamaño, el cual es un intervalo determinado por la malla anterior y posterior.

Procedimiento:

Esta prueba se realizó con un método mecánico, utilizando una serie de mallas.

- Se seca el suelo, con el fin de eliminar el agua que contenga y facilitar el proceso de disgregación.
- La separación se efectúa por medio de mallas con una abertura de $1\frac{1}{2}$, 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{4}$ pulgadas para la separación de las fracciones gruesas y medias del suelo. Los tamices número 10, 20, 40, 60, 80, 100 para la separación de fracciones finas del suelo.
- Las mallas se acomodan de la de mayor abertura a la de menor abertura.
- Se coloca una cantidad de suelo determinada en la malla superior y se comienza a agitar el arreglo de mallas por 15 o 20 minutos.
- Retirar las mallas una por una y depositar el contenido en recipientes o bolsas por separado, cuidando no tener pérdidas durante el trasvase.
- Pesar el suelo retenido por cada malla.
- Trazar la curva de distribución granulométrica.
- Calcular el coeficiente de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc).

Cálculos.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Coeficiente de uniformidad.}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad \text{Coeficiente de Curvatura.}$$

Donde:

D_{60} Tamaño tal que el 60% en peso del suelo sea igual o menor.

D_{10} Diámetro Efectivo. Es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso del suelo.

D_{30} Tamaño tal que el 30% en peso del suelo sea igual o menor.

Humedad.

La humedad del suelo es la cantidad de agua que este tiene por unidad de masa y es directamente dependiente de los aportes externos de agua, de la capacidad de drenaje del suelo y de la evaporación (Seoáñez, 1999). Generalmente se expresa en porciento y su medición es gravimétrica, es decir, por diferencia de pesos entre la masa de suelo húmedo y la masa de suelo seco.

El equipo que se utilizo para determinar la humedad es la balanza Ohaus MB200, la cual utiliza un principio gravimétrico, en el cual con una fuente de calor evapora el agua presente y muestra un porcentaje de humedad.

Procedimiento:

- Encender la balanza de humedad y dejar calentar por alrededor de 20 minutos hasta alcanzar una temperatura estable y alrededor de 120°C .
- Programar el equipo a 45 minutos con calentamiento constante (120°C).

- Colocar una charola de aluminio sobre la balanza y tarar.
- Colocar en la charola 1 gramo de suelo, cerrar el equipo e iniciar el proceso de secado.
- Al término de los 45 minutos el equipo desplegará el porcentaje de humedad en el display.
- Se retira la charola se limpia y se procede a introducir una nueva muestra.

Determinación de hidrocarburos totales del petróleo. (HTPs)

La determinación de los HTPs, se realizó utilizando el método EPA 9071B. Este método es el que utiliza como material extractable hexano, para muestras de lodo, sedimento y sólidos. Se usa para cuantificar concentraciones de grasas y aceites en suelo, sedimentos, lodos y otros materiales sólidos. Específicamente el método se emplea para extraer hidrocarburos no volátiles, aceites y vegetales, grasas, lípidos biológicos, grasa animal, jabones, ceras y materiales relacionados.

Procedimiento:

- Como la técnica es gravimétrica, se necesita que los matraces bola que se utilizan para llevar a cabo la extracción estén a peso constante, por lo que es necesario que permanezcan en la estufa 24 horas. antes de la prueba y posteriormente 1 hora en el desecador para eliminar toda la humedad presente, en este proceso no se debe tocar los matraces directamente por lo que se debe utilizar guates de látex.
- Se procede a pesar el matraz en una balanza analítica la cual debe estar calibrada, para no tener errores en la determinación.
- Se toman los cartuchos de celulosa destinados para este método y en cada uno se colocan 10 g de suelo, previamente homogeneizado, y posteriormente se colocan 10 g de silicato de sodio anhidro. Se mezclan ambas sustancias y el cartucho se introduce en el soxlet.

- Se miden en una probeta 130 ml de hexano los cuales se procede a depositar en el matraz bola, todo esto se debe hacer en la campana y con mascarilla, para evitar irritación de las vías respiratorias.
- Se procede a abrir el agua de refrigeración para que la condensación del hexano sea total.
- A continuación se conecta el soxlet con el matraz y el refrigerante, y se enciende la mantilla de calentamiento.
- Se deben cubrir 80 ciclos de extracción, donde cada ciclo comprende el llenado del soxlet con el hexano que se condensa y vaciado de este mismo.
- Al término de los 80 ciclos se procede a apagar el mantillo de calentamiento y dejar enfriar aproximadamente 20 minutos el sistema.
- Posteriormente se desmonta el equipo, y se toma el matraz con cuidado, para llevarlo al rotavapor, donde se evaporara la mayoría de hexano.
- Estando montado el matraz bola en el rotavapor se procede a calentar a aproximadamente 55 °C y a 35 rpm, para que la mezcla no se proyecte y pierda hidrocarburo.
- Al consumirse el hexano se desmonta el matraz y se lleva nuevamente a la estufa donde estará por lo menos 2 horas y otra en el desecador para eliminar la humedad y el hexano residual de la muestra.
- Se procede a pesar y por diferencia de peso se obtiene la cantidad de hidrocarburos presentes en el suelo.

Cálculos.

- Calculo de Peso de Hidrocarburos totales del Petróleo.

Peso final de matraz (g) – Peso inicial del matraz (g) = Peso del hidrocarburo extraído.

- Calculo de Peso del Suelo Seco.

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

- Calculo de partes por millón de hidrocarburo.

$$\frac{\text{Peso de hidrocarburo extraído (g)}}{\text{Peso de suelo seco(g)}} \cdot \frac{1000(\text{mg})}{1(\text{g})} \cdot \frac{1000(\text{g})}{1\text{ kg}} = \text{ppm de hidrocarburo (mg/kg)}$$

6.2.3.- Lavado asistido por surfactante.

Para la realización del lavado de suelo se monto el equipo de mezclado, como se presenta en la figura 4.

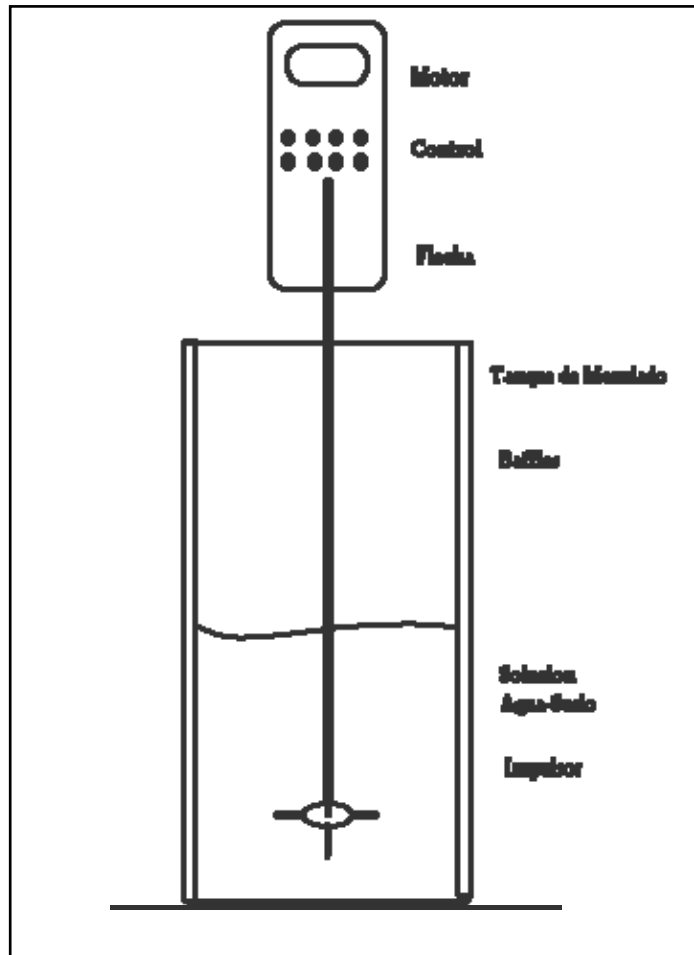


Fig. 4.- Esquema del equipo de lavado

Partes del equipo de mezclado.

- Motor: proporciona la fuerza motriz para realizar el trabajo de mezclado. Como se puede apreciar en la fig. 6 el motor utilizado en el proceso de lavado.
- Flecha: transmite la fuerza motriz al impulsor.
- Impulsor: desarrolla los patrones de flujo para la homogeneización y lavado del suelo.
- Tanque con deflectores: recipiente que contiene la mezcla suelo-agua.

Los tres últimos componentes del equipo de mezclado se pueden apreciar en la fig. 5 donde tenemos colocado el impulsor R-100, suspendido en la flecha. Igualmente el tanque utilizado para la experimentación.

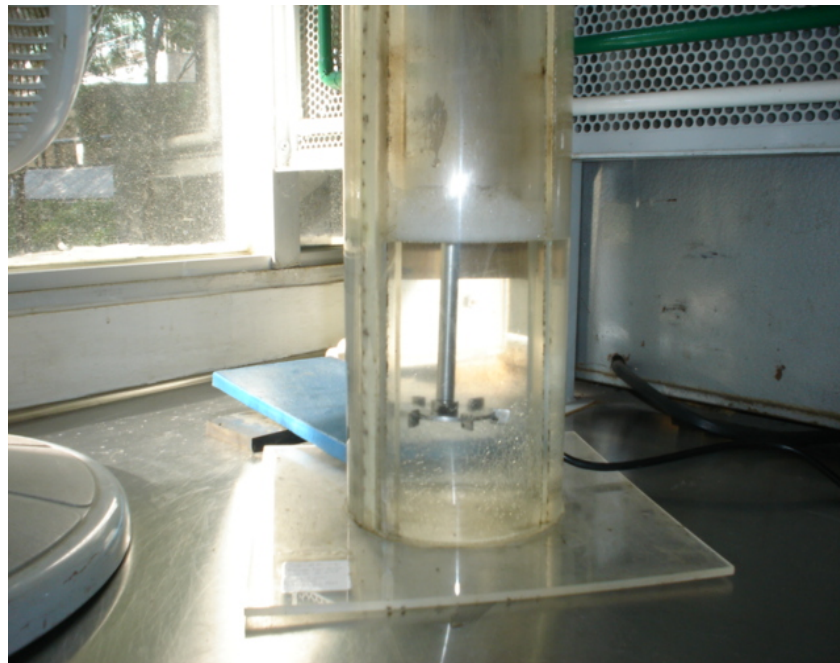


Fig. 5.- Tanque con deflectores.



Fig. 6.- Motor digital.

Condiciones de operación en el lavado.

A continuación se presentan las condiciones de operación del equipo.

Volumen Total de tanque:	6 l
Volumen de Agua + Surfactante	2800 ml
Surfactante	SDS 0.5 %
Diámetro del Tanque	15.24 cm
Altura del tanque.	45 cm
Baffles	4 a 90° (1/10T)
Altura de impulsor.	7.5 cm
z/T	1
Peso de suelo.	550 gr (20% w/v)

En la tabla 16 se muestra las relaciones diámetro del tanque (T), diámetro del impulsor (D) para los diferentes impulsores que se utilizaron en el desarrollo del trabajo.

Tabla 16.- Relaciones D/T

Impulsor	D/T
A-310	0.55
A-100	0.44
R-100	0.45

Operación de Lavado.

Las pruebas de lavado se realizaron con la siguiente secuencia:

- Encender el motor mezclador Lightnin y calibrarlo, para determinar que las lecturas de potencia, torque y de capacidad de bombeo son las correctas, de acuerdo al procedimiento del manual del equipo.
- Programarlo con la velocidad de agitación requerida, el impulsor que se va a usar, el diámetro del impulsor y el cronómetro de tiempo en cero.
- En el tanque de mezclado se agregan 2,800 ml de solución de SDS al 0.5% w/w, y se procede a agregar 550 gr de suelo contaminado o según se requiera en la prueba, ya que se manejan diferentes condiciones.
- Se procede a arrancar el equipo para iniciar el lavado que durara determinado tiempo.
- Conforme se vaya dando el lavado se tomar lecturas de potencia y torque.
- Se detiene el equipo y se apaga.
- Se procede a retirar el recipiente, y decantar la fase acuosa.
- Se separa el suelo y se deja secar por tres días.
- Estando seco el suelo se le determina la humedad y posteriormente el contenido de HTPs.

- Se calcula el porcentaje de remoción con respecto a la muestra original.

Se puede observar en la fig. 7 la operación de lavado, el motor esta trabajando a determinadas condiciones.



Fig. 7.- Operación del equipo de mezclado

Cálculos.

$$\% \text{ de remoción} = \frac{\text{mg/kg de HTPs iniciales} - \text{mg/kg de HTPs después del lavado}}{\text{mg/kg de HTPs iniciales}} \times 100$$

Cinética de lavado.

Esta prueba se realiza con el fin de conocer en que tiempo se lleva a cabo la desorción máxima del hidrocarburo del suelo, ya que se alcanza un equilibrio fisicoquímico, entre la fase acuosa y la fase sólida.

- Se realiza el mismo procedimiento que en las pruebas de lavado, solo que además de tomar lecturas de potencia y torque, se toman muestras (2-3 ml) de la fase acuosa, a cada determinado tiempo.
- Las muestras que se toman de la fase acuosa se dejan reposar aproximadamente 30 minutos.
- Se toma una alícuota de 100 microlitros y se diluye a 10 ml.
- Esta última se agita un poco y se introduce en una celda.
- La celda es llevada a un espectrofotómetro que trabaja a 620 nm, el cual nos proporcionara una lectura de absorbancia.
- Se monitorea el proceso con las lecturas de absorbancia y cuando esta sea constante podemos decir que el sistema llego a un equilibrio.
- Con lo anterior se da por terminada la prueba.

6.2.4.- Error experimental.

En toda secuencia experimental se debe determinar que tan dispersos están los resultados, ya que las diferencias mostradas la repetir un mismo evento, con las mismas condiciones deben de tener diferencias debido a variables que muchas veces dependen del experimentador.

En este caso se decidió realizar solo un duplicado, ya que la cantidad de suelo lo restringe. La corrida de lavado que se llevo a cabo con su duplicado tuvo las siguientes características: impulsor A-310, velocidad de agitación igual a 1,200 rpm, 2,800 ml de solución de SDS al 0.5% w/v, 550 gr de suelo contaminado, con un horizonte de impulsor de un diámetro de impulsor y un tiempo de operación de 180 minutos.

El dato con el cual se va a realizar la determinación del error experimental es el porcentaje de remoción obtenido en las dos pruebas por lo que las ecuaciones son las siguientes:

$$X = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Media Aritmética

$$D = \sqrt{\frac{(X_1 - X)^2 + (X_2 - X)^2}{2}}$$

Desviación Estándar

$$E_i = \frac{|X - X_i|}{X} \cdot 100$$

Error Experimental

Donde:

 X

Media Aritmética

 D

Desviación estándar.

 X_1, X_2, \dots

Porcentaje de remoción en prueba 1, 2 ...

 $E_i = E_{1,2,3, \dots}$

Error experimental para la prueba 1, 2, ...

 X_i

X.....

7.- Resultados.

7.1.- Granulometría del suelo.

La técnica de granulometría como se menciona con anterioridad es un análisis cuantitativo de la distribución de pesos de tamaño de la partícula. Los resultados mostrados para la distribución del tamaño de partícula, se muestran en la fig. 8, donde la cantidad mayoritaria de suelo tiene un tamaño de 0.445 mm, y la menor cantidad son las partículas finas de 0.15 mm. Según la clasificación del suelo en su gran mayoría es arenoso.

Arena gruesa: Partículas de diámetro nominal entre 4.75 y 2.00 mm.

Arena media: Partículas de diámetro nominal entre 2.00 y 0.425 mm.

Arena fina: Partículas de diámetro nominal entre 0.425 y 0.075 mm.

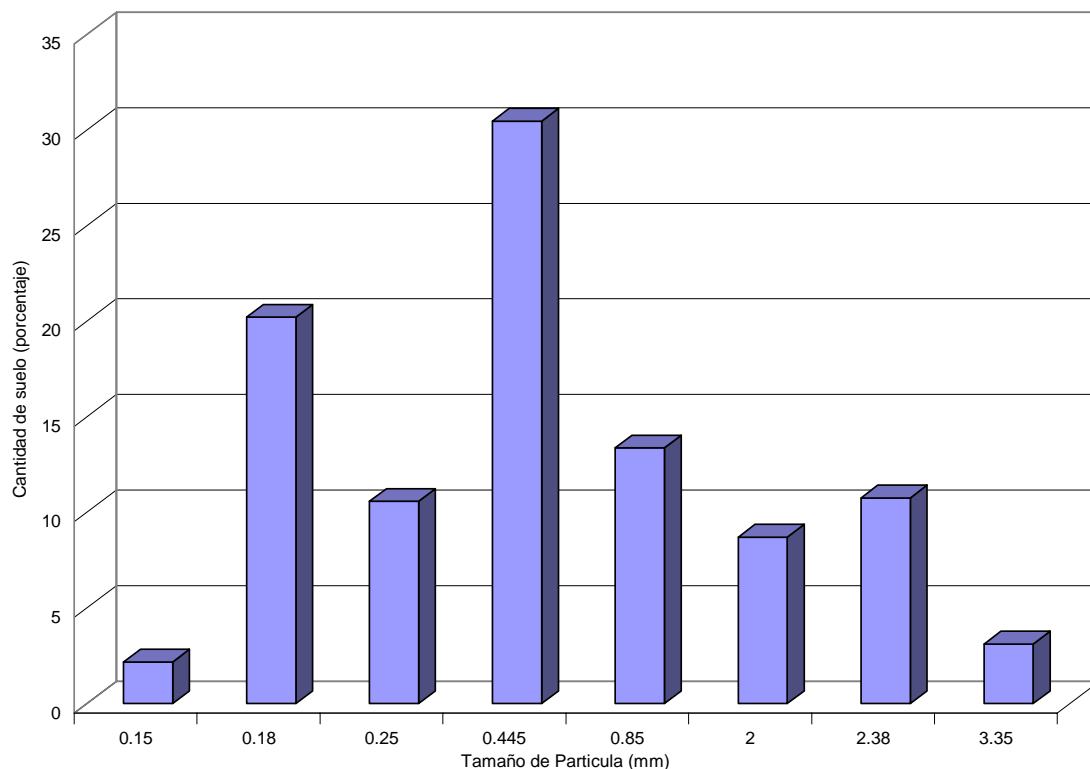


Fig. 8.- Distribución de peso por tamaño de partícula

En la fig. 9 se muestra la curva granulométrica donde se puede obtener datos para obtener el coeficiente de curvatura y el coeficiente de uniformidad, los cuales interpolando en la grafica, se obtienen los siguientes valores.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.472$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} = 0.7802$$

Según la clasificación del SUCS se requiere que el C_u sea mayor de 6 y el C_c entre 1 y 3, pero como esto no se satisface se toma el siguiente criterio. Es una arena mal graduada, esto es mezcla de arena y grava con poco o nada de finos.

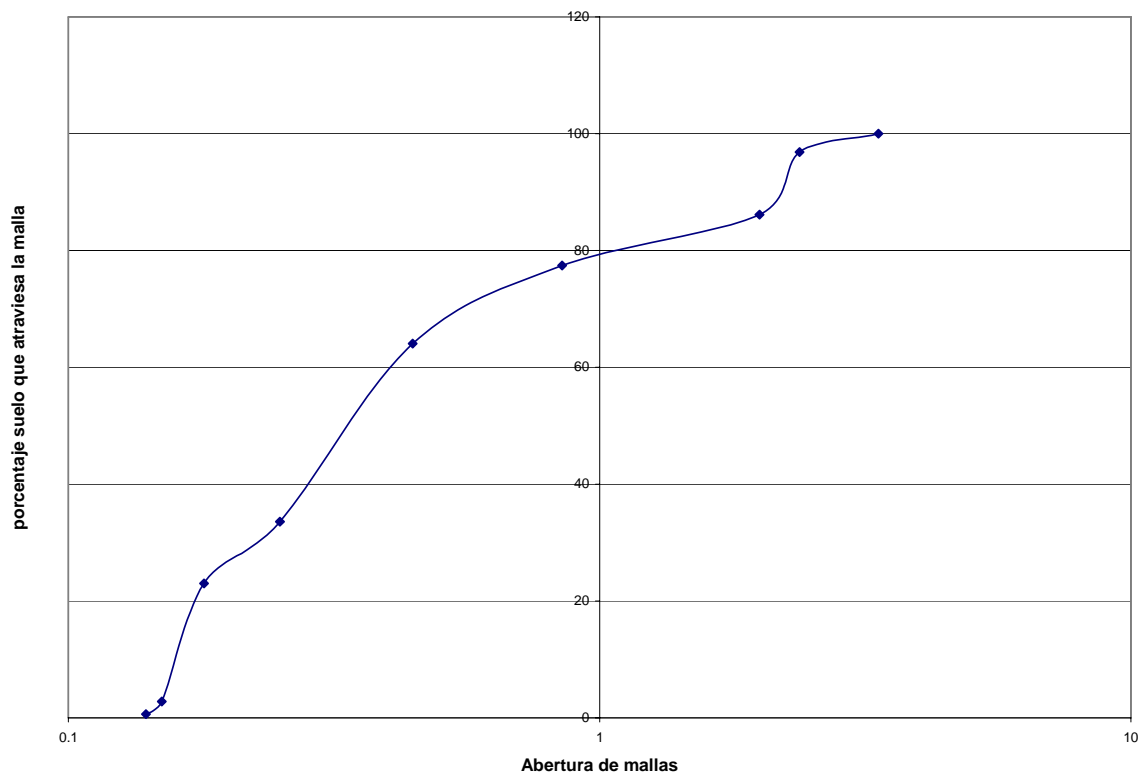


Fig. 9.- Curva granulométrica

7.2.- Pruebas preliminares con suelo original.

El suelo se ve modificado de una manera muy drástica al ser contaminado como lo menciona Martínez (2000), ya que es necesario saber hasta que grado se ve afectado el suelo, para posteriormente saber cual es el tratamiento a seguir. Algunos cambios que se demostraron al agregar gasolina al suelo (Martínez, 2000) fue un incremento en los valores de arena y arcillas, disminuyendo los limos, mientras que con combustóleo las arenas aumentan y la materia orgánica tiene la misma tendencia. Con lo que respecta a la densidad real disminuyó en ambos casos. Estos cambios sin lugar a duda se ven reflejados en las pruebas de lavado, ya que dependiendo del suelo la eficiencia aumenta o disminuye.

El suelo del que se disponía contenía partículas demasiado grandes de aproximadamente 1.27 cm, las cuales son conglomerados de hidrocarburo con partículas de suelo, por lo que se decidió realizar pruebas de lavado tomando en cuenta la cinética de lavado, para determinar el tiempo total en el que se alcanzo el equilibrio. Se tienen concentraciones de hasta 200,000 ppm de HTP. El primer paso fue determinar la cinética de lavado para cada impulsor obteniendo los siguientes resultados.

Como se puede observar en las figuras 10, 11 y 12 se obtuvo para el impulsor A-310 un equilibrio fisicoquímico en el minuto 300. Para el impulsor A-100, el equilibrio se alcanzó a los 400 minutos y para el R-100 a los 220 minutos. Cabe decir que la absorbancia se realizo con una longitud de onda igual a 620 nm en todas las cinéticas.

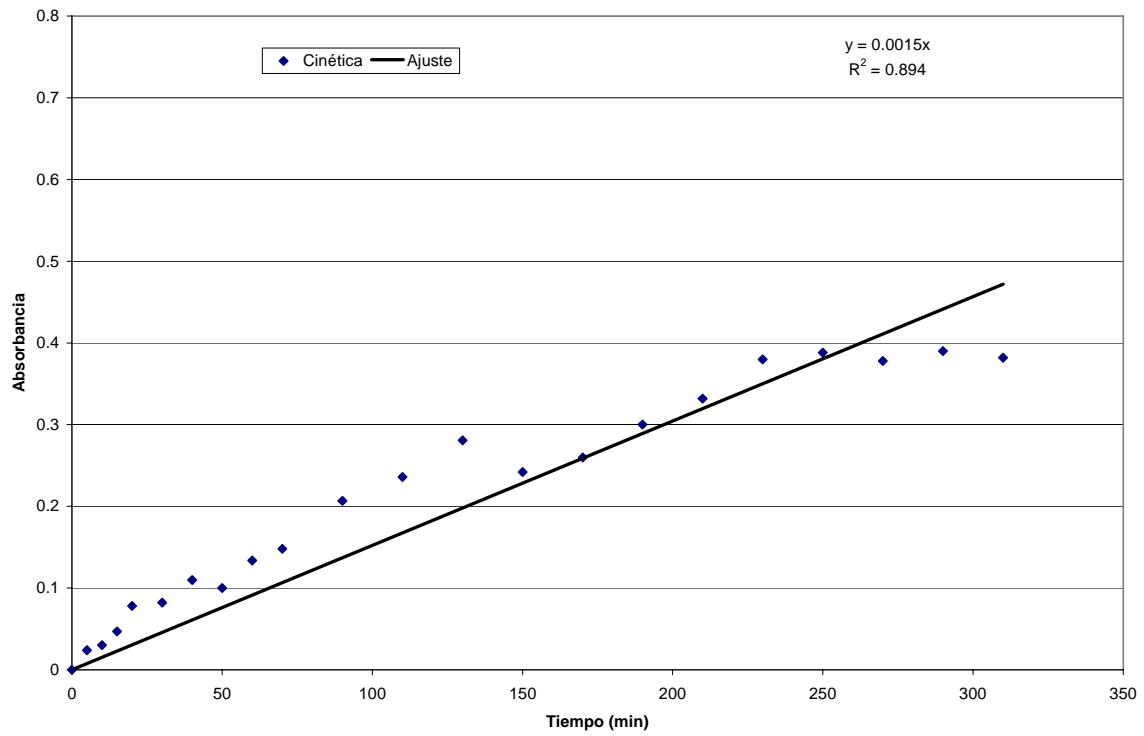


Fig. 10.- Cinética de lavado para impulsor A-310

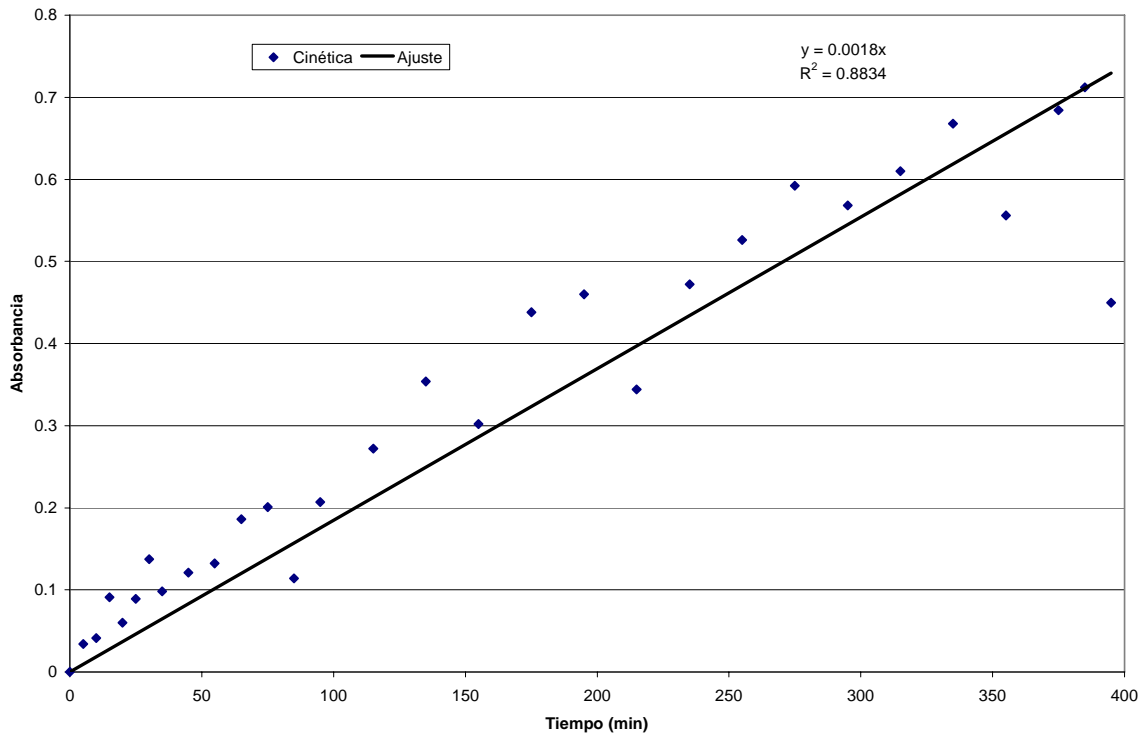


Fig.11.- Cinética de lavado para impulsor A-100

Claramente se observa en las figuras 10,11 y 12 las tendencias de desorción de hidrocarburo del suelo, ya que el objeto del surfactante es desorber el hidrocarburo y otros compuestos tales como metales o compuestos inorgánicos. Con la determinación de la absorbancia en cada lapso de tiempo se lleva un monitoreo de lo que ocurre en el sistema, ya que cada lectura de absorbancia obtenida es la cantidad de luz dispersa en cierto intervalo de longitud de onda. Estos resultados son relativos ya que están basados en un blanco el cual es agua destilada.

Con estos datos se determina que el impulsor con mejor eficiencia fue el R-100, ya que el equilibrio fisicoquímico lo alcanza a los 220 minutos, esto es, se alcanzó la máxima remoción posible como se puede observar en la figura 12.

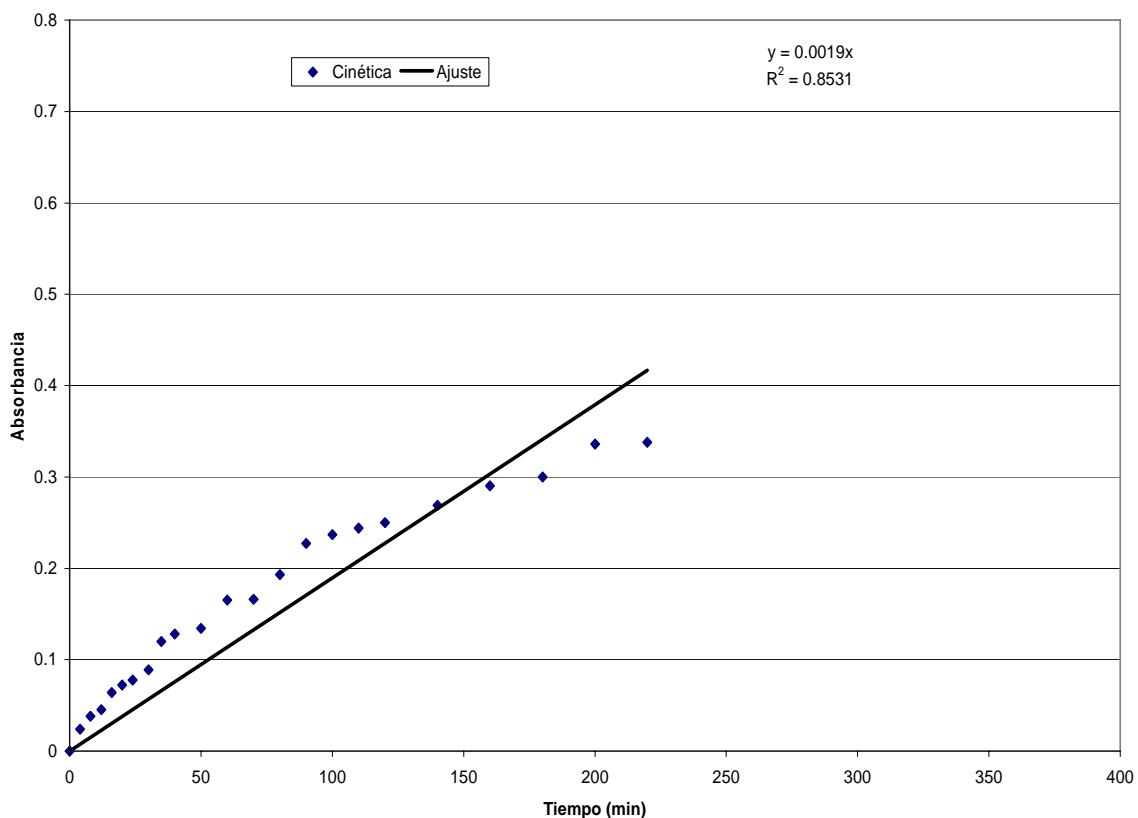


Fig.12.- Cinética de lavado para impulsor R-100

En las graficas de cinética de lavado se muestran las tendencias y por medio de regresiones de tipo lineal se trata de reproducir este fenómeno a lo largo del tiempo, este modelo matemático cambia para cada tipo de impulsor ya que este tiene diferente naturaleza y genera patrones de flujo muy distintos como lo afirma Kumaresan (2005).

Es común observar diferentes comportamientos según el impulsor que se utiliza, ya que el flujo patrón que genera y el numero de potencia (N_p) en un tanque agitado depende del número de paletas, forma de las paletas, ángulo de inclinación de las paletas respecto al eje, la dirección de bombeo y la interacción del fluido con las paredes del recipiente, entre muchos factores.

Al termino de las cinéticas de lavado se procede a secar el suelo a temperatura ambiente, en un tiempo de aproximadamente 48 horas. Al terminar de secarse el suelo en esta primera experiencia se logró observar que gran cantidad de hidrocarburo quedaba inmersa dentro del suelo y muchas veces ya no era únicamente suelo sino más bien petróleo separado totalmente del suelo. Esto es, el hidrocarburo al estar en agitación se dispersaba en pequeñas partículas sólidas, que al término del lavado sedimentaban para posteriormente volverse a compactar cuando el suelo era secado.

Por esta situación se decidió que las partículas de tamaño igual a 1.27 cm y 0.95 cm, se eliminaran del suelo de estudio y trabajar mallas con abertura inferior a 0.95 cm.

La curva granulométrica que se presenta en la fig. 9 esta referida sin tomar en cuenta estos dos tamaño de partícula, lo cual en la realidad, de un suelo totalmente contaminado y con estas concentraciones es muy costoso retirar las partículas con este tamaño, por lo que se decide meter todo el suelo a tratamiento o antes tamizarlo y separar estos tamaño de partícula para posteriormente ser quemadas o disponer de ellas para un uso de recubrimiento de carpetas asfálticas.

7.3.- Cinéticas de lavado.

Las cinéticas de lavado permiten determinar el tiempo en que se logra el equilibrio fisicoquímico entre las fases por lo que se realiza para los tres impulsores con un tamaño de partícula de 0.15 mm a 3.35 mm.

A continuación se muestran las figuras 13, 14 y 15, que describen los comportamientos con cada uno de los impulsores. Cabe decir que la longitud de onda a la cual se realizó la absorbancia fue de 620 nm.

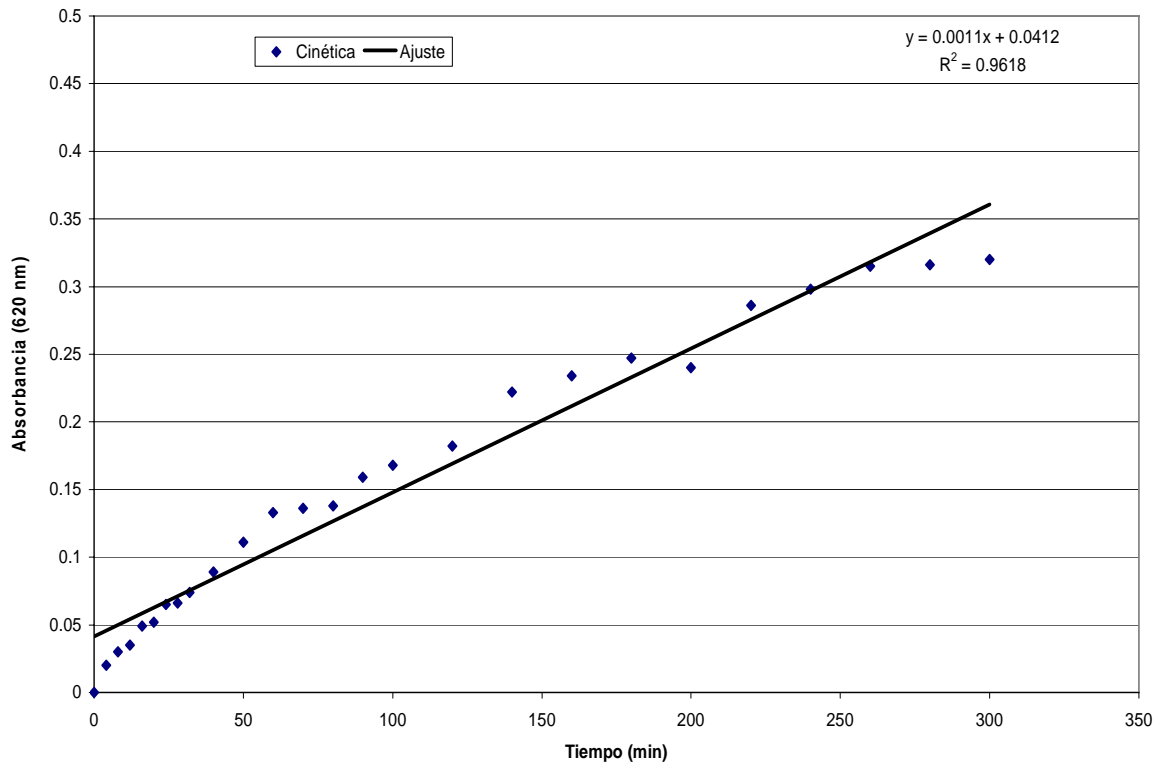


Fig. 13.- Cinética de lavado para impulsor A-310

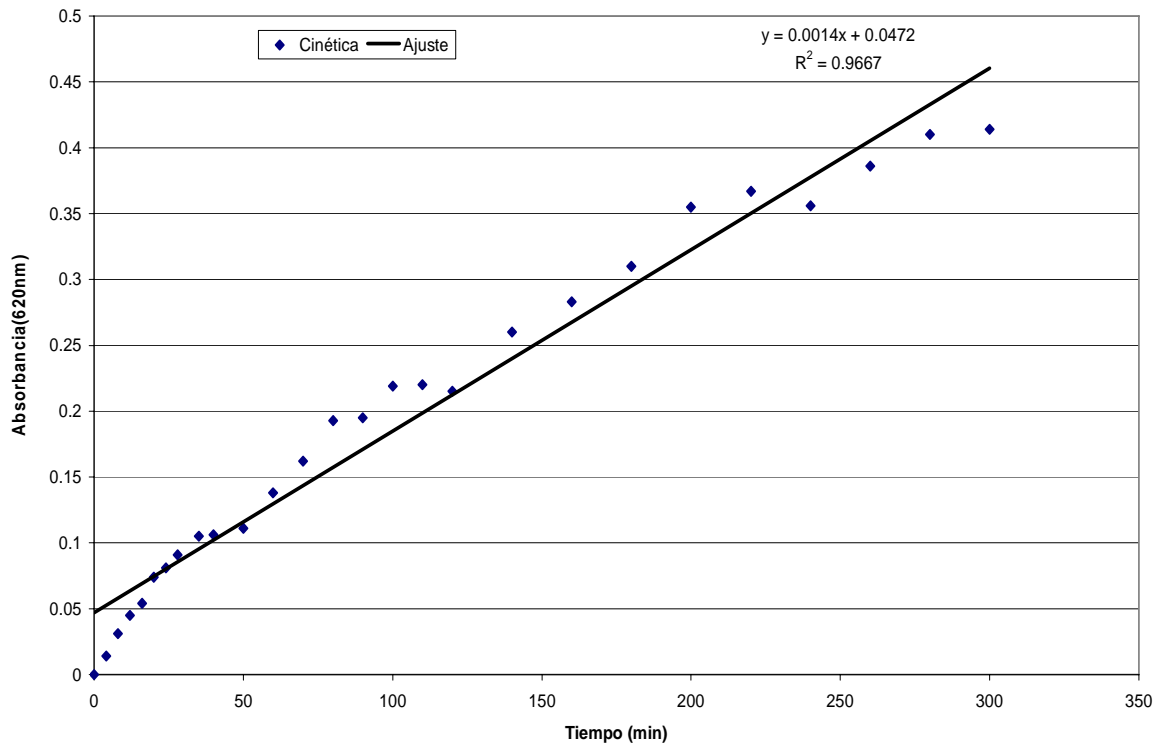


Fig. 14.- Cinética de lavado para impulsor A-100

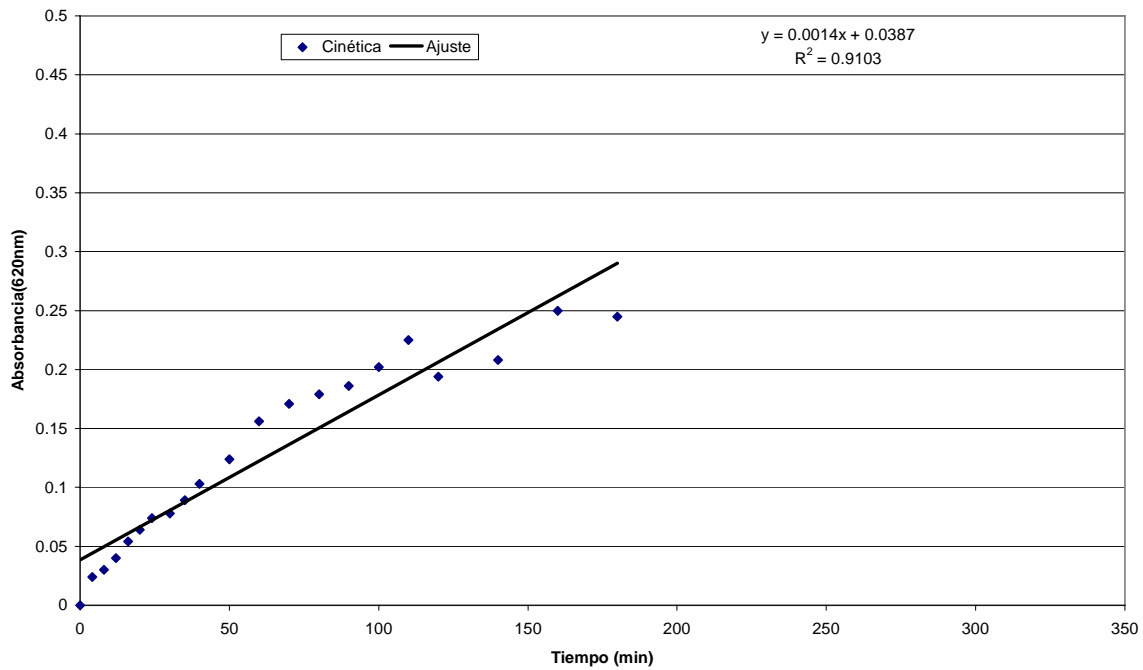


Fig. 15.- Cinética de lavado para impulsor R-100

Como se puede observar en la figura 13 y 14 que pertenecen a los impulsores A-310 y A-100, se observa una tendencia lineal hasta el punto donde la absorbancia comienza a ser constante, es decir donde se alcanza el equilibrio. El tiempo de remoción máxima se alcanza en ambos casos en aproximadamente 300 minutos, mientras que para el impulsor R-100 se alcanza en 180 minutos (fig. 15).

Se muestran las tendencias lineales que dan una aproximación matemática de como es el comportamiento de la desorción del hidrocarburo en el proceso, aunque cabe resaltar que no define en su totalidad el fenómeno.

Se puede decir que es más eficiente a las condiciones de lavado y además por el menor tiempo en que alcanza el equilibrio, el impulsor R-100. Ya que en 180 minutos el sistema es estable.

7.4.- Efecto de la granulometría.

Uno de los efectos que se estudió fue como repercute el tamaño de partícula en la eficiencia de lavado y en el consumo de potencia. Se puede observar en la figura 16 que la tendencia en el consumo de potencia es comenzar en un máximo que se mantiene en la figura 18, pero al paso del tiempo ocurre una disminución drástica en los primeros 20 o 30 minutos.

En la grafica 16 el barrido de tamaño de partícula va de 0.15 a 0.85 mm, mientras que en las figuras 17 y 18 va de 0.15 a 2.38 mm y 0.15 a 3.35 mm respectivamente. La tendencia es comenzar en un máximo de consumo de energía de 25-26 watts y terminar en un valor mínimo que va de 18-19 watts para los tres casos. Cabe resaltar que la pendiente en la disminución de potencia y torque difiere en estas tres distribuciones.

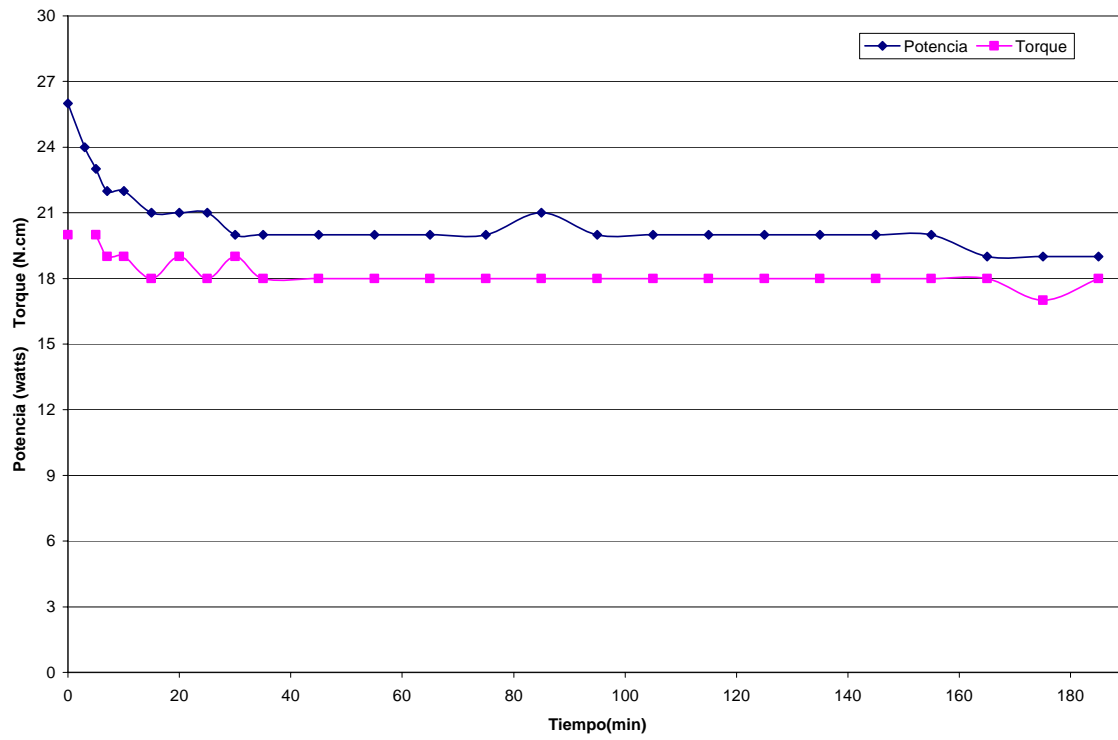


Fig. 16.- Granulometría (0.15-0.85mm)

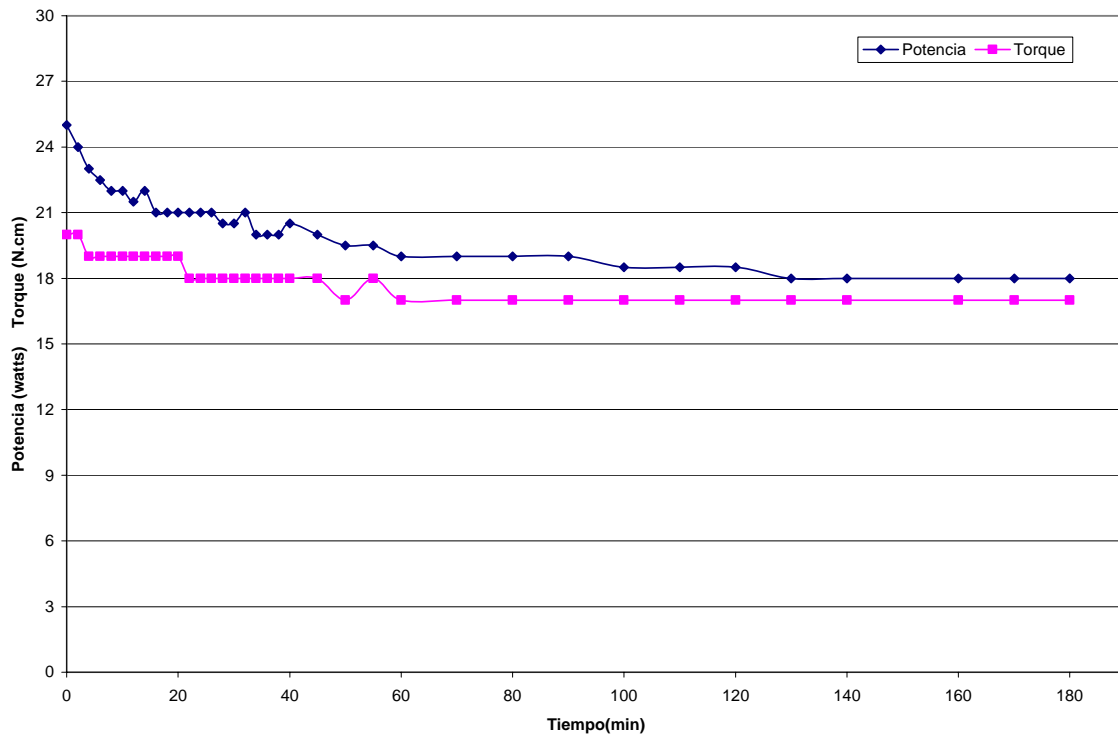


Fig. 17.- Granulometría (0.15-3.38mm)

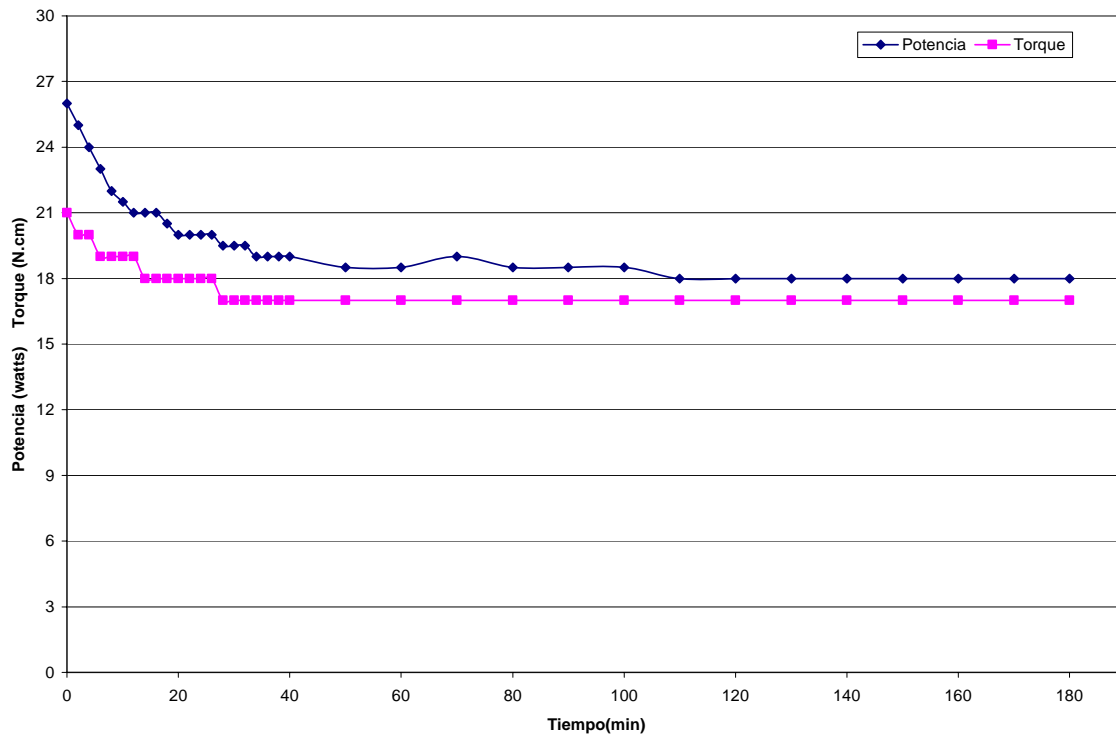


Fig. 18.- Granulometría (0.15- 3.35 mm)

La energía es un parámetro que debemos calcular para así cuantificar el consumo a lo largo del tiempo, por lo que se decidió utilizar el método de los rectángulos, el cual es una aproximación de la suma del área de varios rectángulos bajo la curva, que describe la grafica de potencia vs tiempo.

En la fig. 19 se muestra un ejemplo de la suma de los rectángulos para calcular la energía total consumida. Con intervalos determinados de tiempo se toma la potencia máxima, y con esto se obtiene el área multiplicando tiempo por potencia, que es igual a energía en J. Se tomo el caso de la granulometría de 0.15-2.38 mm, obteniendo una área bajo la curva de 208 kJ.

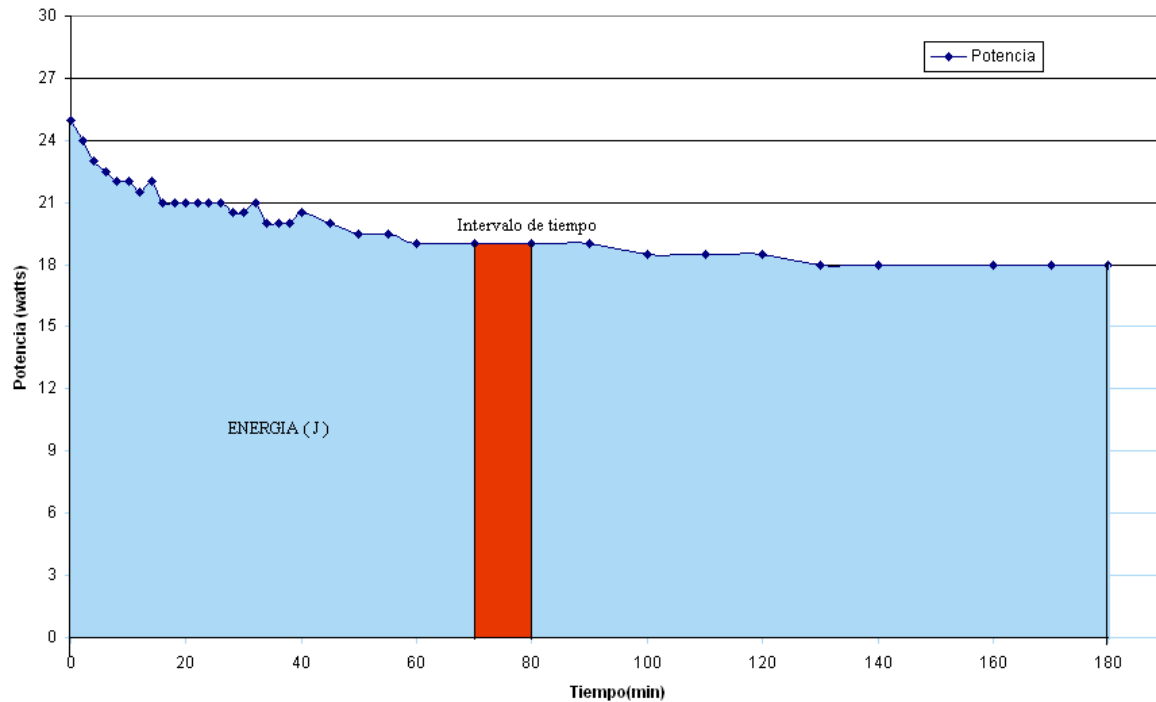


Fig. 19.- Área bajo la curva. (0.15-2.38 mm)

En la fig. 20 podemos observar que el consumo de energía, el cual se obtiene integrando el área bajo la curva de la potencia vs tiempo a diferente tamaño de partícula, es distinta. Tenemos que para partículas de 0.15 a 0.85 mm el consumo en potencia es de 225 kJ, mientras que para partículas de 0.15 a 2.38 mm el consumo es de 208 kJ y para partículas de 0.15 a 3.35 mm se consumen 204 kJ. Este efecto se debe a las fuerzas que interactúan en el sistema, como podemos ver las que tienen mayor aporte son las cinéticas ya que las viscosas se ven más afectadas en partículas de menor tamaño.

Otro factor que se ve seriamente afectado es el decremento del N_p conforme se incrementa la concentración de sólidos o que las partículas tengan mayor tamaño (Kraume, 2006).

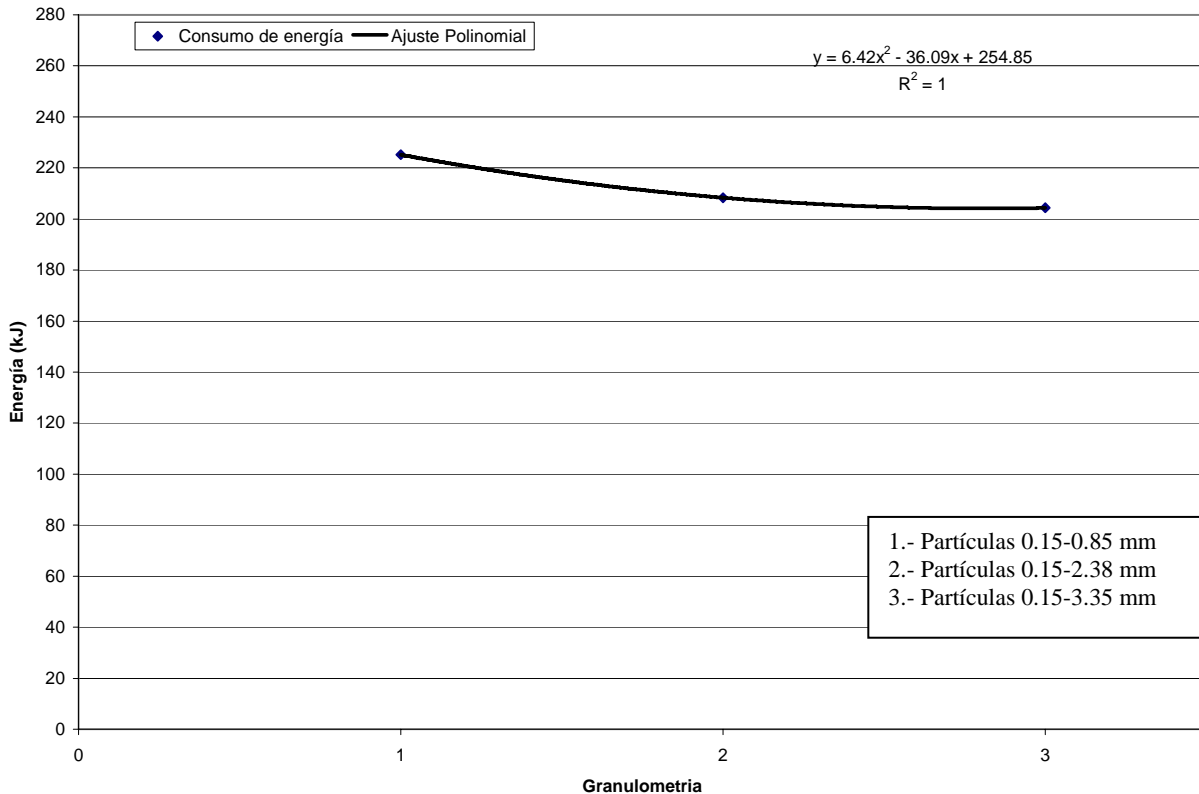


Fig. 20.- Efecto de la granulometría del suelo sobre el consumo de potencia

7.5.- Efecto de la concentración del suelo.

Como se menciona en la hipótesis se trata de buscar las condiciones óptimas de lavado, donde con el menor consumo de energía se logre la mayor remoción de hidrocarburo, por lo que otra de las variables a estudiar es la concentración de sólidos.

Se decidió trabajar con la siguiente relación de sólidos manteniendo el volumen de solución constante, es decir, 2800 ml de agua + surfactante; 10 %, 20%, 30% y 40 % w/w.

Las condiciones de operación del equipo de mezclado fueron las siguientes: 180 minutos de lavado, 2800 ml de solución (5% w/v) y 1400 rpm. El impulsor que se utilizó para realizar estas pruebas fue el A-310, y se obtuvieron los siguientes resultados.

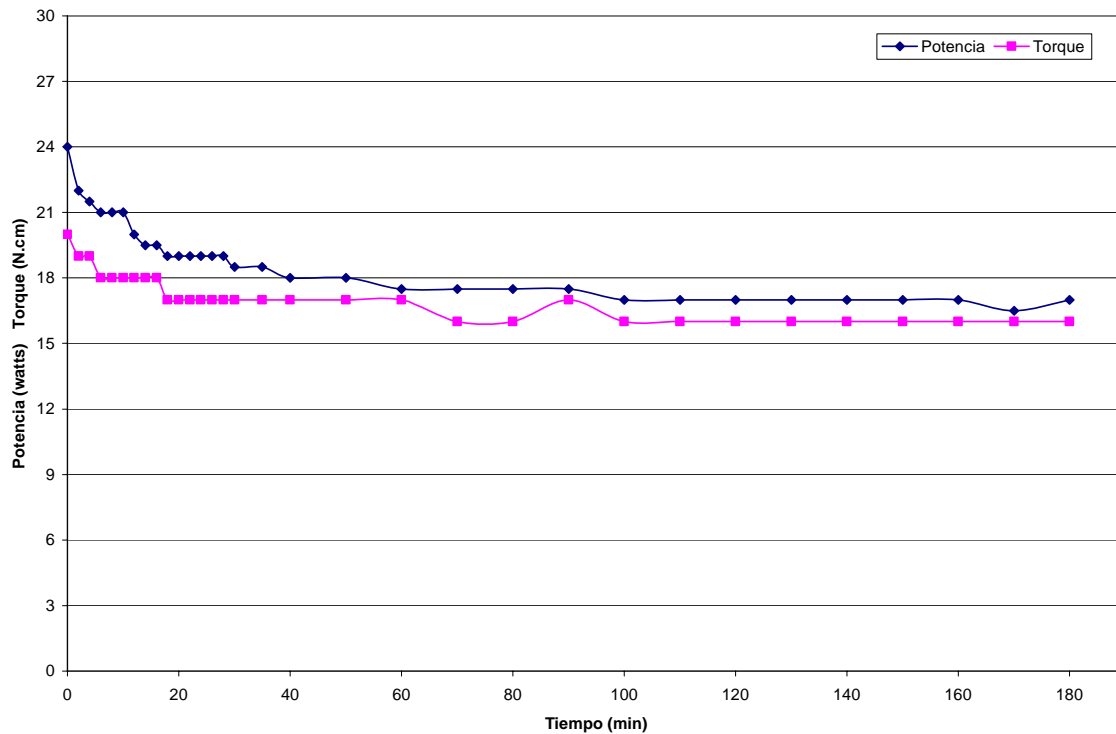


Fig. 21.- Efecto de la concentración 10% w/w

En la figura 21 se muestran los consumos de potencia para una concentración de 10% w/w, donde el consumo máximo es de 24 watts en el tiempo cero. Este consumo es requerido en los primeros minutos del proceso para homogeneizar el tamaño de partícula debido a que se trabajó con un tamaño muy diverso de partículas, que va desde 0.15 mm hasta 3.35 mm.

El proceso de mezclado inicia con un punto máximo de consumo en todos los casos, pero al transcurrir el tiempo se lleva a cabo el proceso de desorción, ya que el hidrocarburo empieza a ser desorbido del suelo. En las figuras 22, 23 y 24 se muestra al 20, 30 y 40% w/w de sólidos con respecto al volumen de solución surfactante-solución. El consumo inicial de potencia es el mismo para todos los casos (26 watts), pero al paso del tiempo por lo que anteriormente se comentó, el consumo de potencia comienza a disminuir.

Es claro que a un tiempo determinado por el mezclado la potencia comienza a ser constante, aunque para cada caso la potencia final consumida es diferente. Se puede observar en la fig. 24 que el mínimo consumo es de aproximadamente 22.5 watts (40%) mientras que para el caso de 10% de sólidos el consumo mínimo es de 17 watts.

Se observa la tendencia de que al aumentar la cantidad de sólidos, la potencia consumida aumenta en el punto mínimo de consumo. Ya que la potencia inicial es la misma en todos los casos. Según Kraume (2006) al aumentar la concentración de sólidos, la potencia tiende a disminuir, lo cual en este caso no sucedió. Esto se puede deber a que los sólidos usados tienen un tamaño determinado y forma todo el tiempo, mientras que el suelo cambia de tamaño y forma a lo largo del lavado, ya que una gran parte del consumo de energía es utilizado para la homogeneización de la mezcla.

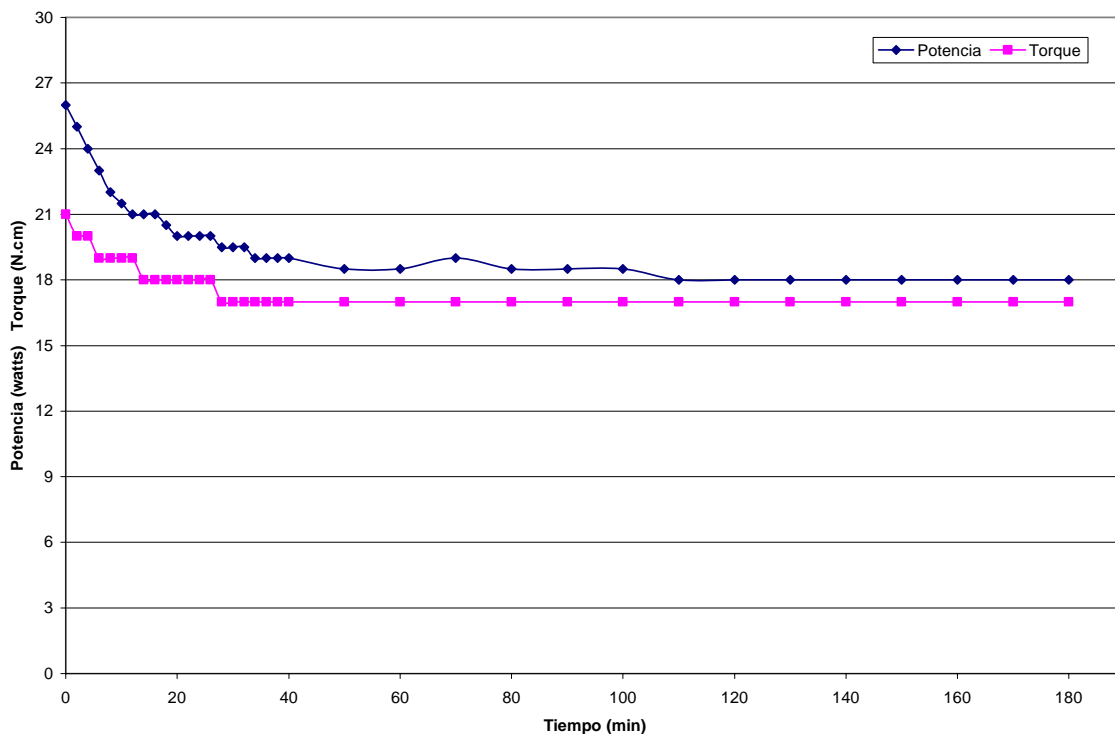


Fig. 22.- Efecto de la concentración 20% w/w

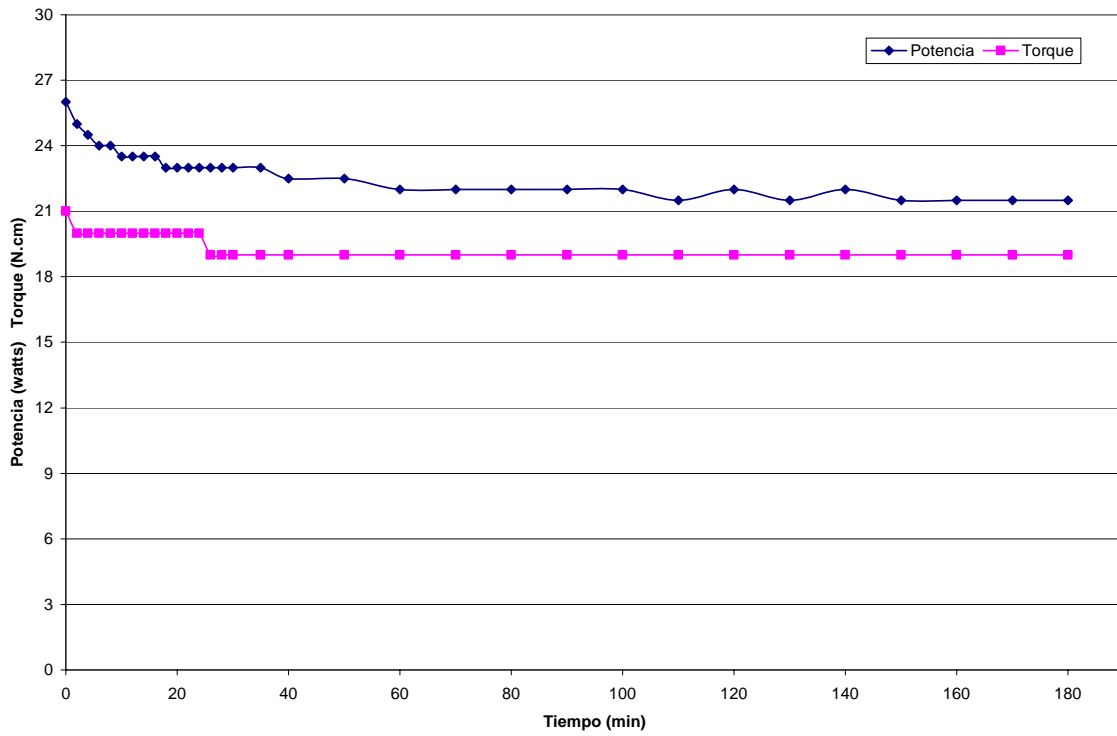


Fig. 23.- Efecto de la concentración 30% w/w

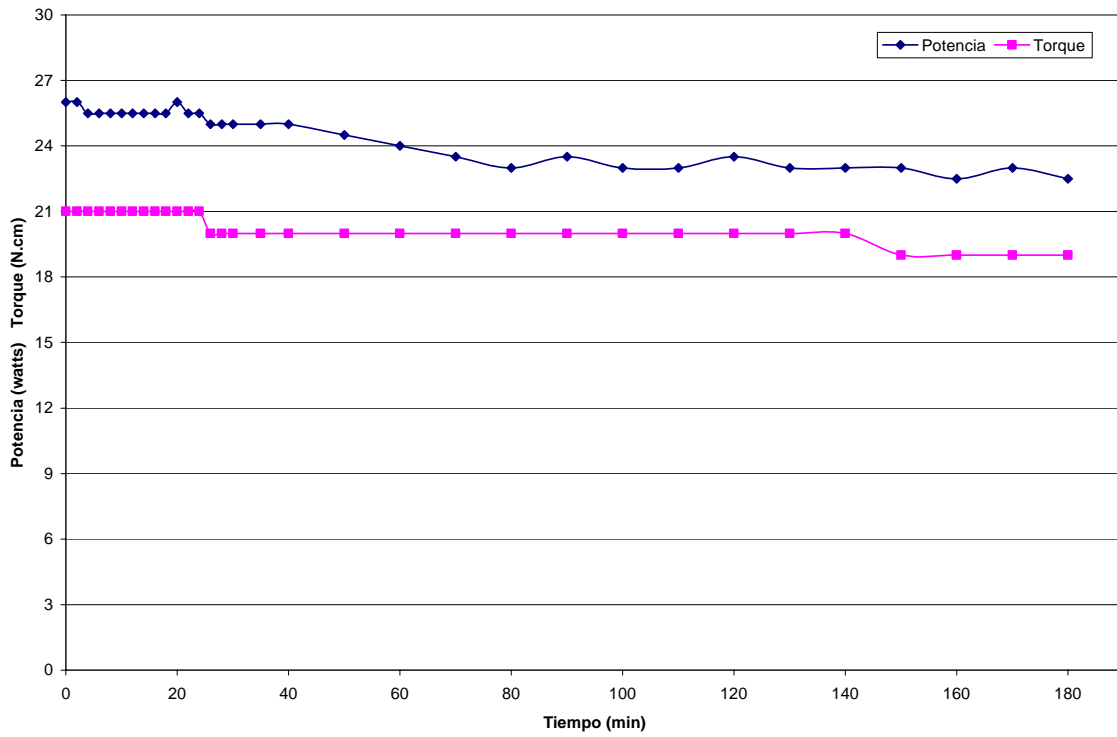


Fig. 24.- Efecto de la concentración 40% w/w

En la figura 25 se muestra de forma integrada la energía consumida en el proceso a diferentes concentraciones de suelo. Como era de esperarse el consumo de mayor energía es a 40% de sólidos, el consumo de potencia para agua, fue ligeramente mayor que el medido para la concentración de 10% w/w.

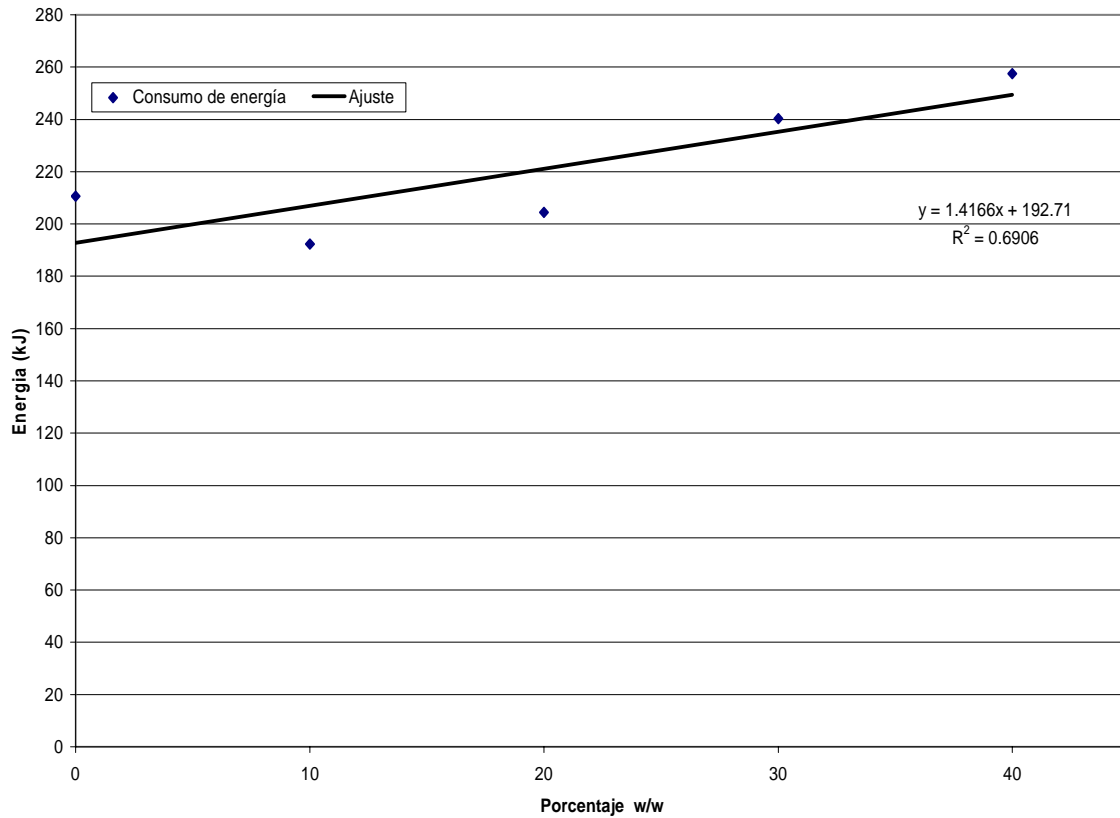


Fig. 25.- Efecto de la concentración del suelo sobre el consumo de potencia

7.6.- Efecto de la velocidad de agitación.

Este estudio se realizó a diferentes velocidades, donde se determinó que cualquier velocidad de prueba de lavado debía ser mayor a la velocidad mínima de agitación para mantener suspendido los sólidos (Njs), del sistema, ya que en trabajos previos, se comprobó que se logra una mejor remoción trabajando por arriba de este valor (Climent, 2007).

Se hicieron pruebas preliminares de la Njs y para una concentración de 10% w/w de sólidos estaba alrededor de 950 rpm, por lo que las velocidades que se decidieron fueron las siguientes: 1000, 1200, 1400, 1600 y 1800 rpm.

El sistema como se ha mencionado tuvo las siguientes características constantes en todas las pruebas:

Volumen solución (0.5% SDS) = 2800 ml.

Peso de suelo (20% w/w) = 550 gr.

Tiempo de lavado = 180 minutos.

Tanque con deflectores.

Altura del impulsor = un diámetro de impulsor.

Las características que se modificaron en el sistema son:

Tipo de impulsor (R-100, A-100, A-310) y la velocidad de agitación (1000, 1200, 1400, 1600 y 1800rpm).

Las características de los impulsores se describen en la tabla 17.

Tabla 17.- Características de impulsores

Impulsor	D/T	Diámetro (mm)	Tipo.
A-310	0.55	84	Radial y Axial.
A-100	0.44	66	Axial.
R-100	0.45	70	Radial.

7.6.1.- Determinación de potencia y torque en el sistema

El consumo de potencia es una variable muy importante en el proceso de lavado asistido por surfactantes, por lo que se decidió hacer un monitoreo a lo largo del tiempo de éste parámetro, igual que en los casos anteriores. A continuación se presentan graficas de los valores de potencia y torque, con el fin de observar la tendencia que se muestra en todos los casos. Se determino presentar las graficas para cada uno de los impulsores a diferentes velocidades de agitación observando que la tendencia es la misma.

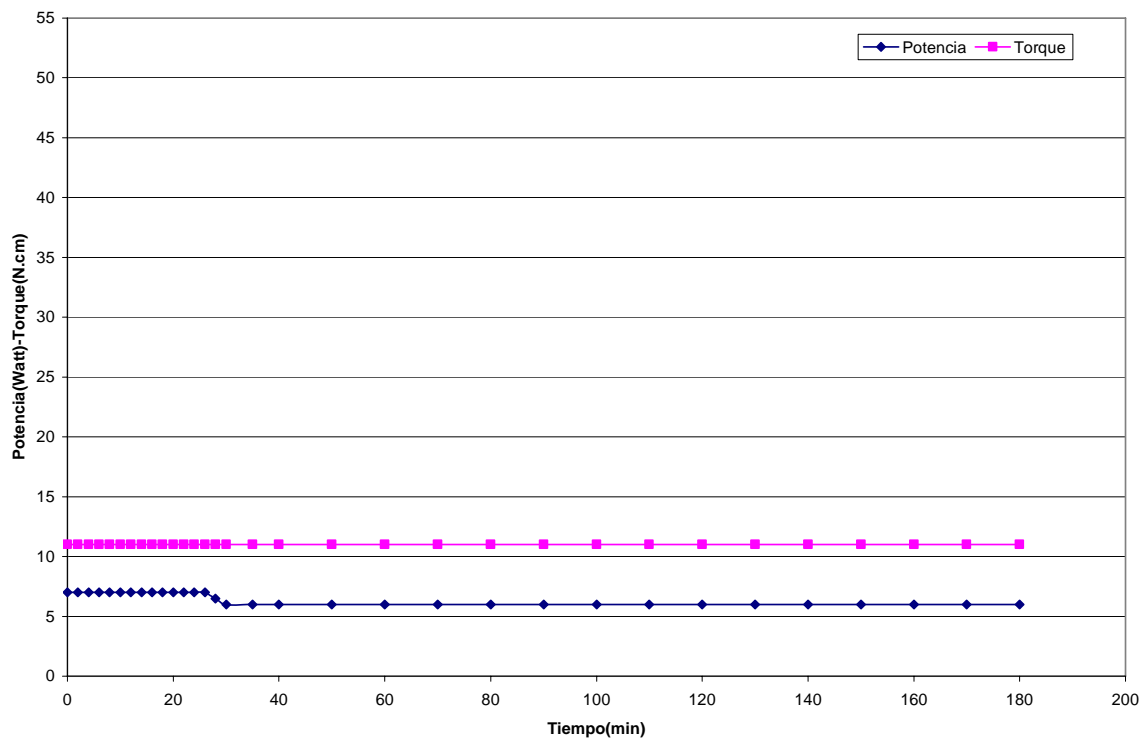


Fig. 26.- Impulsor A-310, velocidad de 1000 rpm

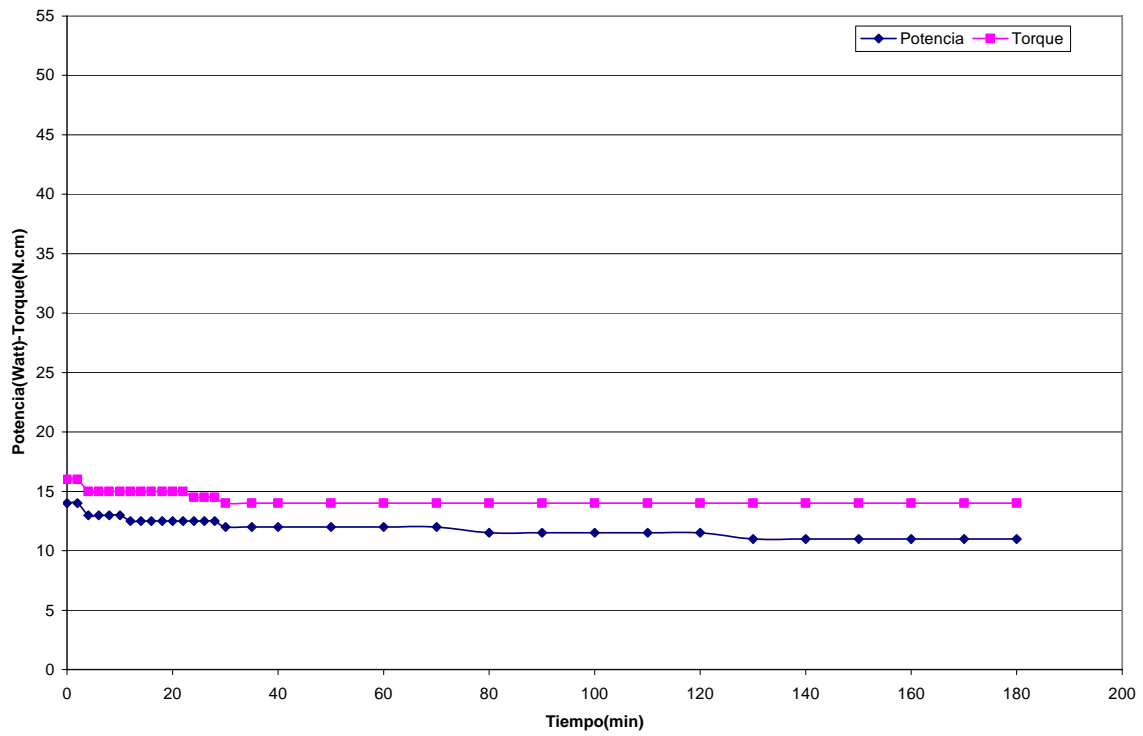


Fig. 27.- Impulsor A-310, velocidad de 1200 rpm

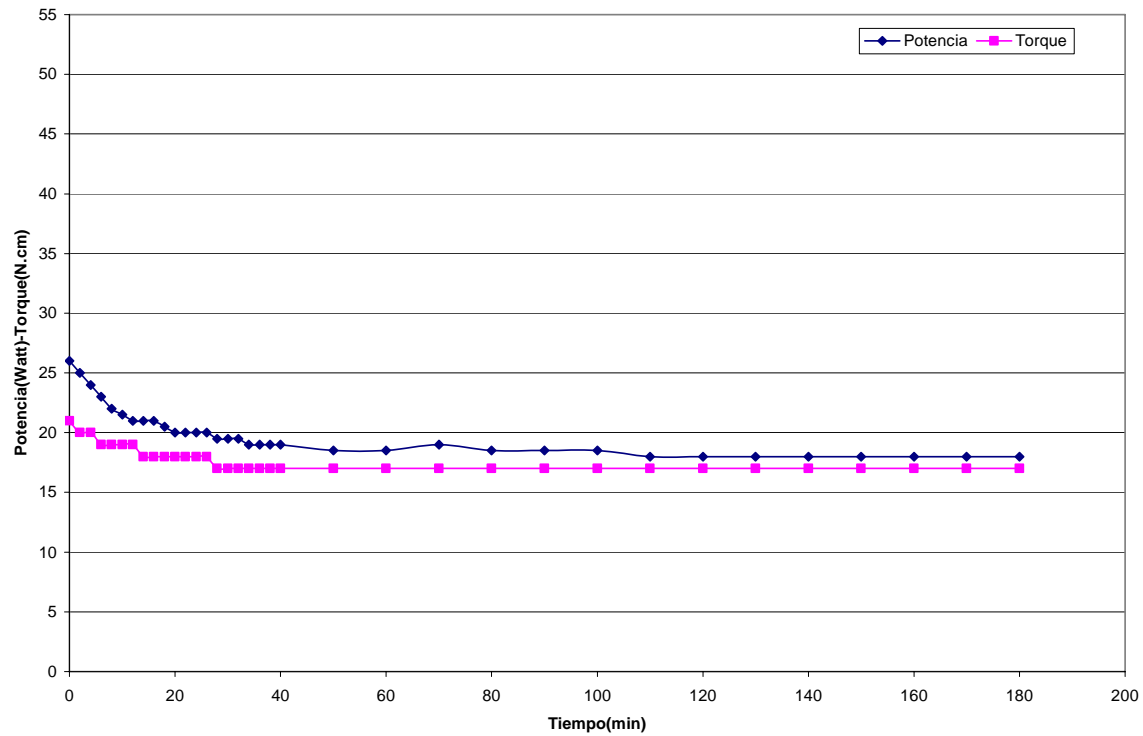


Fig. 28.- Impulsor A-310, velocidad de 1400 rpm

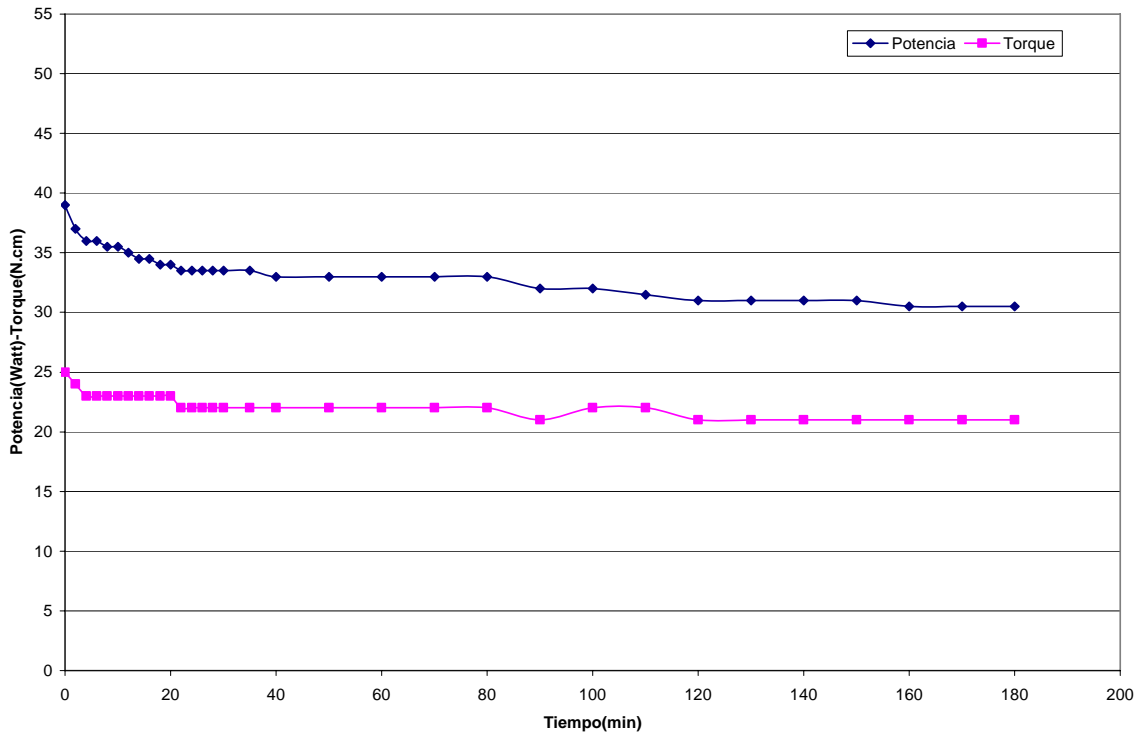


Fig. 29.- Impulsor A-310, velocidad de 1600 rpm

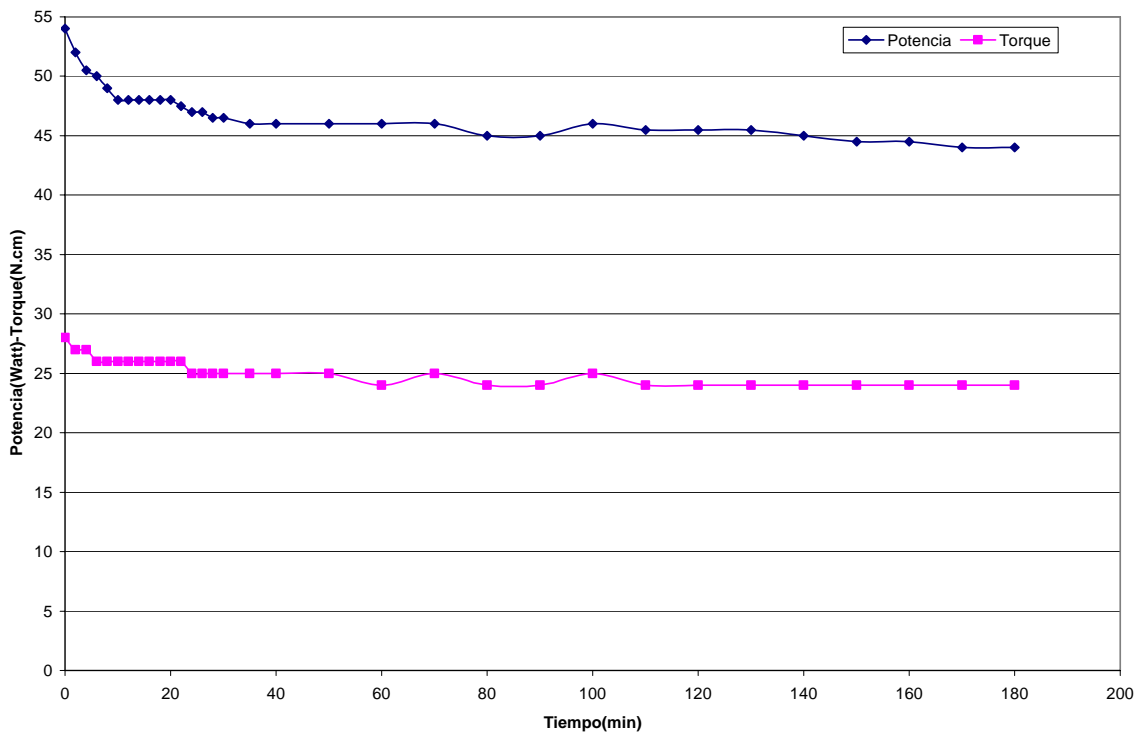


Fig. 30.- Impulsor A-310, velocidad de 1800 rpm

En las figuras 26, 27, 28, 29 y 30 se muestra el monitoreo para el impulsor A-310, el cual es de naturaleza mixta. Se puede observar que el consumo máximo es de cerca de 60 watts a las 1800 rpm y el mínimo de 7 watts a las 1000 rpm. La tendencia que se observa es que al inicio de la operación se da el máximo consumo de potencia y baja drásticamente en los primeros 30 minutos, dando pie al equilibrio de fuerzas y una homogeneización de la mezcla sólido-líquido que se ve reflejado en un potencia constante a lo largo del tiempo.

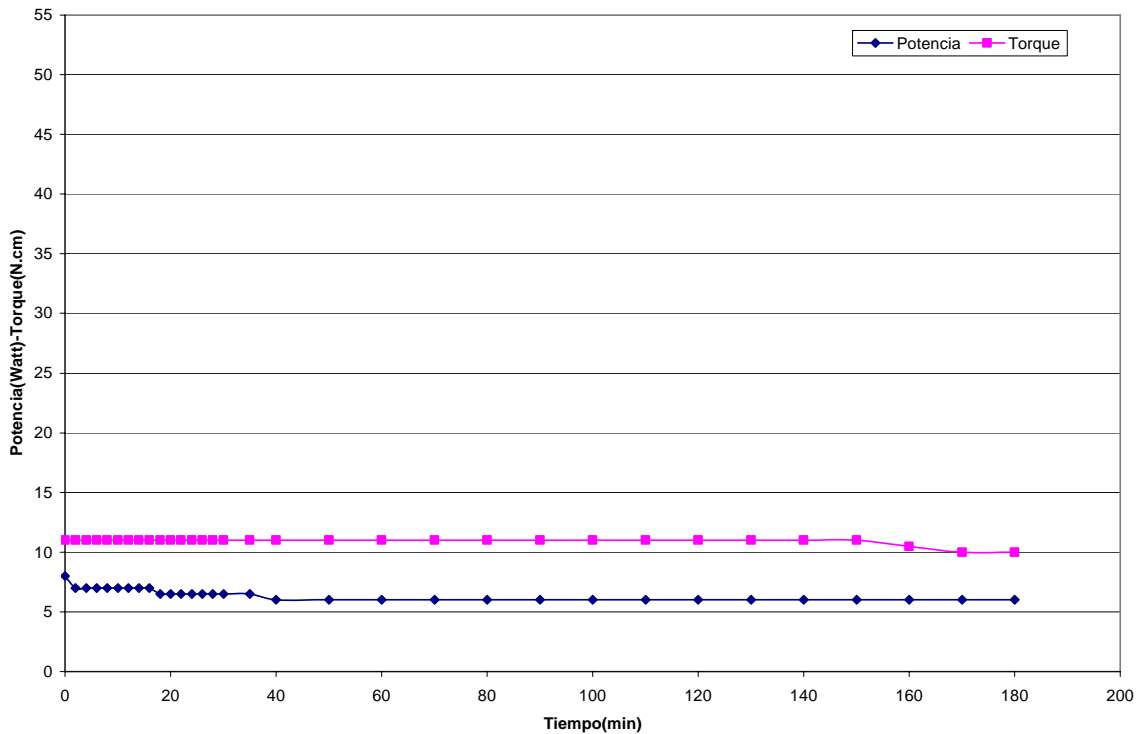


Fig. 31.- Impulsor A-100, velocidad de 1000 rpm

Con lo que respecta al impulsor A-100, presenta un máximo de consumo a las 1800 rpm de 54 watts, mientras que un mínimo de 8 watts aproximadamente a las 1000 rpm, esto muestra que el consumo es similar al impulsor A-310, ya que su naturaleza está destinada al flujo axial, y su esfuerzo de corte es ligeramente suave. Se pueden apreciar las tendencias en las figuras 31, 32, 33, 34 y 35.

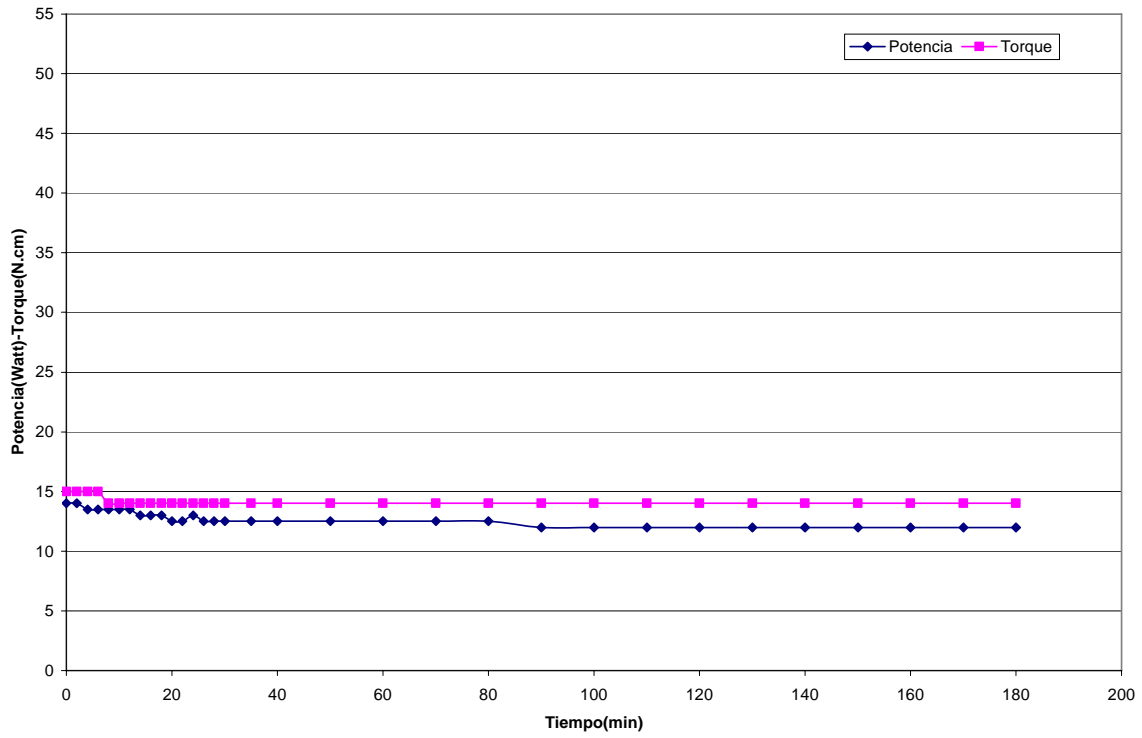


Fig. 32.- Impulsor A-100, velocidad de 1200 rpm

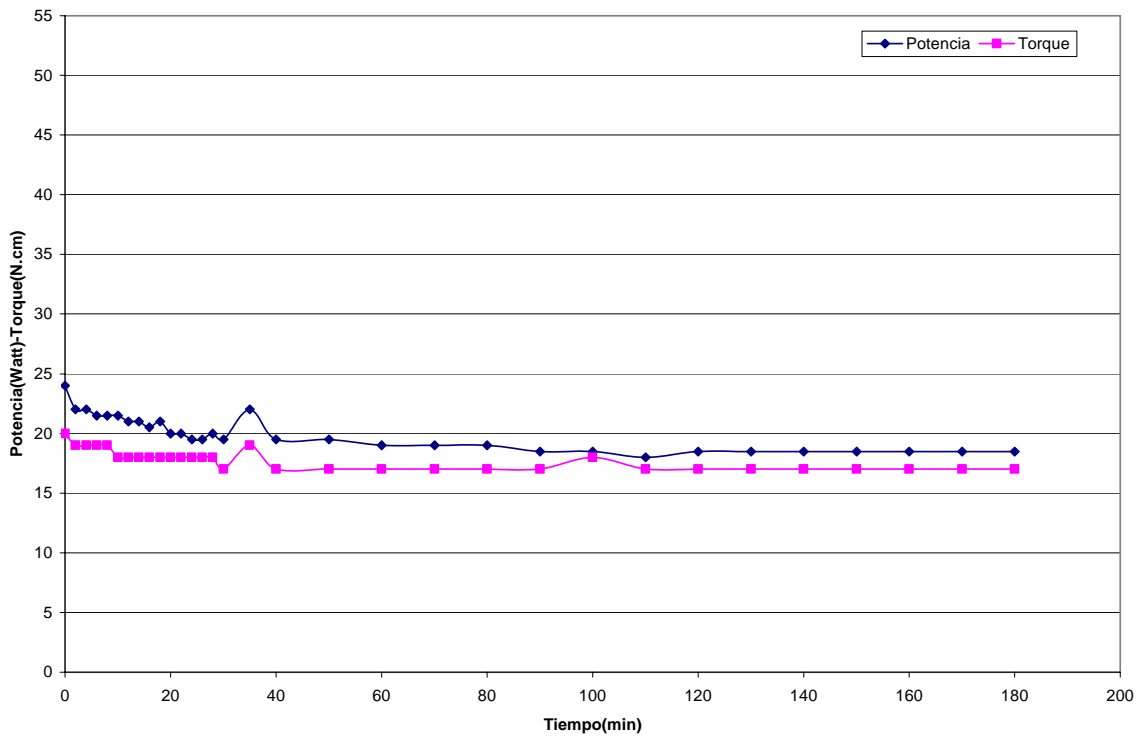


Fig. 33.- Impulsor A-100, velocidad de 1400 rpm

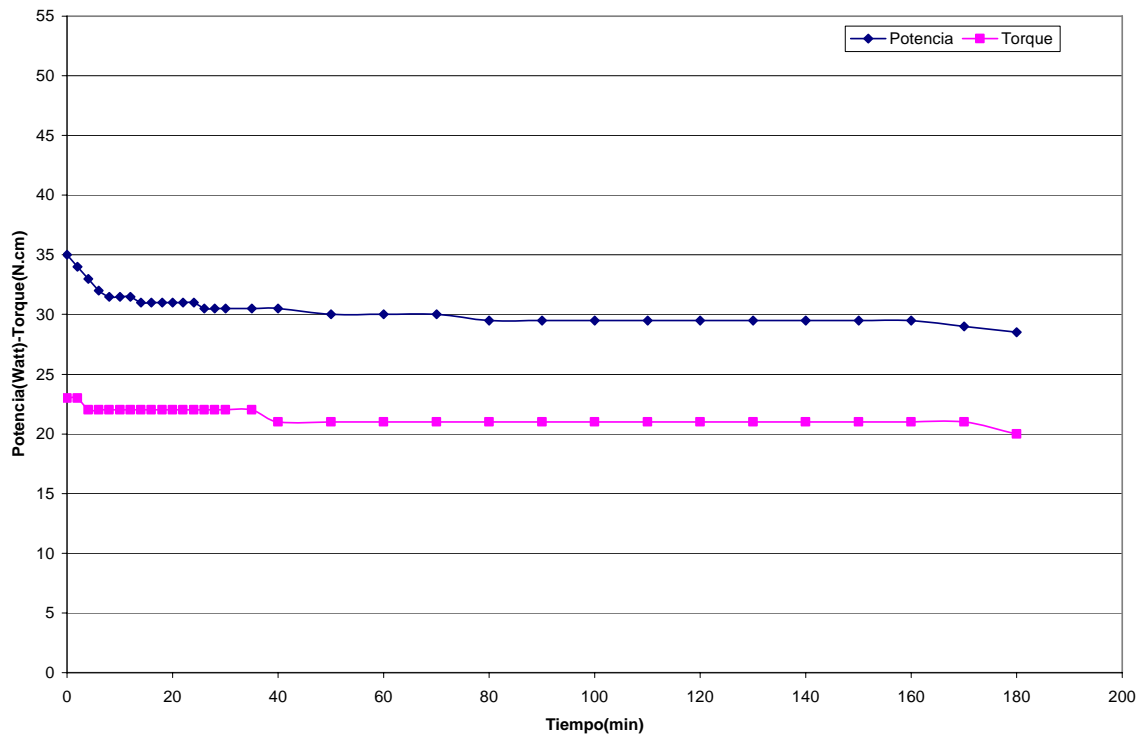


Fig. 34.- Impulsor A-100, velocidad de 1600 rpm

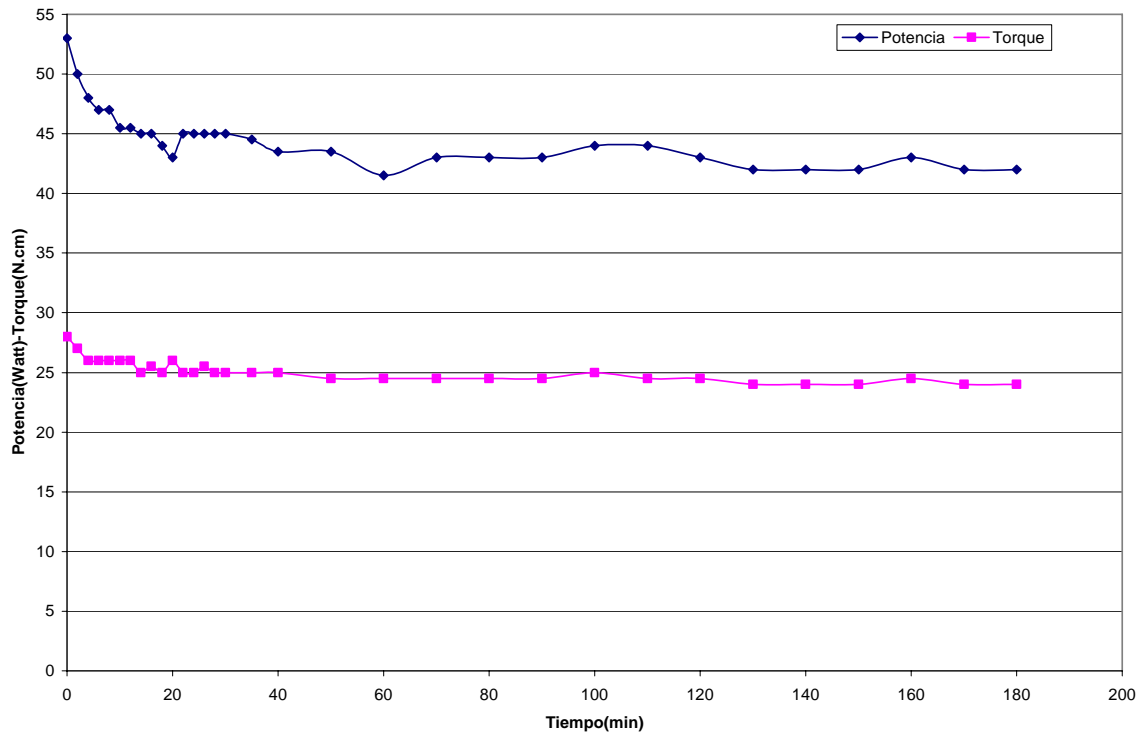


Fig. 35.- Impulsor A-100, velocidad de 1800 rpm

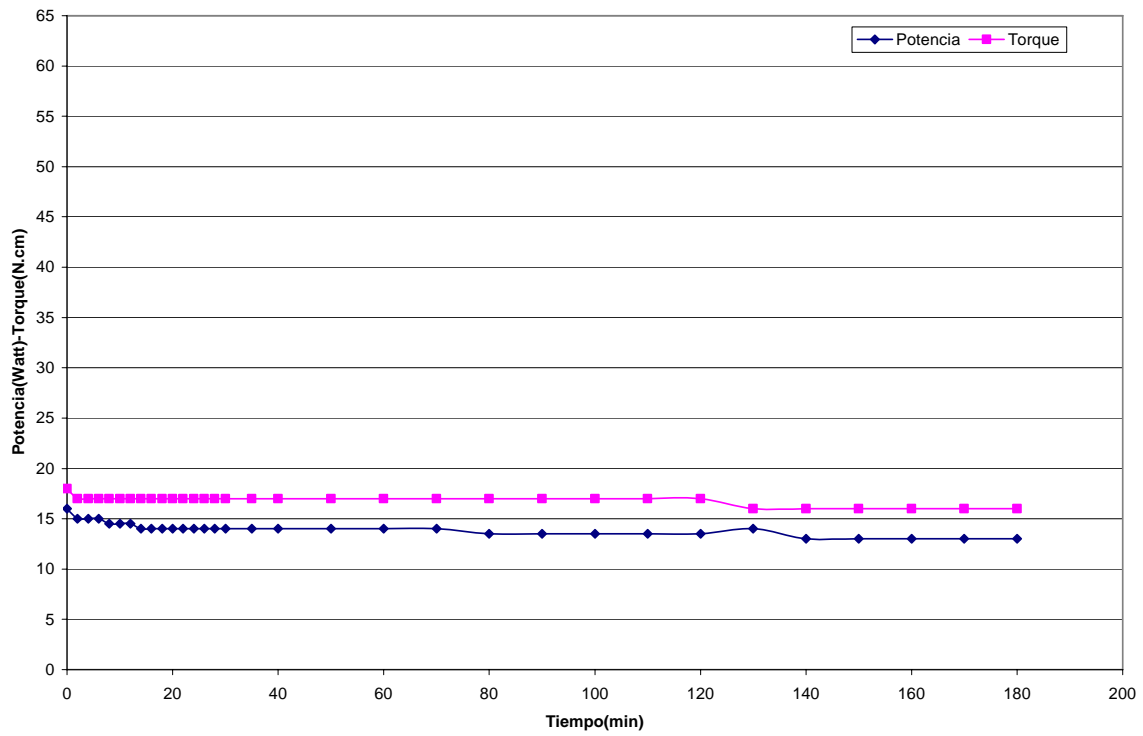


Fig. 36.- Impulsor R-100, velocidad de 1000 rpm

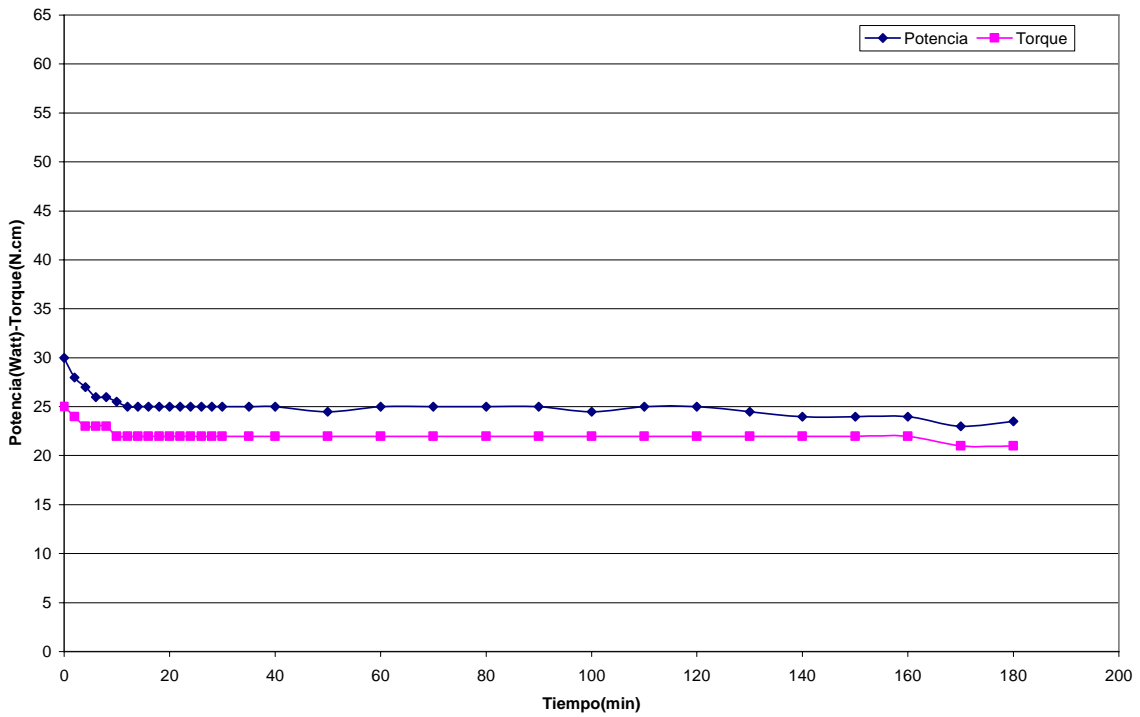


Fig. 37.- Impulsor R-100, velocidad de 1200 rpm

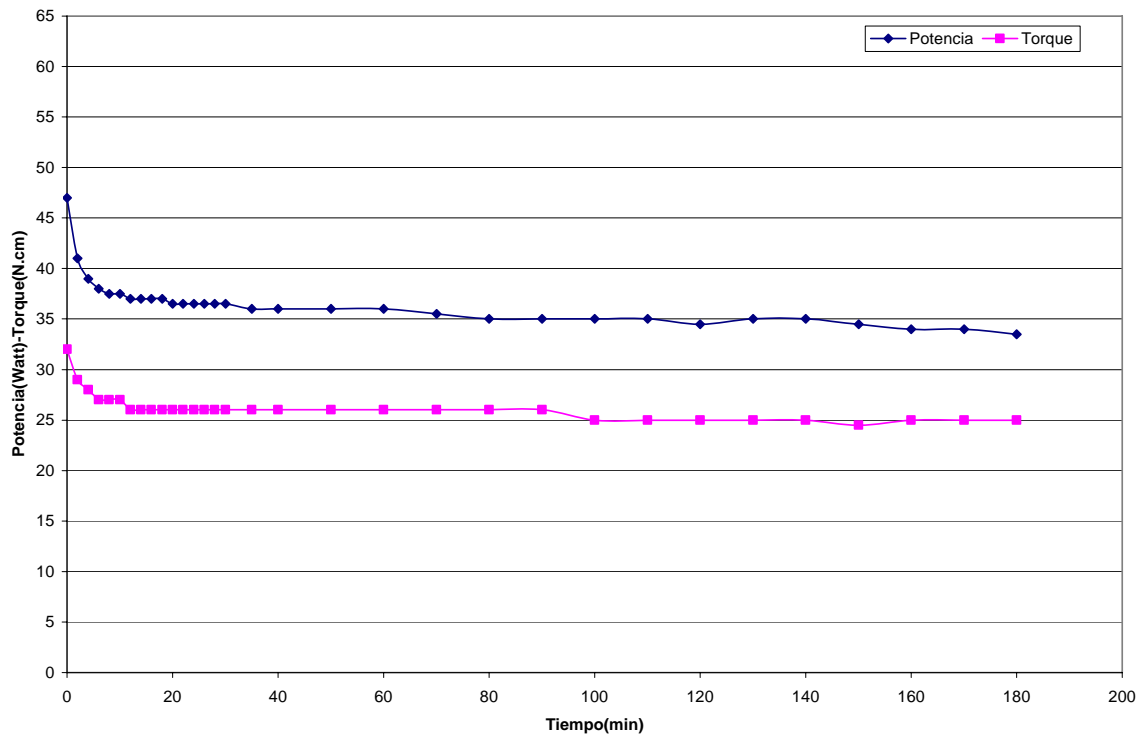


Fig. 38.- Impulsor R-100, velocidad de 1400 rpm

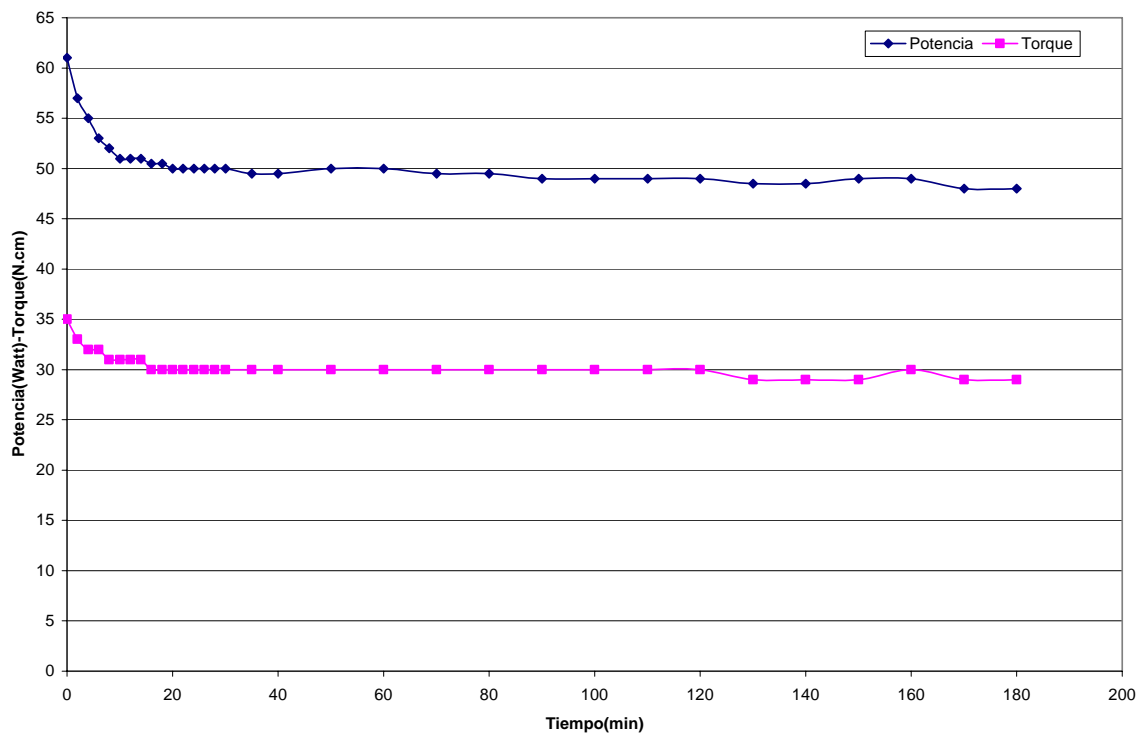


Fig. 39.- Impulsor R-100, velocidad de 1600 rpm

En las figuras 39, 38, 37 y 36 se observa la tendencia que describe el impulsor R-100, teniendo un máximo consumo de potencia a las 1600 rpm de 62 watts y un mínimo a las 1000 rpm de 16 watts. Claramente se observa que el consumo de potencia es mayor para el impulsor R-100 comparado con los otros dos impulsores. Cabe decir que no se realizó la prueba a las 1800 rpm con el impulsor R-100, debido que esta velocidad de agitación generaba inestabilidad en el sistema y no fue imposible monitorear los parámetros.

El impulsor R-100 es de naturaleza radial por lo que su aporte máximo es producir esfuerzo de corte debido a sus paletas que poseen un ángulo de 90°, por otra parte el impulsor A-310 y A-100 tienen ángulos mucho menores por lo que su esfuerzo de corte es mucho menor y por ende el consumo de potencia es menor. El punto mínimo de potencia para R-100 es de 47 watts y de A-100 de 28 watts a las 1600 rpm, comparando ambos casos el consumo difiere de igual manera por la misma situación, partiendo del hecho de que para los tres casos se alcanza una homogeneización total, ya que el equilibrio se alcanza en diferentes tiempos.

El consumo de potencia está muy relacionado al diámetro del impulsor, al igual que la forma de las paletas y del ángulo en que estas se encuentran con respecto al eje. El flujo patrón que genera cada uno de los impulsores depende del diseño del impulsor, diámetro, localización, diámetro del impulsor, fondo del tanque, deflectores, etc.

Como se explico anteriormente, los impulsores que se utilizaron tienen características muy diferentes, con el fin de comparar la remoción de HTPs obtenida. En general se buscaron correlaciones en términos de números adimensionales.

Se menciona que a N_p bajos se generan flujos turbulentos y a N_p altos flujos turbulentos con energía cinética superior que relaciona la distribución de las partículas en todo el recipiente agitado.

Gran parte de la energía consumida en el proceso es utilizada para aumentar la transferencia de masa, en este caso de hidrocarburo, por lo que según Kumaresan (2005) a

N_p bajos se favorece el mezclado sólido-liquido, mientras que a N_p altos se favorece la transferencia de masa, siendo N_p alto después de la unidad (1). En este caso existen reportadas en la literatura correlaciones entre el número de Reynolds y número de Potencia para otro tipo de sistemas donde se pueden observar estas tendencias (ver figura 40).

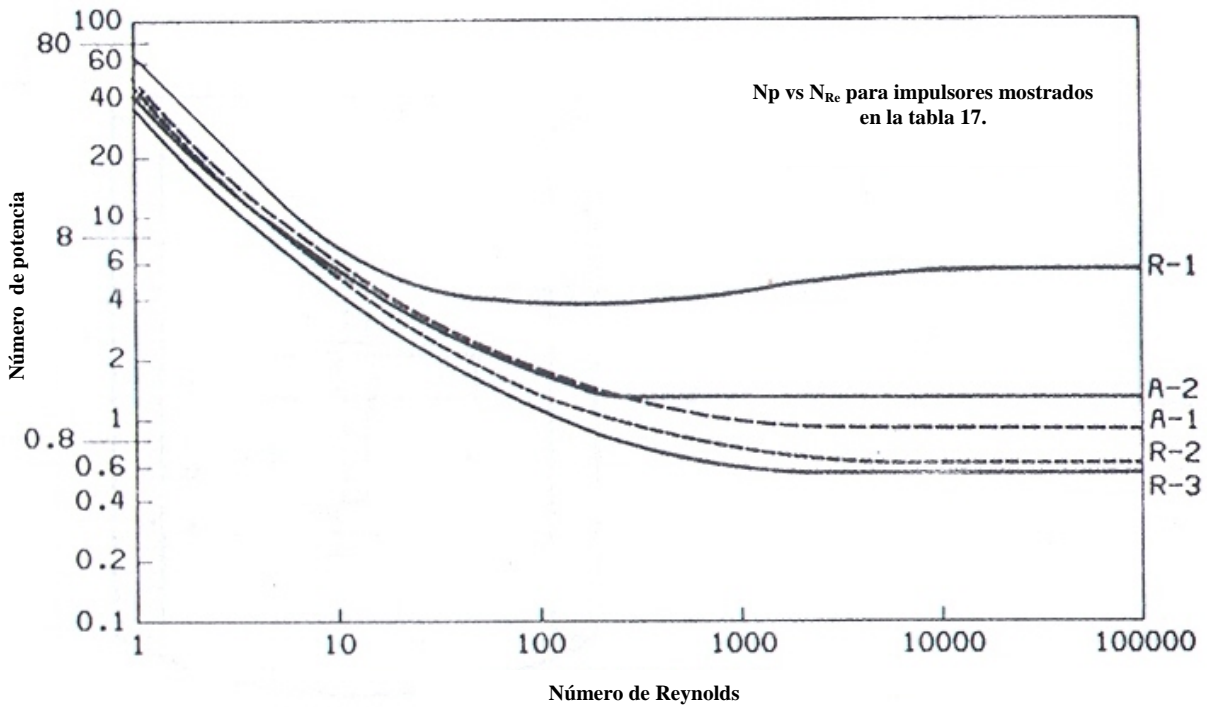
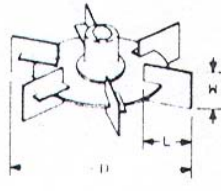
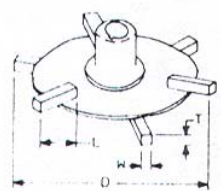
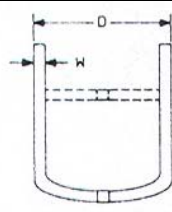
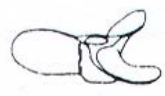
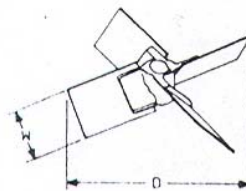

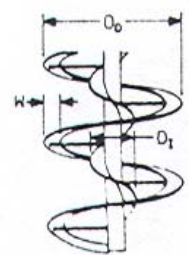


Fig. 40.- N_p vs N_{Re} para agua

Tabla 18.- Impulsores referidos a la fig. 40

Numero	Nombre	Imagen
R-1	Turbina, seis paletas planas.	 <p> $L = 1/4D$ $H = 1/5D$ $DISC\ DIA. = 2/3D$ </p>
R-2	Turbina, seis paletas de barra.	 <p> $L = 1/4D$ $H = 1/20D$ $T = 1/20D$ $DISC\ DIA. = 2/3D$ </p>
R-3	Anchor	 <p> $H = 1/10D$ </p>
A-1	Propela marina de tres paletas.	 <p> $1.5\ PITCH\ RATIO$ </p>
A-2	Impulsor Axial, cuatro paletas.	 <p> $H = 1/5D$ $\alpha = 45^\circ$ </p>
A-3	Impulsor Axial, tres paletas.	 <p> $BLADE\ ANGLE\ AND\ WIDTH\ DECREASES\ HUB\ TO\ TIP$ </p>
A-4	Doble espiral	 <p> $D_0 = (OUTER)$ $D_1 = 1/3D_0$ $H = 1/6D_0$ </p>

En la fig. 40 se muestra datos para impulsores de diferente diseño como se puede observar en la tabla 18. Este tipo de impulsores muestran su comportamiento en agua como se aprecia en la fig. 40, como Re vs N_p .

Esta grafica representa tres secciones de regímenes de flujo. La primera parte que esta referida a Re bajos se le conoce como régimen laminar, la segunda régimen transitorio y por ultimo el régimen turbulento.

Las correlaciones muestran claramente el comportamiento de los diferentes impulsores abiertos a lo largo del Re , comenzando en N_p altos y disminuyendo de manera lineal hasta alcanzar el punto de transición al régimen turbulento, donde el N_p es constante a cualquier Re .

La nomenclatura que se utiliza para definir los diferentes tipos de impulsores, esta definida en la tabla 18, al contrastar esta grafica con la obtenida experimentalmente en el lavado de suelos observamos que la tendencia es muy parecida, aunque las zonas de flujo en que se presentan difieren.

La experimentación se realizo en régimen turbulento (ver fig. 42) ya que el Re es alto ($Re > 10,000$), y al compararlo con el comportamiento en agua de los impulsores, la tendencia es similar, aunque cabe resaltar que los N_p que se manejan son muy altos.

Otro caso en el cual se pueden comparar los resultados, esta reportado en Torres, et. al., 2002, donde se determino que tan eficiente es un sistema en el consumo de potencia para la generación de emulsiones agua-surfactante-combustóleo. En este articulo se presenta las correlaciones de forma grafica donde se compara el Re vs N_p para los tres impulsores que se utilizaron en la experimentación R-100, A-100 y A-310 (ver fig. 41).

La tendencia del impulsor R-100 es casi la misma ya que es muy sensible al cambio de Re , mientras que el A-100 y A-310 varia muy poco su comportamiento con respecto al aumento en Re .

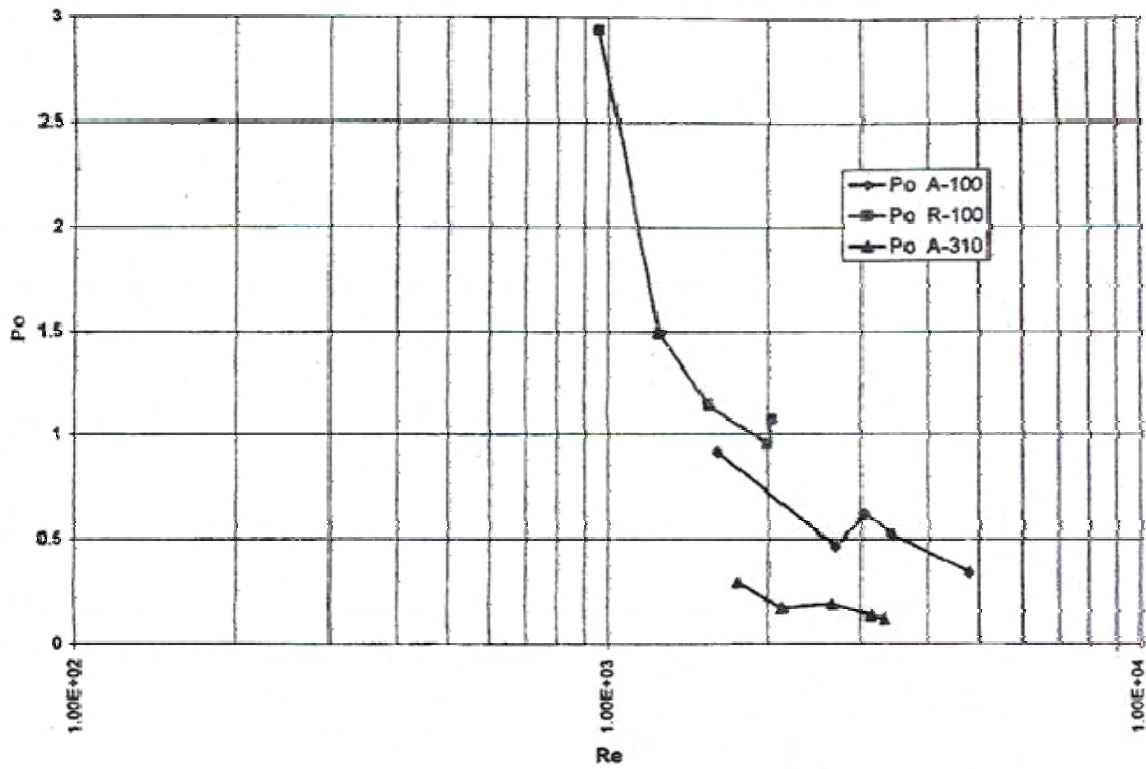


Fig. 41.- Emulsiones combustóleo-surfactante-agua (Torres, et. al., 2002)

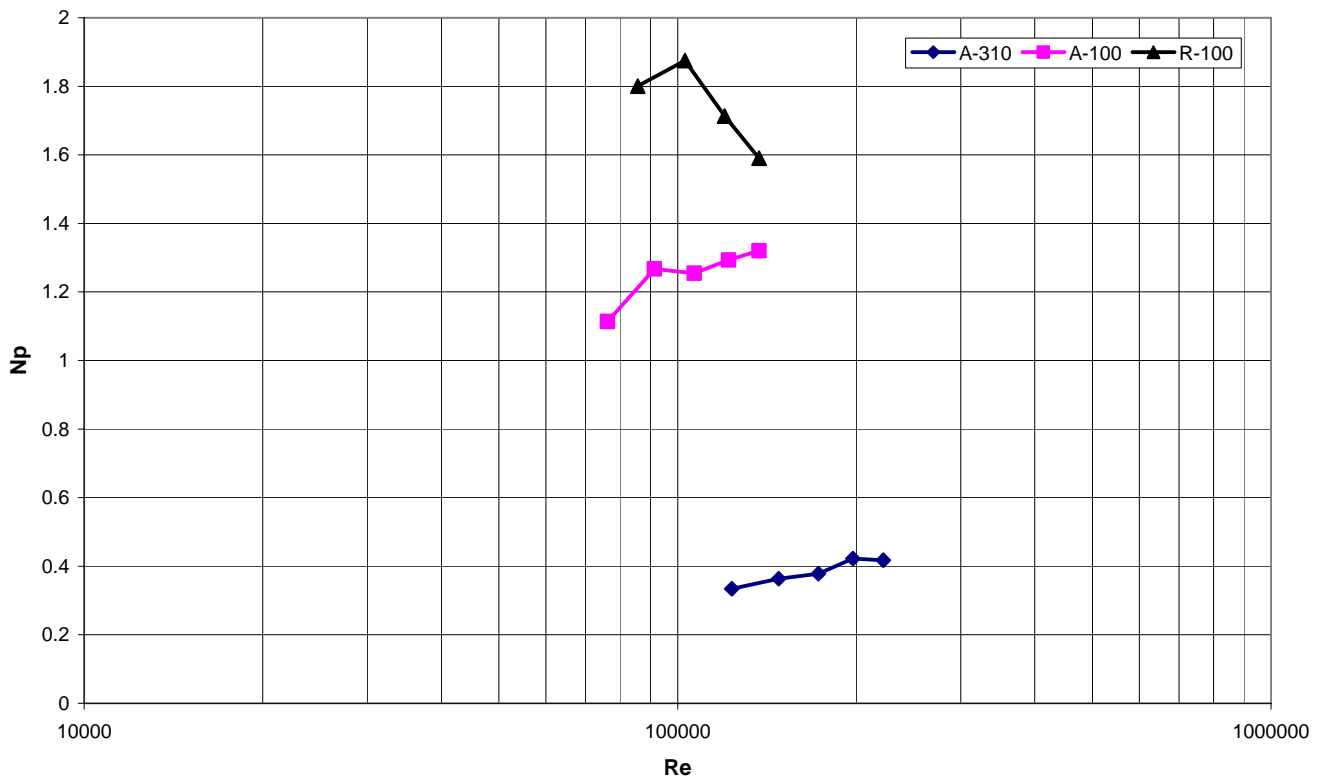


Fig. 42.- Lavado de suelo con diferentes impulsores

En el estudio que se realizo de velocidad se buscaron estas correlaciones y posteriormente se realizo una grafica la cual representa diferentes características para cada impulsor, como se muestra en la fig. 42.

Como se puede observar el impulsor R-100 tiene una sensibilidad al aumento en el Re con respecto a la potencia mientras que el impulsor A-100 aumenta su dependencia al Re. Ya que al aumentar la velocidad del impulsor se modifica drásticamente el Re y el Np.

Por su parte el impulsor A-310 mantiene su número de potencia muy constante a lo largo del barrido de Re, es decir, es independiente del Re ya que a grandes velocidades la potencia varia muy poco con respecto al Re.

Cabe resaltar que lo que buscamos en el proceso es la transferencia de masa de la fase sólida a la fase líquida, y como se menciono anteriormente a mayor $Np=1$ se favorece la transferencia de masa. Como se aprecia en la fig. 42 los impulsores A-100 y R-100 favorecen más la transferencia de masa mientras que el impulsor A-310 favorece la suspensión y el mezclado.

7.7.- Determinación de humedad del suelo.

La humedad es un parámetro que es necesario para el cálculo correcto de las remociones a diferentes condiciones de operación del equipo de mezclado.

Es necesario hacer ver en los datos de la tabla 19, que las humedades iniciales de suelo son mayores que las finales. Estos datos muestran que el suelo contiene no más de 2% de humedad total.

Tabla 19.- Porcentaje de humedades de suelo. (Acrónimos tabla 52)

No.	Características	% Humedad.
1	SI-G3	1.18
2	SID-G3	1.15
3	SI-G1	1.39
4	SI-G2	1.66
5	SL-EG-G1-X1-V3-C2	0.79
6	SL-EG-G2-X1-V3-C2	0.77
7	SL-EG-G3-X1-V3-C2	0.87
8	SL-EC-G3-X1-V3-C4	0.64
9	SL-EC-G3-X1-V3-C3	0.64
10	SL-EC-G3-X1-V3-C2	0.87
11	SL-EC-G3-X1-V3-C1	0.66
12	SL-EV-G3-X1-V1-C2	0.94
13	SL-EV-G3-X1-V2-C2	0.72
14	SL-EV-G3-X1-V3-C2	0.87
15	SL-EV-G3-X1-V4-C2	0.66
16	SL-EV-G3-X1-V5-C2	0.69
17	SL-EV-G3-X2-V1-C2	0.89
18	SL-EV-G3-X2-V2-C2	0.74
19	SL-EV-G3-X2-V3-C2	0.55
20	SL-EV-G3-X2-V4-C2	0.64
21	SL-EV-G3-X2-V5-C2	0.51
22	SL-EV-G3-X3-V1-C2	0.56
23	SL-EV-G3-X3-V2-C2	0.69
24	SL-EV-G3-X3-V3-C2	0.67
25	SL-EV-G3-X3-V4-C2	0.52
26	SLD-EV-G3-X1-V2-C2	0.73

7.8.- Determinación de remociones de lavado.

Como se explico en la metodología experimental las pruebas de extracción que se realizaron están dadas por el método 9071B de la Environmental Protection Agency (EPA). Esta técnica permite conocer cual es la cantidad de hidrocarburos contenidos en el suelo antes y después del proceso fisicoquímico de lavado de suelos asistido por surfactantes.

Las pruebas de lavado que se realizaron modificando la velocidad de agitación, tipo de impulsor, tamaño de partícula, porcentaje de sólidos entre otros se presentan en la tabla 20, donde como se puede observar la mejor remoción de hidrocarburos fue de 59% lograda por el impulsor R-100 a 1000 rpm, esto con respecto al efecto de la velocidad y tipo de impulsor.

En otros trabajos en los cuales se realizaron estudios parecidos reportan que el impulsor que mostró una mayor remoción fue el de 4 paletas inclinadas, que es de naturaleza axial (Climent, 2007). Cabe resaltar que las condiciones a las cuales se trabajó eran distintas, en lo que es referente a tamaño de partícula y porcentaje de sólidos.

El efecto de la granulometría mostró que se da una mejor remoción de hidrocarburos teniendo partículas intermedias (0.15-2.38 mm), obteniendo una remoción superior al 50 % de HTPs. Mientras que con partículas de mayor tamaño la remoción es menor (25% de HTPs) debido a que la concentración de HTPs aumenta. Cabe decir que partículas de menor tamaño muestran un nivel intermedio de remoción (38 % de HTPs).

El efecto de la concentración nos muestra que a menor cantidad de sólidos la remoción es mayor, tal es el caso de una concentración de 10% w/w donde la remoción fue superior al 40% de HTPs, mientras que al 40% w/w fue de 28 % de remoción. Para una concentración intermedia se observa que la remoción es mala como es el caso de 20% w/w donde la remoción es de apenas 25% de HTPs, lo cual puede ser debido a que se da una desorción y adsorción de hidrocarburo en el suelo, a tiempos diferentes.

Cada tipo de suelo según su granulometría y grado de contaminación puede generar resultados muy diferentes para llevar a cabo de forma óptima el lavado asistido por surfactantes. Por ende es necesario realizar pruebas preliminares que describan el fenómeno fisicoquímico y así hacer elecciones de lavado correctas.

Se determinó en esta experiencia que el mejor impulsor para el proceso de lavado es la turbina Rushton (R-100), aunque como es de naturaleza radial sus consumos de potencia son altos, comparados con los otros dos impulsores.

Tabla 20.- HTPs antes y después del proceso de lavado. (Acrónimos tabla 52)

No.	Características	HTPs (ppm)	Remoción (ppm)	Remoción (%)
1	SI-G3	56084.48		
2	SID-G3	53727.29		
3	SI-G1	61497.12		
4	SI-G2	89070.36		
5	SL-EG-G1-X1-V3-C2	37858.25	23638.87	38.44
6	SL-EG-G2-X1-V3-C2	41176.65	47893.71	53.77
7	SL-EG-G3-X1-V3-C2	40924.67	13981.21	25.46
8	SL-EC-G3-X1-V3-C4	39487.77	15418.12	28.08
9	SL-EC-G3-X1-V3-C3	34129.13	20776.75	37.84
10	SL-EC-G3-X1-V3-C2	40924.67	13981.21	25.46
11	SL-EC-G3-X1-V3-C1	32208.07	22697.82	41.34
12	SL-EV-G3-X1-V1-C2	45240.39	9665.50	17.60
13	SL-EV-G3-X1-V2-C2	33456.45	21449.43	39.07
14	SL-EV-G3-X1-V3-C2	40924.67	13981.21	25.46
15	SL-EV-G3-X1-V4-C2	29406.10	25499.78	46.44
16	SL-EV-G3-X1-V5-C2	39792.99	15112.89	27.53
17	SL-EV-G3-X2-V1-C2	47814.07	7091.8154	12.92
18	SL-EV-G3-X2-V2-C2	44995.09	9910.7966	18.05
19	SL-EV-G3-X2-V3-C2	37018.89	17886.994	32.58
20	SL-EV-G3-X2-V4-C2	40987.30	13918.587	25.35
21	SL-EV-G3-X2-V5-C2	44374.08	10531.799	19.18
22	SL-EV-G3-X3-V1-C2	22410.41	32495.472	59.18
23	SL-EV-G3-X3-V2-C2	29916.51	24989.37	45.51
24	SL-EV-G3-X3-V3-C2	29054.11	25851.77	47.08
25	SL-EV-G3-X3-V4-C2	25467.13	29438.755	53.62
26	SLD-EV-G3-X1-V2-C2	35414.12	19491.764	35.50

7.9.- Repetibilidad de la medición de la remoción de hidrocarburo.

Las técnicas experimentales por lo general siempre van acompañadas de un error experimental, esto es que tanto distan del valor verdadero, o esperado en la experimentación ya que debido a x, y factores los resultados no siempre son los mismos aun en las mismas condiciones.

En este caso por falta de suelo para las experiencias previstas, solo se hizo un duplicado a 1200 RPM para el impulsor A-310, con las condiciones anteriormente explicadas para las pruebas de velocidad.

Es necesario calcular parámetros estadísticos tales como la desviación estándar, la media y el error porcentual para cada corrida, los cuales se presentan en las tablas 21 y 22.

Tabla 21.- Errores porcentuales de las corridas

Prueba	% remoción	error porcentual
1	39.07	4.781649684
2	35.50032051	4.781649684

Tabla 22.- Parámetros estadísticos calculados

Pruebas de Lavado	
Media	37.28
Desviación estándar	2.521183025

Como puede observarse la desviación estándar nos muestra que tan dispersos se encuentran los datos y como era de esperarse, los datos están muy cercanos a la media (ver tabla 22). Esto también puede observarse en el error porcentual que no rebasa el 5%, el cual es un valor aceptable en la experimentación, por lo tanto el método fue correcto en su ejecución.

7.10.- Energía consumida y remoción.

La energía consumida juega un papel muy importante en la remoción del suelo contaminado ya que se define de manera mas concreta cuanto costaría realizar este proceso, además determina que tan eficiente es el lavado.

El impulsor A-310 es de naturaleza mixta y como se presenta en la fig. 43 tiene diferentes remociones a lo largo de la velocidad que desarrolla en el barrido de 1000 a 1800 rpm. Como se puede observar, la mayor remoción de HTPs obtenida es del 46% a las 1600 rpm, mientras que la menor se da a las 1000 rpm, aunque sucede algo curioso en este sistema ya que pareciera que la remoción aumenta conforme se aumentara la velocidad pero ocurre que a las 1400 rpm disminuye drásticamente la eficiencia.

El equilibrio fisicoquímico juega un papel muy importante en la remoción obtenida en cada uno de los casos, ya que la transferencia de masa de la fase sólida a la líquida se expresa en un gradiente de concentraciones, por lo que las condiciones de operación son constantes y la velocidad fue la que varió. Probablemente esta situación se explicaría en una adsorción y desorción del contaminante del suelo en un tiempo, el cual se desconoce ya que el monitoreo solo se hizo en las cinéticas.

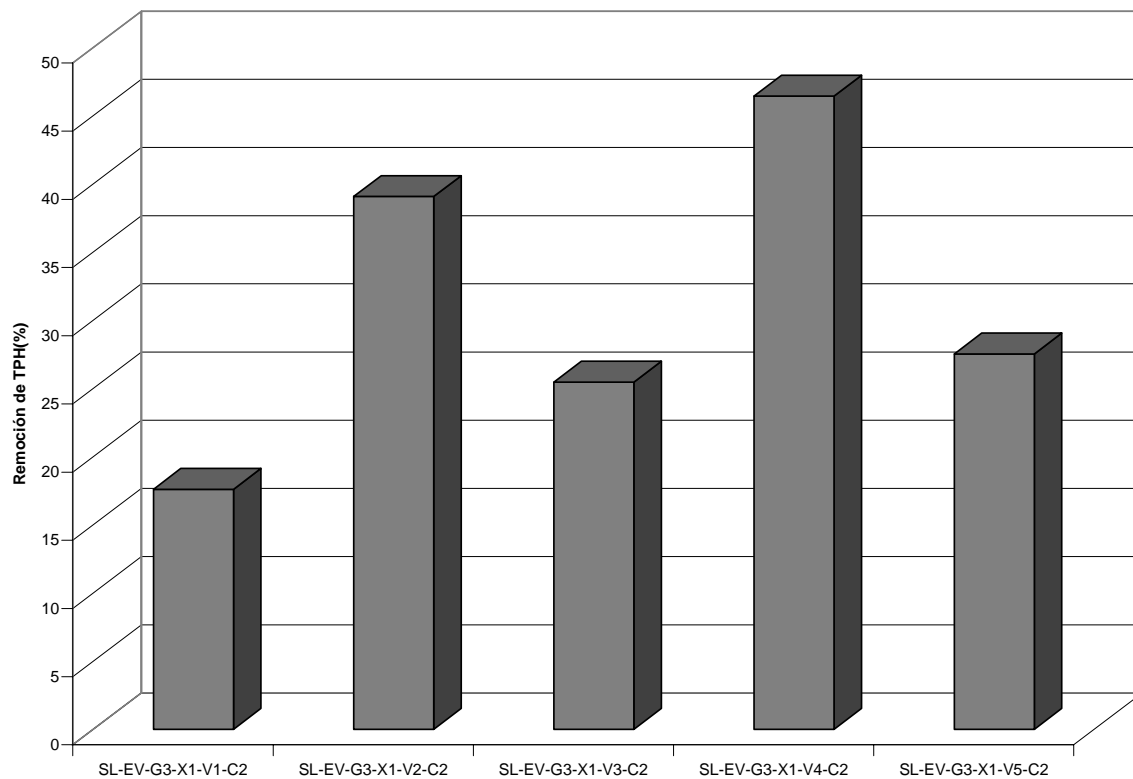


Fig. 43.- Porcentaje de remoción, Impulsor A-310

Por su parte, el impulsor A-100 muestra una máxima remoción a las 1400 rpm, mientras que su mínimo igualmente estuvo en las 1000 rpm, cabe resaltar que el fenómeno (ver fig. 44) es un aumento de la remoción de HTPs gradual al aumentar la velocidad de agitación y después de las 1400 rpm inicio un decaimiento de esta tendencia a tal grado que se puede decir que las remociones a 1200 y 1400 rpm son muy parecidas. Este fenómeno se puede explicar debido a que la agitación óptima para este proceso es 1400 rpm y rebasando este límite, la energía no es aprovechada al 100%, sino mucha se pierde en otros procesos tales como inyección de aire al sistema.

En la fig. 42 donde se graficaron las correlaciones de Re vs Np , se puede observar que un punto de inflexión ocurre a las 1400 RPM para el impulsor A-100, además en ese punto el Np es mayor de 1, por lo que se favorece mas la transferencia de masa después de este valor, es por esta razón que el punto optimo de mezclado es a las 1400 rpm.

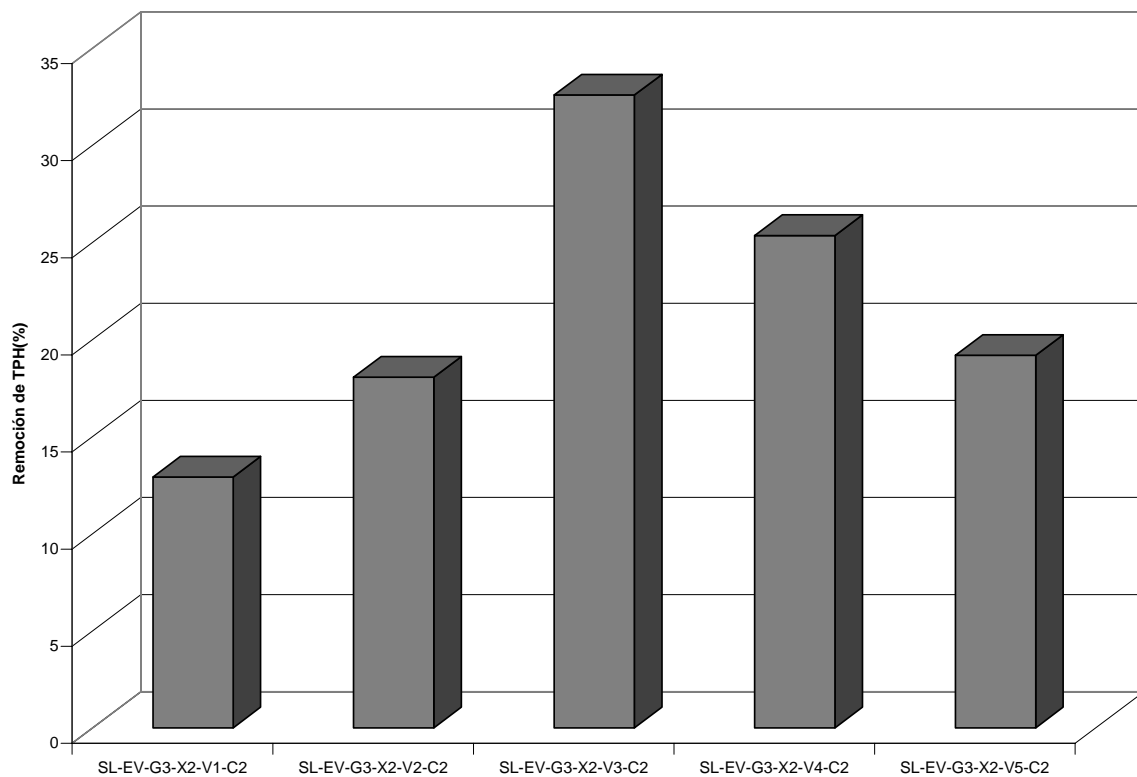


Fig. 44.- Porcentaje de remoción, Impulsor A-100

Con lo que respecta al impulsor R-100, este es de naturaleza puramente radial, ya que su esfuerzo de corte es mucho mayor que en los dos casos anteriores, por lo tanto el consumo de potencia aumenta drásticamente al aumentar la velocidad de agitación.

Se puede apreciar que a las 1000 rpm la remoción alcanzada es de 59%, mientras que la menor remoción a 1200 rpm fue de 45%, mientras que a las otras velocidades fluctúa de menor manera que en los otros dos casos.

Como se menciono en la cinética de lavado, este impulsor fue el que mas rápido alcanzo el equilibrio fisicoquímico, y ahora es el que mejor eficiencia de lavado demostró.

Takahashi (1991) demostró que las turbinas muestran mayor factor de impacto con las partículas de diverso tamaño que cualquier otro tipo de impulsor, ya que la posición de sus paletas muestran mayor esfuerzo de corte, además propone que las partículas tienen mayor factor de influencia en las esquinas de las paletas y entre el fondo y la turbina misma. El trabajo que esta persona desarrollo fue con 0.5% w/w y un diámetro de partícula (d_p) = 1.38-2.54 mm.

En este caso se realizo a condiciones muy diferentes pero las tendencias son las mismas ya que el desgaste del impulsor fue en esas partes. Aunque cabe decir que como este tipo de impulsores son de tipo radial, generan bombeo alto y consumo de potencia igualmente alto, pero como se puede ver estas condiciones sirven para satisfacer la operación optima en el lavado del suelo asistido por surfactantes específicamente con el suelo de estudio.

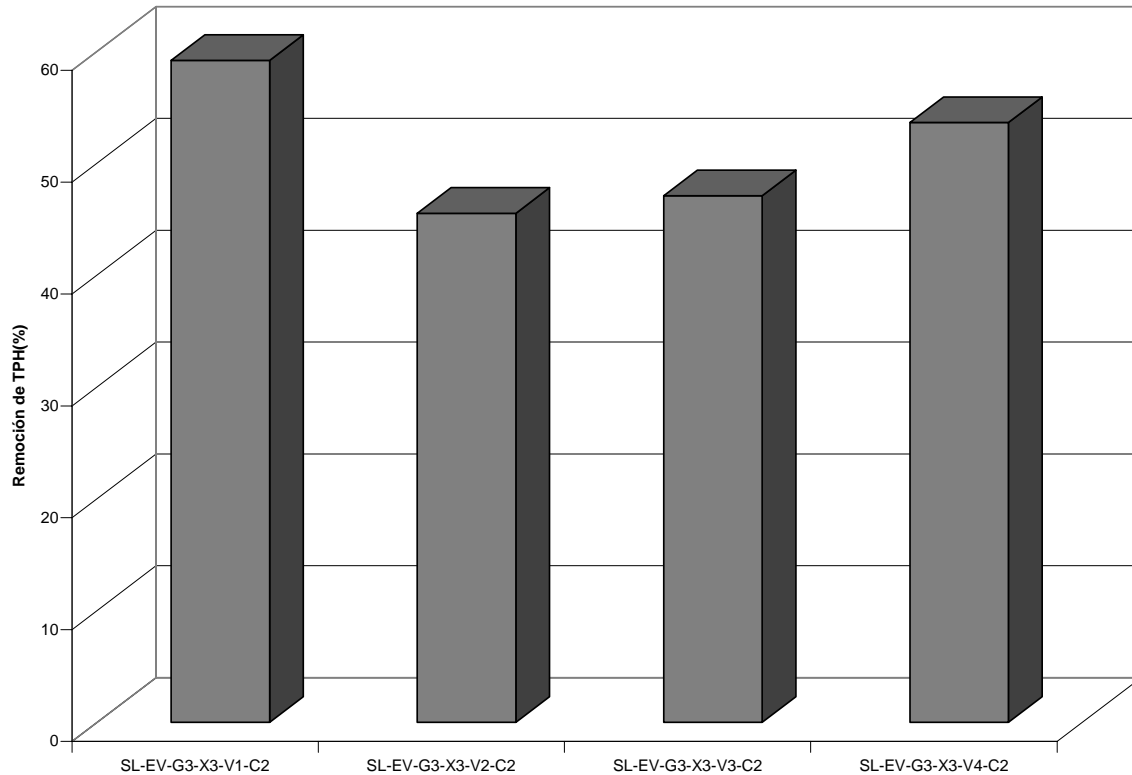


Fig. 45.- Porcentaje de remoción, Impulsor R-100

En la fig. 46 se observa en conjunto las dos variables que con mayor énfasis se estudió, para así obtener las condiciones óptimas de lavado de suelo asistido por surfactantes. Analizando esta grafica tenemos que para los tres impulsores existe gran diferencia con respecto a sus consumos de energía ya que el impulsor R-100 consume más energía que el A-100 y A-310 ya que el esfuerzo de corte es superior debido a la posición de sus paletas.

Según los resultados condensados en la fig. 46, el impulsor R-100 es el mas eficiente para esta operación de lavado asistido por surfactantes, ya que con el menor consumo de energía se obtiene la mayor remoción de lavado.

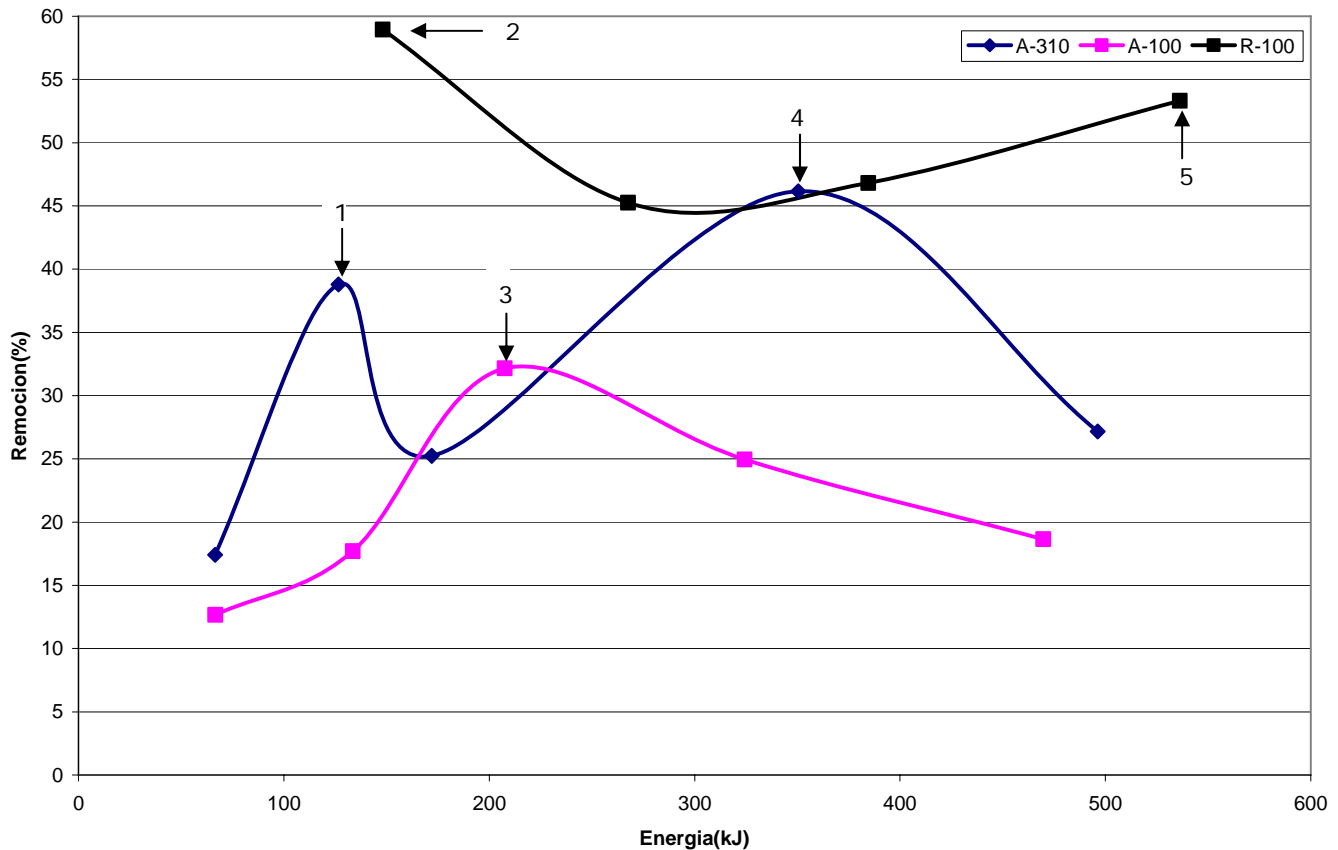


Fig. 46.- Consumo de energía en el lavado de suelos

La fig. 46 tiene varios puntos que es necesario discutir, para dar una idea mas generalizada del comportamiento de los impulsores en el proceso de lavado de suelos.

En el punto 1 que pertenece al comportamiento del impulsor A-310, se observa una remoción de aproximadamente el 38 % con un consumo de 126 kJ, comparándolo con el punto 4 donde con 350 kJ se obtiene una remoción del 46 %. Convendría usar el impulsor A-310 a 1200 rpm en lugar de 1400 rpm ya que la diferencia en remociones no justifica el consumo energético, y además podemos hacer varios lavados y alcanzar una mayor remoción con menor energía.

El punto 3 se refiere a la máxima remoción obtenida del impulsor A-100, la cual fue de 32% con un consumo de energía de 207 kJ, el cual es buen valor referido a todo el comportamiento de este impulsor a lo largo de la velocidad que se determino en la

experimentación, ya que por mas energía que se aplique después de este punto la remoción disminuirá de forma lineal, lo cual no es factible en el proceso.

El punto 2 es la mejor remoción obtenida de los tres impulsores, y pertenece al impulsor R-100, la cual fue de 59 % con un consumo de energía de 148 kJ, comparado con el punto 5 que tuvo una remoción de 53 % con un consumo de energía de 536 kJ. Estos dos puntos nos muestran que el impulsor R-100 trabaja mejor a bajas velocidades, ya que a 1000 rpm su eficiencia es máxima mientras que más allá de esta velocidad la remoción es menor, aunque fluctúa. Para este caso el impulsor R-100 es el más eficiente para el proceso de lavado de suelos asistido por surfactantes.

7. 11.- Caracterización del agua residual.

Los estudios del agua residual fueron realizados en un laboratorio especializado ajeno al laboratorio de bioprocesos del Instituto de Ingeniería. Donde los valores obtenidos de muestran en la tabla 23.

Tabla 23.- Análisis del agua residual generada en el lavado de suelos

Parámetros	Unidades	Resultado
pH	Unidades	5.21
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	1353
Demanda Química de Oxígeno.	mg/L	20153
Demanda Bioquímica de Oxígeno.	mg/L	8410.75
Sólidos Totales.	mg/L	14919
Dureza	mg/L	337.31
SAAM	mg/L	3637.9
Grasas y Aceites	mg/L	94.5
Aluminio	mg/L	429.03
Cromo	mg/L	1.254
Fierro	mg/L	289.64
Plomo	mg/L	1.114

Tabla 24.- Tabla comparativa del agua residual con la norma NOM-ECO-002-CNA

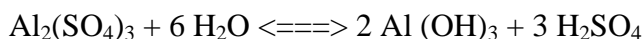
PARAMETROS	(mg/L, excepto cuando se especifique otra)	
	Norma	Residual
Grasas y aceites	100	94.5
Sólidos sedimentables (mg/L)	10	ND
Arsénico total	1	ND
Cadmio total	1	ND
Cianuro total	2	ND
Cobre total	20	ND
Cromo hexavalente	1	(total) 1.254
Mercurio total	0.02	ND
Níquel total	8	ND
Plomo total	2	1.114
Zinc total	12	ND

En la tabla 24 se muestra una comparación de los valores obtenidos en el agua residual originada después del lavado y los límites permisibles de la norma (NOM-ECO-002-CNA, 2007), expedida por la Comisión Nacional del Agua (CNA). Se puede ver claramente que el contenido de grasas y aceites está por debajo del límite por lo que se puede desechar sin ningún problema al drenaje sin necesidad de darle un tratamiento previo.

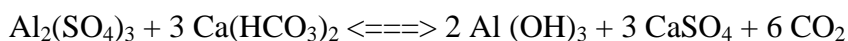
Con lo que respecta al plomo, igualmente se observa que los valores están por debajo de la norma, aunque cabe resaltar que para otros metales y compuestos normados no se determinó su concentración. Se podrían hacer otro tipo de análisis más enfocados a la norma, aunque debemos considerar que lo que se extrajo del suelo principalmente son grasas y aceites ya que este se encontraba contaminado por hidrocarburos del petróleo, por lo que los metales que no se determinaron deben estar presentes en concentraciones demasiado bajas o simplemente no existen.

8.- Propuesta de tratamiento del agua residual.

Los procesos de coagulación-floculación facilitan el retiro de los sólidos disueltos y de las partículas coloidales. La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales mientras la floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y después en los floculos más grandes que pueden ser depositados. Las impurezas coloidales se eliminan coagulándolas primeramente y luego mediante filtración del agua. Los coagulantes generalmente utilizados son el hidróxido alumínico y a veces el hidróxido férrico. Cuando el agua es neutra al agregar el sulfato alumínico se hidroliza formando hidróxido alumínico coloidal y una cantidad equivalente de ácido sulfúrico, de acuerdo a la ecuación química:



En las aguas alcalinas ocurre la reacción entre el sulfato alumínico y el carbonato ácido de calcio de acuerdo a la ecuación química:



El precipitado floculante de hidróxido alumínico producido elimina la materia coloidal por varios procesos combinados: por inclusión sencilla, por adsorción del coloide por el hidróxido alumínico, y por neutralización de las micelas coloidales positivas mediante el hidróxido alumínico coloidal negativo que se produce. Es fundamental el mezclado homogéneo de los reactivos con el agua y que se sedimente la mayor cantidad posible de sólidos antes que el agua sea filtrada facilitando el proceso de filtración.

La adición de otro reactivo llamado floculante puede promover la formación del floculo. Los factores, que pueden promover la coagulación-floculación, son el gradiente de la velocidad, el tiempo, y el pH.

Estudios que se realizaron (Bellot, 2007) muestran que esta técnica favorece la recuperación de los contaminantes contenidos en el agua tales como grasas y aceites, que en este caso es la materia que se requiere retirar, ya que fue la que en mayor proporción se encuentra presente. Se obtuvo un 75% de remoción de contaminantes y hasta un 98% de surfactante contenido en el agua, este es un resultado muy bueno ya que el agua nuevamente se puede utilizar para realizar otro lavado, y así tener un proceso de cero descargas.

9.- Conclusiones.

Los objetivos de este trabajo fueron estudiar variables en el proceso y determinar las condiciones de lavado donde el consumo de potencia fuera el menor y la remoción de HTPs fuera máxima, por lo que los objetivos se cumplieron, además la hipótesis fue comprobada.

El suelo de estudio fue contaminado antropogénicamente por hidrocarburos y se obtuvo una curva granulométrica y distribución de partícula que define a este suelo como arena mal graduada con poco o nada de finos.

El impulsor que más rápidamente alcanza el equilibrio fisicoquímico con un tiempo de 180 minutos es el R-100, mientras que los impulsores A-310 y A-100 lo hacen en 300 minutos, esto debido a que las fuerzas de inercia en el proceso son mayores que las viscosas, siendo que el impulsor R-100 por su mayor esfuerzo de corte genera más fuerza inercial que los otros.

Menor cantidad de sólidos y mayor tamaño de partícula, muestra que se ocupa menor cantidad de energía para realizar el lavado, mientras que a mayor cantidad de sólidos y menor tamaño de partícula ocurre lo contrario. Cabe decir que las primeras pruebas que se realizaron incluyendo partículas mayores a 3.35 mm, no permitieron un eficiente proceso de lavado, por lo que se decidió solo trabajar con partículas inferiores a este tamaño.

Mayor volumen de solución en comparación de la cantidad de sólidos muestra una mayor remoción de HTPs, debido a que al transmitir energía al medio, esta se transfiere de partícula a partícula, ya que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma en energía cinética o puntual, desintegrando la partícula de suelo en partículas de menor tamaño, incrementando su energía cinética a lo largo del tiempo. Lo anterior se ve reflejado en una mayor transferencia de masa de la fase sólida a la líquida.

En el proceso de lavado al transcurrir el tiempo, el consumo de potencia para los tres impulsores va disminuyendo hasta alcanzar una potencia constante. Esto es a consecuencia de la desorción de hidrocarburo del suelo, homogenización de la mezcla suelo-solución y la introducción de aire al sistema.

La potencia es una variable importante en el proceso, donde para el impulsor R-100 tuvo el mayor consumo, mientras que para el impulsor A-310 y A-100 es aproximadamente el 60% del consumo comparado con el impulsor R-100. Esto puede explicarse por la

naturaleza del impulsor, ya que para el impulsor R-100 tenemos un mayor esfuerzo de corte, consecuencia de sus paletas colocadas en un ángulo de 90° respecto a la base del tanque. Mientras que para el impulsor A-310 están inclinadas a 45° , por lo que es menor la cantidad de energía utilizada. Con lo que respecta al impulsor A-100 sus paletas están suavizadas para disminuir en gran medida el esfuerzo de corte, ya que su principal función es el bombeo.

Al realizar el análisis del efecto de la velocidad se logró observar que el mejor impulsor fue el R-100, ya que se lograron remociones de 59% con la menor cantidad de energía consumida. Este impulsor muestra un patrón de flujo que favorece el esfuerzo de corte y a su vez la desintegración de las partículas haciendo más eficiente la homogenización de la mezcla, y por tanto muestra mayor desorción de HTPs en un tiempo de 180 minutos, que el resto de los impulsores de objeto de estudio.

Las remociones presentadas se llevaron a cabo en un solo lavado y los resultados mostraron que ninguna, esta en condiciones de cumplir con la norma NOM-138-SEMARNAT-2003. Cabe decir que entre mayor cantidad de lavados o cargas la concentración de HTPs disminuirá hasta la cantidad deseada o que la norma requiere.

El estudio de mezclado aplicado al lavado de suelos es una herramienta muy importante para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos, ya que el tiempo que requiere esta técnica es mucho menor comparado con otras técnicas tales como la biológica.

Existen muchas características que se pueden modificar en esta técnica, para hacer más eficiente el proceso, tales como la implementación de más de un impulsor para distribuir el consumo de energía, modificar el horizonte del impulsor, tamaño del impulsor y hasta implementar una planta piloto que realice esta operación.

Siendo el mezclado una operación unitaria muy difícil de someter a análisis teórico-experimental es necesario realizar pruebas que demuestren el comportamiento de las variables en el lavado de suelos con el objetivo de unificar ecuaciones que describan el fenómeno.

10.- Apéndice.

Las tablas que a continuación se presentan es el origen de las graficas contenidas en esta tesis.

Granulometría.

Tabla 25.- Granulometría y HTPs del suelo inicial

# Malla	ABERTURA (mm)	Peso retenido (kg)	Acumulado	%suelo pasa	Fracción retenida	%retenido	TPH(mg/kg)	% Suelo
	0.14	0.1	0.10	0.62	0.01	0.62		
100	0.15	0.35	0.45	2.80	0.02	2.18	51550	2.18
80	0.18	3.25	3.70	23.01	0.20	20.21	43590	20.21
60	0.25	1.7	5.40	33.58	0.11	10.57	45580	10.57
40	0.445	4.9	10.30	64.05	0.30	30.47	80250	30.47
20	0.85	2.15	12.45	77.43	0.13	13.37	94180	13.37
10	2	1.4	13.85	86.13	0.09	8.71	150670	8.71
8	2.38	1.73	15.58	96.89	0.11	10.76	179103	10.76
6	3.35	0.5	16.08	100.00	0.03	3.11	176060	3.11

Efecto de la granulometría.

Tabla 26.- Potencia y torque. Efecto de la granulometría, (0.15-0.85mm)

Tiempo (min.)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)	Np
0	26	20	4680	0.49
3	24	20	2880	0.45
5	23	20	2760	0.43
7	22	19	3960	0.42
10	22	19	6600	0.42
15	21	18	6300	0.40
20	21	19	6300	0.40
25	21	18	6300	0.40
30	20	19	6000	0.38
35	20	18	12000	0.38
45	20	18	12000	0.38
55	20	18	12000	0.38
65	20	18	12000	0.38
75	20	18	12000	0.38
85	21	18	12600	0.40
95	20	18	12000	0.38
105	20	18	12000	0.38
115	20	18	12000	0.38
125	20	18	12000	0.38
135	20	18	12000	0.38
145	20	18	12000	0.38
155	20	18	12000	0.38
165	19	18	11400	0.36
175	19	17	11400	0.36

Tabla 27.- Potencia y torque. Efecto de la granulometría, (0.15-2.38mm)

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque(N.cm)	Energía (J)	Np
0	25	20	3000	0.47
2	24	20	2880	0.45
4	23	19	2760	0.43
6	22,5	19	2700	0.42
8	22	19	2640	0.42
10	22	19	2640	0.42
12	21,5	19	2580	0.41
14	22	19	2640	0.42
16	21	19	2520	0.40
18	21	19	2520	0.40
20	21	19	2520	0.40
22	21	18	2520	0.40
24	21	18	2520	0.40
26	21	18	2520	0.40
28	20,5	18	2460	0.39
30	20,5	18	2460	0.39
32	21	18	2520	0.40
34	20	18	2400	0.38
36	20	18	2400	0.38
38	20	18	2400	0.38
40	20,5	18	6150	0.39
45	20	18	6000	0.38
50	19,5	17	5850	0.37
55	19,5	18	5850	0.37
60	19	17	11400	0.36
70	19	17	11400	0.36
80	19	17	11400	0.36
90	19	17	11400	0.36
100	18,5	17	11100	0.35
110	18,5	17	11100	0.35
120	18,5	17	11100	0.35
130	18	17	10800	0.34
140	18	17	21600	0.34
160	18	17	10800	0.34
170	18	17	10800	0.34

Tabla 28.- Potencia y torque. Efecto de la granulometría, (0.15-3.35mm)

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)	Np
0	26	21	3120	0.49
2	25	20	3000	0.47
4	24	20	2880	0.45
6	23	19	2760	0.43
8	22	19	2640	0.42
10	21,5	19	2580	0.41
12	21	19	2520	0.40
14	21	18	2520	0.40
16	21	18	2520	0.40
18	20,5	18	2460	0.39
20	20	18	2400	0.38
22	20	18	2400	0.38
24	20	18	2400	0.38
26	20	18	2400	0.38
28	19,5	17	2340	0.37
30	19,5	17	2340	0.37
32	19,5	17	2340	0.37
34	19	17	2280	0.36
36	19	17	2280	0.36
38	19	17	2280	0.36
40	19	17	11400	0.36
50	18,5	17	11100	0.35
60	18,5	17	11100	0.35
70	19	17	11400	0.36
80	18,5	17	11100	0.35
90	18,5	17	11100	0.35
100	18,5	17	11100	0.35
110	18	17	10800	0.34
120	18	17	10800	0.34
130	18	17	10800	0.34
140	18	17	10800	0.34
150	18	17	10800	0.34
160	18	17	10800	0.34
170	18	17	10800	0.34

Cinéticas de lavado.

Tabla 29.- Cinética de lavado para impulsor A-310

no. Abs	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Absorbancia
0	0	26	21	0
	2	25	20	
1	4	24	20	0,020
	6	23	19	
2	8	22	19	0,030
	10	21,5	19	
3	12	21	19	0,035
	14	21	18	
4	16	21	18	0,049
	18	20,5	18	
5	20	20	18	0,052
	22	20	18	
6	24	20	18	0,065
	26	20	18	
7	28	19,5	17	0,066
	30	19,5	17	
8	32	19,5	17	0,074
	34	19	17	
	36	19	17	
	38	19	17	
9	40	19	17	0,089
10	50	18,5	17	0,111
11	60	18,5	17	0,133
12	70	19	17	0,136
13	80	18,5	17	0,138
14	90	18,5	17	0,159
15	100	18,5	17	0,168
	110	18	17	
16	120	18	17	0,182
	130	18	17	
17	140	18	17	0,222
	150	18	17	
18	160	18	17	0,234
	170	18	17	
19	180	18	17	0,247
	190	18	17	
20	200	18	17	0,24
	210	17,5	17	
21	220	17,5	17	0,286
22	240	17	16	0,298
23	260	17	16	0,315
24	280	17	16	0,316

Tabla 30.- Cinética de lavado para impulsor A-100

no. Abs	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Absorbancia
0	0	24	20	0
	2	22	19	
1	4	22	19	0,014
	6	21,5	19	
2	8	21,5	19	0,031
	10	21,5	18	
3	12	21	18	0,045
	14	21	18	
4	16	20,5	18	0,054
	18	21	18	
5	20	20	18	0,074
	22	20	18	
6	24	19,5	18	0,081
	26	19,5	18	
7	28	20	18	0,091
	30	19,5	17	
8	35	22	19	0,105
9	40	19,5	17	0,106
10	50	19,5	17	0,111
11	60	19	17	0,138
12	70	19	17	0,162
13	80	19	17	0,193
14	90	18,5	17	0,195
15	100	18,5	18	0,219
16	110	18	17	0,22
17	120	18,5	17	0,215
	130	18,5	17	
18	140	18,5	17	0,26
	150	18,5	17	
19	160	18,5	17	0,283
	170	18,5	17	
10	180	18,5	17	0,31
	190	18,5	17	
21	200	18,5	17	0,355
22	220	18,5	17	0,367
23	240	18,5	17	0,356
24	260	18,5	17	0,386
25	280	18,5	17	0,41
26	300	18,5	17	0,414

Tabla 31.- Cinética de lavado para impulsor R-100

no. Abs	Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Absorbancia
0	0	47	32	0
	2	41	29	
1	4	39	28	0,024
	6	38	27	
2	8	37,5	27	0,03
	10	37,5	27	
3	12	37	26	0,04
	14	37	26	
4	16	37	26	0,054
	18	37	26	
5	20	36,5	26	0,064
	22	36,5	26	
6	24	36,5	26	0,074
	26	36,5	26	
	28	36,5	26	
7	30	36,5	26	0,078
8	35	36	26	0,089
9	40	36	26	0,103
10	50	36	26	0,124
11	60	36	26	0,156
12	70	35,5	26	0,171
13	80	35	26	0,179
14	90	35	26	0,186
15	100	35	25	0,202
16	110	35	25	0,225
17	120	34,5	25	0,194
	130	35	25	
18	140	35	25	0,208
	150	34,5	24,5	
19	160	34	25	0,25
	170	34	25	
10	180	33,5	25	0,245

Efecto de la concentración del suelo.

Tabla 32.- Potencia y Torque. Concentración del suelo 30% w/w

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	26	21	3120
2	25	20	3000
4	24,5	20	2940
6	24	20	2880
8	24	20	2880
10	23,5	20	2820
12	23,5	20	2820
14	23,5	20	2820
16	23,5	20	2820
18	23	20	2760
20	23	20	2760
22	23	20	2760
24	23	20	2760
26	23	19	2760
28	23	19	2760
30	23	19	6900
35	23	19	6900
40	22,5	19	13500
50	22,5	19	13500
60	22	19	13200
70	22	19	13200
80	22	19	13200
90	22	19	13200
100	22	19	13200
110	21,5	19	12900
120	22	19	13200
130	21,5	19	12900
140	22	19	13200
150	21,5	19	12900
160	21,5	19	12900
170	21,5	19	12900
180	21,5	19	232200

Tabla 33.- Potencia y Torque. Concentración del suelo 40% w/w

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	26	21	3120
2	26	21	3120
4	25,5	21	3060
6	25,5	21	3060
8	25,5	21	3060
10	25,5	21	3060
12	25,5	21	3060
14	25,5	21	3060
16	25,5	21	3060
18	25,5	21	3060
20	26	21	3120
22	25,5	21	3060
24	25,5	21	3060
26	25	20	3000
28	25	20	3000
30	25	20	7500
35	25	20	7500
40	25	20	15000
50	24,5	20	14700
60	24	20	14400
70	23,5	20	14100
80	23	20	13800
90	23,5	20	14100
100	23	20	13800
110	23	20	13800
120	23,5	20	14100
130	23	20	13800
140	23	20	13800
150	23	19	13800
160	22,5	19	13500
170	23	19	13800
180	22,5	19	243000

Tabla 34.- Potencia y Torque. Concentración del suelo 10% w/w

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	24	20	2880
2	22	19	2640
4	21,5	19	2580
6	21	18	2520
8	21	18	2520
10	21	18	2520
12	20	18	2400
14	19,5	18	2340
16	19,5	18	2340
18	19	17	2280
20	19	17	2280
22	19	17	2280
24	19	17	2280
26	19	17	2280
28	19	17	2280
30	18,5	17	5550
35	18,5	17	5550
40	18	17	10800
50	18	17	10800
60	17,5	17	10500
70	17,5	16	10500
80	17,5	16	10500
90	17,5	17	10500
100	17	16	10200
110	17	16	10200
120	17	16	10200
130	17	16	10200
140	17	16	10200
150	17	16	10200
160	17	16	10200
170	16,5	16	9900
180	17	16	183600

Tabla 35.- Energía consumida según el porcentaje de sólidos

% Suelo	Energía(KJ)
0	210,6
10	192,42
20	204,36
30	240,36
40	257,46

Efecto de la velocidad.

Tabla 36.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1000 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	8	11	960
2	7	11	840
4	7	11	840
6	7	11	840
8	7	11	840
10	7	11	840
12	7	11	840
14	7	11	840
16	7	11	840
18	6,5	11	780
20	6,5	11	780
22	6,5	11	780
24	6,5	11	780
26	6,5	11	780
28	6,5	11	780
30	6,5	11	1950
35	6,5	11	1950
40	6	11	3600
50	6	11	3600
60	6	11	3600
70	6	11	3600
80	6	11	3600
90	6	11	3600
100	6	11	3600
110	6	11	3600
120	6	11	3600
130	6	11	3600
140	6	11	3600
150	6	11	3600
160	6	10,5	3600
170	6	10	3600
180	6	10	64800

Tabla 37.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1200 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	14,0	15,0	1680
2	14,0	15,0	1680
4	13,5	15,0	1620
6	13,5	15,0	1620
8	13,5	14,0	1620
10	13,5	14,0	1620
12	13,5	14,0	1620
14	13,0	14,0	1560
16	13,0	14,0	1560
18	13,0	14,0	1560
20	12,5	14,0	1500
22	12,5	14,0	1500
24	13,0	14,0	1560
26	12,5	14,0	1500
28	12,5	14,0	1500
30	12,5	14,0	3750
35	12,5	14,0	3750
40	12,5	14,0	7500
50	12,5	14,0	7500
60	12,5	14,0	7500
70	12,5	14,0	7500
80	12,5	14,0	7500
90	12,0	14,0	7200
100	12,0	14,0	7200
110	12,0	14,0	7200
120	12,0	14,0	7200
130	12,0	14,0	7200
140	12,0	14,0	7200
150	12,0	14,0	7200
160	12,0	14,0	7200
170	12,0	14,0	7200

Tabla 38.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1400 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	24	20	2880
2	22	19	2640
4	22	19	2640
6	21,5	19	2580
8	21,5	19	2580
10	21,5	18	2580
12	21	18	2520
14	21	18	2520
16	20,5	18	2460
18	21	18	2520
20	20	18	2400
22	20	18	2400
24	19,5	18	2340
26	19,5	18	2340
28	20	18	2400
30	19,5	17	5850
35	22	19	6600
40	19,5	17	11700
50	19,5	17	11700
60	19	17	11400
70	19	17	11400
80	19	17	11400
90	18,5	17	11100
100	18,5	18	11100
110	18	17	10800
120	18,5	17	11100
130	18,5	17	11100
140	18,5	17	11100
150	18,5	17	11100
160	18,5	17	11100
170	18,5	17	11100

Tabla 39.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1600 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	35	23	4200
2	34	23	4080
4	33	22	3960
6	32	22	3840
8	31,5	22	3780
10	31,5	22	3780
12	31,5	22	3780
14	31	22	3720
16	31	22	3720
18	31	22	3720
20	31	22	3720
22	31	22	3720
24	31	22	3720
26	30,5	22	3660
28	30,5	22	3660
30	30,5	22	9150
35	30,5	22	9150
40	30,5	21	18300
50	30	21	18000
60	30	21	18000
70	30	21	18000
80	29,5	21	17700
90	29,5	21	17700
100	29,5	21	17700
110	29,5	21	17700
120	29,5	21	17700
130	29,5	21	17700
140	29,5	21	17700
150	29,5	21	17700
160	29,5	21	17700
170	29	21	17400

Tabla 40.- Potencia y torque. Impulsor A-100, velocidad 1800 rpm

Tiempo (min)	Poten(Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	53	28	6360
2	50	27	6000
4	48	26	5760
6	47	26	5640
8	47	26	5640
10	45,5	26	5460
12	45,5	26	5460
14	45	25	5400
16	45	25,5	5400
18	44	25	5280
20	43	26	5160
22	45	25	5400
24	45	25	5400
26	45	25,5	5400
28	45	25	5400
30	45	25	13500
35	44,5	25	13350
40	43,5	25	26100
50	43,5	24,5	26100
60	41,5	24,5	24900
70	43	24,5	25800
80	43	24,5	25800
90	43	24,5	25800
100	44	25	26400
110	44	24,5	26400
120	43	24,5	25800
130	42	24	25200
140	42	24	25200
150	42	24	25200
160	43	24,5	25800
170	42	24	25200

Tabla 41.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1000 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	7	11	840
2	7	11	840
4	7	11	840
6	7	11	840
8	7	11	840
10	7	11	840
12	7	11	840
14	7	11	840
16	7	11	840
18	7	11	840
20	7	11	840
22	7	11	840
24	7	11	840
26	7	11	840
28	6,5	11	780
30	6	11	1800
35	6	11	1800
40	6	11	3600
50	6	11	3600
60	6	11	3600
70	6	11	3600
80	6	11	3600
90	6	11	3600
100	6	11	3600
110	6	11	3600
120	6	11	3600
130	6	11	3600
140	6	11	3600
150	6	11	3600
160	6	11	3600
170	6	11	3600
180	6	11	64800

Tabla 42.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1200 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	14,0	16,0	1680
2	14,0	16,0	1680
4	13,0	15,0	1560
6	13,0	15,0	1560
8	13,0	15,0	1560
10	13,0	15,0	1560
12	12,5	15,0	1500
14	12,5	15,0	1500
16	12,5	15,0	1500
18	12,5	15,0	1500
20	12,5	15,0	1500
22	12,5	15,0	1500
24	12,5	14,5	1500
26	12,5	14,5	1500
28	12,5	14,5	1500
30	12,0	14,0	3600
35	12,0	14,0	3600
40	12,0	14,0	7200
50	12,0	14,0	7200
60	12,0	14,0	7200
70	12,0	14,0	7200
80	11,5	14,0	6900
90	11,5	14,0	6900
100	11,5	14,0	6900
110	11,5	14,0	6900
120	11,5	14,0	6900
130	11,0	14,0	6600
140	11,0	14,0	6600
150	11,0	14,0	6600
160	11,0	14,0	6600
170	11,0	14,0	6600

Tabla 43.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1400 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	26	21	3120
2	25	20	3000
4	24	20	2880
6	23	19	2760
8	22	19	2640
10	21,5	19	2580
12	21	19	2520
14	21	18	2520
16	21	18	2520
18	20,5	18	2460
20	20	18	2400
22	20	18	2400
24	20	18	2400
26	20	18	2400
28	19,5	17	2340
30	19,5	17	2340
32	19,5	17	2340
34	19	17	2280
36	19	17	2280
38	19	17	2280
40	19	17	11400
50	18,5	17	11100
60	18,5	17	11100
70	19	17	11400
80	18,5	17	11100
90	18,5	17	11100
100	18,5	17	11100
110	18	17	10800
120	18	17	10800
130	18	17	10800
140	18	17	10800
150	18	17	10800
160	18	17	10800
170	18	17	10800

Tabla 44.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1600 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	39	25	4680
2	37	24	4440
4	36	23	4320
6	36	23	4320
8	35,5	23	4260
10	35,5	23	4260
12	35	23	4200
14	34,5	23	4140
16	34,5	23	4140
18	34	23	4080
20	34	23	4080
22	33,5	22	4020
24	33,5	22	4020
26	33,5	22	4020
28	33,5	22	4020
30	33,5	22	10050
35	33,5	22	10050
40	33	22	19800
50	33	22	19800
60	33	22	19800
70	33	22	19800
80	33	22	19800
90	32	21	19200
100	32	22	19200
110	31,5	22	18900
120	31	21	18600
130	31	21	18600
140	31	21	18600
150	31	21	18600
160	30,5	21	18300
170	30,5	21	18300

Tabla 45.- Potencia y torque. Impulsor A-310, velocidad 1800 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	54	28	6480
2	52	27	6240
4	50,5	27	6060
6	50	26	6000
8	49	26	5880
10	48	26	5760
12	48	26	5760
14	48	26	5760
16	48	26	5760
18	48	26	5760
20	48	26	5760
22	47,5	26	5700
24	47	25	5640
26	47	25	5640
28	46,5	25	5580
30	46,5	25	13950
35	46	25	13800
40	46	25	27600
50	46	25	27600
60	46	24	27600
70	46	25	27600
80	45	24	27000
90	45	24	27000
100	46	25	27600
110	45,5	24	27300
120	45,5	24	27300
130	45,5	24	27300
140	45	24	27000
150	44,5	24	26700
160	44,5	24	26700
170	44	24	26400

Tabla 46.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1000 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	16	18	1920
2	15	17	1800
4	15	17	1800
6	15	17	1800
8	14,5	17	1740
10	14,5	17	1740
12	14,5	17	1740
14	14	17	1680
16	14	17	1680
18	14	17	1680
20	14	17	1680
22	14	17	1680
24	14	17	1680
26	14	17	1680
28	14	17	1680
30	14	17	4200
35	14	17	4200
40	14	17	8400
50	14	17	8400
60	14	17	8400
70	14	17	8400
80	13,5	17	8100
90	13,5	17	8100
100	13,5	17	8100
110	13,5	17	8100
120	13,5	17	8100
130	14	16	8400
140	13	16	7800
150	13	16	7800
160	13	16	7800
170	13	16	7800

Tabla 47.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1200 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	30,0	25,0	3600
2	28,0	24,0	3360
4	27,0	23,0	3240
6	26,0	23,0	3120
8	26,0	23,0	3120
10	25,5	22,0	3060
12	25,0	22,0	3000
14	25,0	22,0	3000
16	25,0	22,0	3000
18	25,0	22,0	3000
20	25,0	22,0	3000
22	25,0	22,0	3000
24	25,0	22,0	3000
26	25,0	22,0	3000
28	25,0	22,0	3000
30	25,0	22,0	7500
35	25,0	22,0	7500
40	25,0	22,0	15000
50	24,5	22,0	14700
60	25,0	22,0	15000
70	25,0	22,0	15000
80	25,0	22,0	15000
90	25,0	22,0	15000
100	24,5	22,0	14700
110	25,0	22,0	15000
120	25,0	22,0	15000
130	24,5	22,0	14700
140	24,0	22,0	14400
150	24,0	22,0	14400
160	24,0	22,0	14400
170	23,0	21,0	13800

Tabla 48.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1400 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	47	32	5640
2	41	29	4920
4	39	28	4680
6	38	27	4560
8	37,5	27	4500
10	37,5	27	4500
12	37	26	4440
14	37	26	4440
16	37	26	4440
18	37	26	4440
20	36,5	26	4380
22	36,5	26	4380
24	36,5	26	4380
26	36,5	26	4380
28	36,5	26	4380
30	36,5	26	10950
35	36	26	10800
40	36	26	21600
50	36	26	21600
60	36	26	21600
70	35,5	26	21300
80	35	26	21000
90	35	26	21000
100	35	25	21000
110	35	25	21000
120	34,5	25	20700
130	35	25	21000
140	35	25	21000
150	34,5	24,5	20700
160	34	25	20400
170	34	25	20400

Tabla 49.- Potencia y torque. Impulsor R-100, velocidad 1600 rpm

Tiempo (min)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Energía (J)
0	61	35	7320
2	57	33	6840
4	55	32	6600
6	53	32	6360
8	52	31	6240
10	51	31	6120
12	51	31	6120
14	51	31	6120
16	50,5	30	6060
18	50,5	30	6060
20	50	30	6000
22	50	30	6000
24	50	30	6000
26	50	30	6000
28	50	30	6000
30	50	30	15000
35	49,5	30	14850
40	49,5	30	29700
50	50	30	30000
60	50	30	30000
70	49,5	30	29700
80	49,5	30	29700
90	49	30	29400
100	49	30	29400
110	49	30	29400
120	49	30	29400
130	48,5	29	29100
140	48,5	29	29100
150	49	29	29400
160	49	30	29400
170	48	29	28800

Tabla 50.- Tabla de remociones y energía para diferentes impulsores

A-310			
RPM	Re	Energía(kJ)	Remoción (%)
1000	123423	66,54	17,41
1200	148107	126,6	38,79
1400	172792	171,96	25,23
1600	197476	350,4	46,16
1800	222161	496,23	27,17
A-100			
RPM	Re	Energía(kJ)	Remoción (%)
1000	76194	66,66	12,66
1200	91433	133,50	17,69
1400	106672	207,45	32,15
1600	121911	324,36	24,94
1800	137150	469,71	18,64
R-100			
RPM	Re	Energía(kJ)	Remoción (%)
1000	857104	148,08	58,93
1200	102852	267,6	45,25
1400	119994	384,51	46,81
1600	137136	536,19	53,31

Tabla 51.- Potencia y Torque. Pruebas en agua para los tres impulsores

Impulsor	A-310		A-100		R-100	
	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)	Potencia (Watts)	Torque (N.cm)
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0
200	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0
250	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0
300	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	3.0
350	1.0	2.0	0.0	2.0	0.0	4.0
400	1.0	3.0	0.0	3.0	1.0	5.0
450	1.0	3.0	0.5	3.0	1.0	5.0
500	1.0	4.0	0.5	4.0	2.0	6.0
550	1.0	4.5	1.0	4.0	2.0	7.0
600	2.0	5.0	2.0	5.0	3.0	8.0
650	1.5	6.0	2.0	6.0	4.0	8.0
700	2.0	7.0	2.0	6.5	6.0	9.0
750	2.0	7.0	1.5	7.0	5.5	10.0
800	2.0	8.0	2.0	7.5	7.0	11.0
850	3.0	8.0	4.0	8.0	8.0	12.0
900	4.5	9.0	4.5	8.5	9.5	13.0
950	5.3	10.0	4.8	9.5	10.8	14.0
1000	7.0	10.5	4.5	10.0	11.8	14.0
1050	8.5	11.0	6.0	11.0	14.5	15.5
1100	8.5	12.0	7.0	11.0	15.5	17.0
1150	10.0	13.0	8.5	12.5	19.0	18.0
1200	11.0	14.0	9.8	13.0	22.8	20.0
1250	13.0	14.5	11.8	13.5	25.0	21.0
1300	16.0	16.0	12.3	14.5	26.5	22.0
1350	18.0	17.0	14.8	15.5	30.0	23.0
1400	19.5	17.5	17.0	16.0	33.0	24.0
1450	21.5	18.5	18.5	17.0	36.0	25.5
1500	25.5	20.0	21.0	18.0	39.5	27.0
1550	26.5	21.0	22.3	19.0	43.0	28.0
1600	30.0	22.0	25.5	20.0	47.0	29.0
1650	33.0	22.5	30.5	21.0	49.0	30.0
1700	37.0	23.5	34.0	23.0	53.5	31.0
1750	37.5	23.5	35.3	23.5	56.0	32.0
1800	40.5	24.3	39.0	24.8	60.5	33.0

Tabla 52.- Acrónimos usados en la tabla 18 y 19 y en las figuras 43, 44 y 45

Abreviatura	Significado
S	Suelo
I	Inicial
D	Duplicado
L	Lavado
G1	Granulometría 1 (0.15-0.85mm)
G2	Granulometría 2 (0.15-2.38mm)
G3	Granulometría 3 (0.15-3.35mm)
EG	Efecto de la granulometría.
EC	Efecto de la concentración.
EV	Efecto de la velocidad.
X1	Impulsor A-310
X2	Impulsor A-100
X3	Impulsor R-100
V1	1000 rpm
V2	1200 rpm
V3	1400 rpm
V4	1600 rpm
V5	1800 rpm
C1	10% w/w sólidos
C2	20% w/w sólidos
C3	30% w/w sólidos
C4	40% w/w sólidos

11. - Referencias.

- Angst, R., Kraume, M., Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales: Particle distribution and power consumption, *Chemical Engineering Science*, vol. 61, Alemania, 2006, pg. 2864-2870.
- Archard, A. D., Marouche, M., Boisson, H. C., Hydrodynamics and Metzner-Otto correlation in stirred vessels for yield stress fluid, *Chemical Engineering Journal*, vol. 125, Francia, 2006, pg. 15-24.
- Armenante, P., Uehara, E., Effect of low of-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete suspension of solids in stirred tanks, *Chemical Engineering Science*, vol. 53, no. 9, United States of America, 1998, pg. 1757-1775.
- Bakker, A., Fasano, J., Myers, K., Effects of Flow Pattern on the Solids Distribution in a Stirred Tank, *The Online CFM Book*, 2000, pg. 2-7.
- Belloc, C., Tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado de suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- Biswas, P. K., Godiwalla, K. M., Sanyal, D., A simple technique for measurement of apparent viscosity of slurries: sand-water system, *Material Design*, vol. 23, India, 2002, pg. 511-519.
- Climent, M., Estudios del mezclado en el proceso de lavado de suelos contaminados con hidrocarburos, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2007.
- Constain, D. T., Paunescu M., Suspension of solid particles in spherical stirred vessels, *Chemical Engineering Science*, vol. 55, Rumania, 2000, pg. 2989-2993.
- Diario Oficial de la Federación, México, 2005.
- Flores, A., Medidas de mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre, Instituto Mexicano del transporte, México, 2004.

- Flores, M., Tellez, R., Torres, S., Medidas de Mitigación para uso de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos en infraestructura de transporte terrestre, Secretaría de comunicaciones y transportes, México, 2004.
- Holland, A., Chapman, F., Liquid mixing and processing in stirred tanks, Reinhold, Estados Unidos de America, 1995.
- Iturbe, R., Flores, C., Chavez, C., Remediation of Contaminated soil using soil washing and biopile methodologies at a field level, Soils and sediments, México, 2004, pg. 1-8.
- Iturbe, R., Flores, R., Torres, L. G., Subsoil contaminated by hydrocarbons in an out-of-service oil distribution and storage station in Zacatecas, México, Environmental Geology, vol. 44, México, 2003, pg. 608-620.
- Kuhlman, M.I., Greenfield, T. M., Simplified soil washing processes for a variety of soils, Journal Hazardous Materials, no. 66, Estados Unidos de America, Houston, 1999, pg. 31-45.
- Kumaresan, J. B., Joshi, J. B., Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks, Chemical Engineering Journal, vol. 115, India, 2006, pg. 173-193.
- Lange, Robert K., Surfactants, Hanser Publishers, Munich, Estados Unidos de América, 1999, pg. 1-23.
- Lopez, J., Iturbe, R., Torres, L. G., Washing of soil contaminated whit PAHs and Heavy Petroleum Fractions using two anionic and one ionic surfactant: Effect of Salt addition, Journal of environmental science and health, vol. 39, no. 9, México, 2004, pg. 2293-2306.
- Manual M-MMP-1-06, Granulometría de Materiales Compactables para Terraceria, pg. 14.
- Martínez, V. E., López, F., Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de un suelo arcilloso, Instituto Mexicano del Petróleo, México, 2000, pg. 9-17.
- Mirsal, A., Soil Pollution, Springer, Alemania, 2004.

- Norma Oficial Mexicana, NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación, Secretaría de medio Ambiente y recursos Naturales, 2003.
- Oldshue, Y. J., Fluid Mixing Technology, Mc Graw Hill, Estados Unidos de América, 1983.
- Osorio, F., Diseño y construcción de un reactor experimental para tratamiento biológico de suelos contaminados con hidrocarburos, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1998.
- Perry, H., Manual del Ingeniero Químico, vol. 6, Mc Graw-Hill, Estados Unidos de América, 1985, pg. 19.5-19.15.
- Riser, R., Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers, estados Unidos de America, 1998, pg. 542.
- Salager, J., Surfactantes tipos y usos, Universidad de los Andes, Venezuela, 2002.
- Saval, S., Biorremediación de suelos y acuíferos. Situación actual y perspectivas en México. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, A.C. Vol.3, México, 1998, pg. 71-76.
- Segura, A., Reducción del tiempo de mezclado en tanques agitados por medio de perturbaciones geométricas y dinámicas con fluidos no-newtonianos, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica Electricista, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1998.
- Sellers, K., Pedersen. T. A., Review of soil mound technologies for the bioremediation of hydrocarbon contaminate soil, Hydrocarbon contaminate soil, vol. 3, Estados Unidos de America, 1993, pg. 301-304.
- Suchanek, M., Kostal, J., Demnerova, K., Use of sodium dodecyl sulphate for stimulation of biodegradation of n-alkanes without residual contamination by the surfactant, International Biodeterioration y Biodegradation, vol. 45, Republica Checa, 2000, pg. 27-33.

- Takahashi, K., Fujita, K., A study of the agitation speed to just cause complete suspension for non-spherical particles, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 28, no. 2, Tokio, 1995, pg. 237-240.
- Takahashi, K., Gidoh, Y., Yokota, T., Particle-impeller impact in an agitated vessel equipped with a Rushton turbine, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 25, no. 1, Tokio, 1992, pg. 73-77.
- Takenaka, K., Ciervo, G., Monti, D., Mixing of three-phase systems at high solids content (up to 40% w/w) using radial and mixed flow impellers, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 34, no. 5, Japón, 2000, pg. 606-612.
- Tala, R., Bioremediation of oil-contaminated soil in Kuwait (Part 2): ex situ biological treatment technologies, *The Fifth International in situ and on site Bioremediation Symposium*, Kuwait, 1998, pg. 249-256.
- Torres, L. G., Baldala, E. R., Saquelares, J., Caracterización y pruebas de tratabilidad de suelos contaminados con crudo proveniente de Tabasco: Efecto del tamaño de las partículas, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
- Torres, L. G., Orantes, J., Iturbe, R., Critical micellar concentrations for three surfactants and their diesel-removal efficiencies in petroleum-contaminated soils, *Environmental Geosciences*, vol. 10, no. 1, México, 2003, pg. 28-36.
- Torres, L. G., Urquiza, G., Iturbe, R., Characterization of soils contaminated with light, medium and heavy Mexican crude oils, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Ingeniería Ambiental, México, 2002.
- Torres, L. G., Zamora, E., Preparation and power consumption of surfactant-fuel oil-water emulsions using axial, radial, and mixed flow impellers, *Fuel*, vol. 81, México, 2002, pg. 2289-2302.
- Uhl, V. W., Gray, J., *Mixing theory and practice* vol. 3, Academic Press, Estados Unidos de America, Philadelphia, 1986, pg. 189-250.

- Van, D. J, Remediation technologies screening matrix and reference Guide. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA, 2007.
- Volke, T., Velasco, J., Tecnología de remediación para suelos contaminados, Instituto de Ecología, México, 2002.
- Wu, J., Zhu, P., Bandopadhyay, P., Solids suspension with axial-flow impellers, AIChE Journal, vol. 46, no. 3, Australia, 2000, pg. 647-649.
- Yamamura, H., Takahashi, K., Minimum impeller speeds for complete liquid-liquid dispersion in baffled vessel, Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 32, no. 4, Japan, 1999, pg. 395-401.

Paginas Web Consultadas (2007).

- <http://normas.imt.mx/NORMAS/1%20MMP/1%20Suelos%20y%20Terracerias/M-MMP-1-02-03.pdf>, 20 de Julio 2007.
- www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/hipertexto/05PrinEcos/110Suelo.htm, 12 de Agosto 2007.
- www.profepa.gob.mx/profepa, 12 de Agosto de 2007.
- www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/, 17 de Agosto de 2007.
- www.inegi.gob.mx, 20 de Diciembre de 2007.
- www.cna.gob.mx, 20 de Septiembre de 2007.
- <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>, 20 de Julio 2007.
- www2.ing.puc.cl/~ingeot/ice1603/lab1/lab1.htm, 12 de Agosto 2007.
- www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/372/fuentes.html, 12 de Agosto 2007.