

CAPÍTULO 9

RESULTADOS Y ANÁLISIS

9.1 Caracterización del suelo

9.1.1 Contenido de agua en el suelo

El propósito de realizar esta prueba es la determinación del contenido de agua presente en una determinada muestra de suelo. Por lo tanto, de acuerdo a los datos obtenidos tenemos que:

$$W_1 = W_{caps} + W_{suelo_{humedo}}$$

$$W_2 = W_{caps} + W_{suelo_{seco}}$$

$$W_{agua_{gramos}} = W_1 - W_2$$

$$Contenido\ agua\% = \frac{W_{agua_{gramos}}}{W_{suelo_{seco}}}$$

De donde:

$W_1 =$ Peso del suelo húmedo + peso de cápsula de porcelana

$W_2 =$ Peso del suelo seco + peso de cápsula de porcelana

$W_{caps} =$ Peso de la capsula de porcelana

$W_{suelo_{humedo}} =$ Peso suelo húmedo

$W_{suelo_{seco}} =$ Peso suelo seco

$W_{agua_{gramos}} =$ Peso del agua en gramos

Entonces:

$$W_1 = 50 \text{ gr} + 100 \text{ gr}$$

$$W_2 = 50 \text{ gr} + 90.7 \text{ gr}$$

$$W_1 = 150 \text{ gr}$$

$$W_2 = 140.7 \text{ gr}$$

$$W_{\text{agua}_{\text{gramos}}} = 9.3 \text{ gr}$$

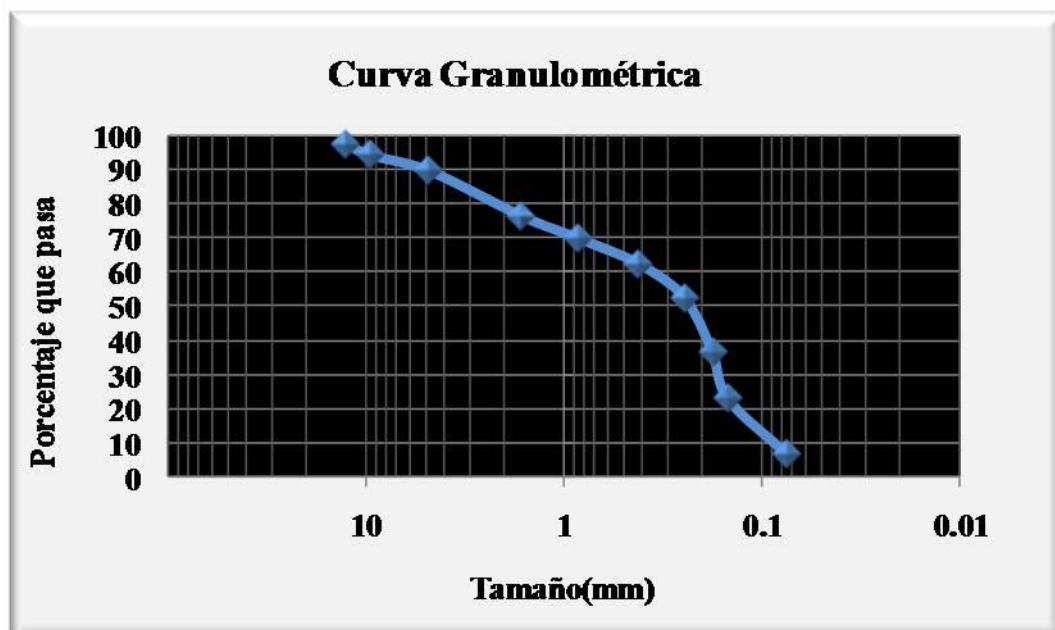
$$\% \text{ Contenido Agua} = \frac{W_{\text{agua}_{\text{gramos}}}}{W_{\text{suelo}_{\text{seco}}}} = \frac{9.3 \text{ gr}}{90.7} \cdot 100 = 10.25\%$$

$$\% \text{ Contenido Agua} = 10.25\%$$

9.1.2 Granulometría

La prueba granulométrica del suelo fue realizada con la intención de saber el tipo de suelo con el que se está trabajando. El suelo fue cribado con la ayuda de mallas con anchos de entramados en orden decreciente.

Figura 9.1. Curva de distribución granulométrica



De acuerdo a los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{y} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Los resultados de las relaciones entre el tamaño de partículas existentes en nuestro material son:

$$C_u = 4 \quad \text{y} \quad C_c = 1$$

Con todos los cálculos anteriores correspondientes a la caracterización del suelo y debido a que más de la mitad de la fracción gruesa de material pasa a través de la malla No. 4, el suelo empleado en esta investigación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) corresponde a una arena mal graduada, con poco o nada de partículas finas, con símbolo SP.

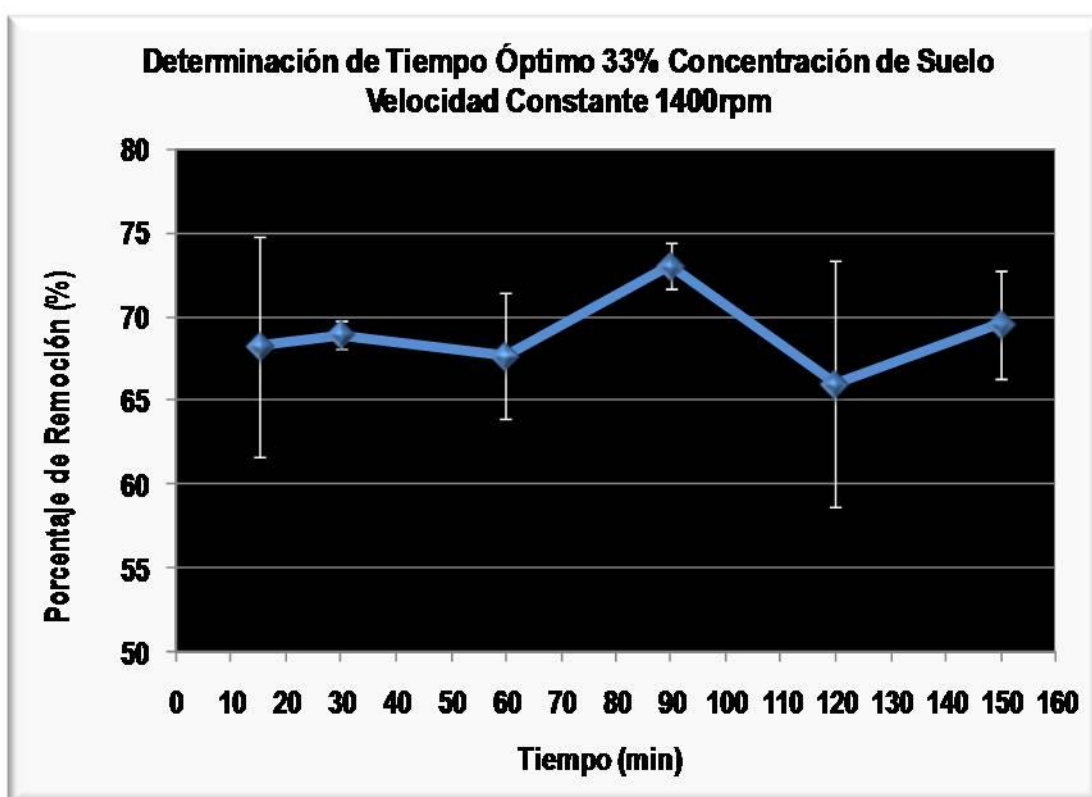
9.2 Determinación de Tiempo Óptimo

La elaboración de las pruebas de determinación de tiempo óptimo son un parte aguas para esta investigación, ya que dependerá de los resultados se obtengan para tomar como estándar un tiempo determinado en las futuras pruebas de lavado de suelos contaminados en esta investigación. El tiempo de duración de esta prueba fue de 2.5 horas y los intervalos de tiempo que fueron puestos a prueba son 15, 30, 60, 90, 120 y 150 min. La velocidad del impulsor fue de 1400 rpm, la relación agua/suelo fue de 40% (p/v), la

concentración de surfactante (SDS) fue de 0.5% del total de volumen de agua destilada empleada por corrida de lavado y el impulsor empleado para la realización de esta investigación es de 4 paletas inclinadas a 45° de tipo axial (A200), obteniendo los resultados que se muestran en la figura 9.2:

Figura 9.2

Determinación de tiempo óptimo para el proceso de lavado de suelos contaminados con 2,4-D.



La figura 9.2 muestra el porcentaje de remoción obtenido de la realización de la prueba de determinación de tiempo óptimo por duplicado. Claramente se puede apreciar con la primera corrida de lavado que con tan sólo 15 minutos de lavado la eficiencia de remoción se dispara a casi 75%, sin embargo siguiendo la metodología antes descrita se

tomaron más muestras a los 30, 60, 90, 120 y 150 minutos, mostrando resultados bastante buenos para esta investigación.

En la segunda corrida de lavado; es decir, al realizar el duplicado de la prueba para determinar el tiempo óptimo de lavado, se puede apreciar de mejor manera que a pesar que en la primer experiencia de lavado se obtuvo un muy buen resultado en poco tiempo, el duplicado demuestra que el mejor tiempo de ejecución de las pruebas de lavado es en un intervalo de 90 min, ya que tanto en la primera, como en la segunda corrida la eficiencia de remoción se mantiene constante entre 71 y 75% de eficiencia, siendo estas cifras las de mayor estabilidad y eficiencia de lavado en todos los intervalos de tiempo analizados.

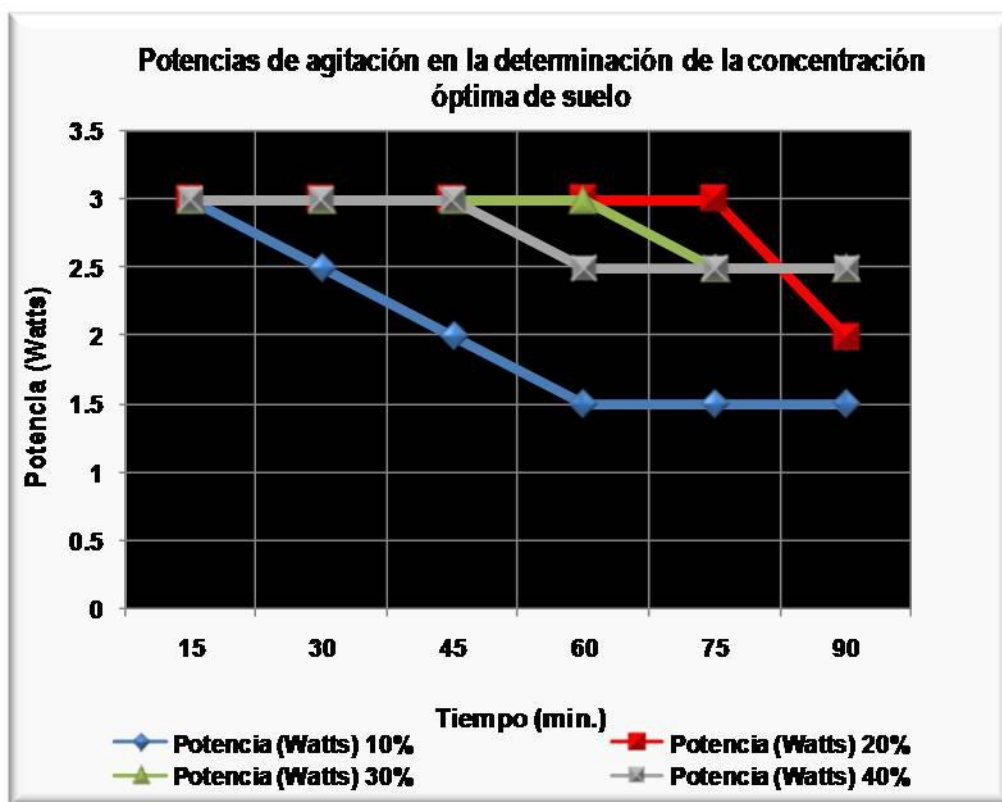
Cabe mencionar que debido a la geometría del impulsor, se logró una muy buena dispersión de sólidos, esto gracias a la capacidad de bombeo que lo caracteriza. Por lo tanto, con la finalidad de obtener resultados con un comportamiento más estable en las lecturas de remoción, el tiempo de ejecución para las pruebas de determinación de velocidad y concentración óptima, será de 90 min.

9.3 Pruebas de lavado a velocidad constante con variaciones en la relación de suelo/agua

Teniendo definido el tiempo de ejecución del proceso de lavado de suelos contaminados con plaguicida 2,4-D, se procedió a realizar las pruebas correspondientes a la determinación de la concentración óptima de suelo en el sistema. Para esto, se propusieron

concentraciones de suelo de 10, 20, 30 y 40% (p/v), el tipo de impulsor y su posición, la concentración de la solución agua-surfactante (SDS), las dimensiones del vaso de agitación y la velocidad (1400 rpm) a la que se someterán las diferentes concentraciones de suelo antes mencionadas no cambiarán.

Figura 9.3. Potencias de agitación en la determinación de la concentración óptima de suelo.



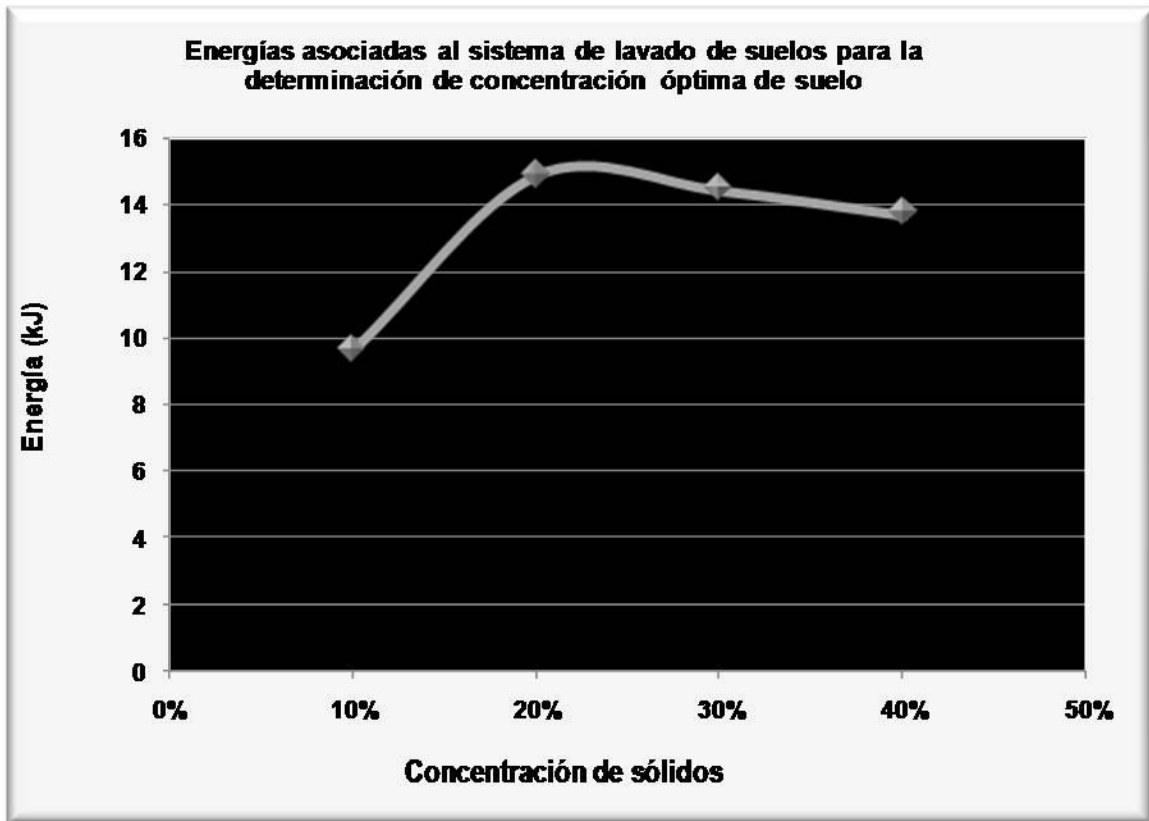
En la figura 9.3 se muestra la relación de potencias necesarias para la ejecución del proceso de lavado de suelos en la etapa de determinación de concentración óptima de suelo, como se puede observar, la potencia inicial de operación para todas las concentraciones puestas a prueba es de 3 Watts, sin embargo, una vez logrado el movimiento de la mezcla suelo-agua destilada-surfactante, la potencia necesaria para mantenerlo cambia, tal es el

caso en la prueba de concentración de suelo de 10% y es debido a que al contener la mínima proporción de suelo, al sistema de agitación le es mucho más fácil mantener en movimiento una mezcla con menor proporción de sólidos con una potencia de agitación relativamente baja. Sin embargo lo interesante no sólo es conseguir una potencia de agitación mínima en el sistema, sino que además de obtener una demanda baja de potencia para desarrollar el sistema de lavado de suelos, es necesario conseguir una relación satisfactoria entre el consumo de potencia y la cantidad de suelo en el sistema mismo; es decir, obtener la mayor cantidad de suelo lavado con un menor consumo de potencia posible.

Tal fue el caso en la prueba a 40% de concentración en la relación suelo-agua destilada-surfactante, ya que como se puede observar, el consumo de potencia se mantuvo en 3 watts hasta la mitad del tiempo de lavado, disminuyendo la demanda de potencia después de este tiempo y así mismo manteniéndose en 2.5 watts hasta el final de la prueba (90 min). De esta manera al compararse con las demás corridas de lavado, se obtuvo no sólo un bajo consumo de potencia, sino que además este resultado se obtuvo con una mayor concentración de suelo.

Por lo tanto, implementando este sistema de lavado es posible lavar cantidades de suelo significativas a un bajo consumo de potencia, pero lo más importante ahora será determinar la energía necesaria para lograrlo, por lo anterior se propone analizar la siguiente gráfica de energías necesarias en el proceso de lavado de suelos para la determinación de concentración óptima de suelo.

Figura 9.4. Energías asociadas al sistema de lavado de suelos para la determinación de concentración óptima de suelo

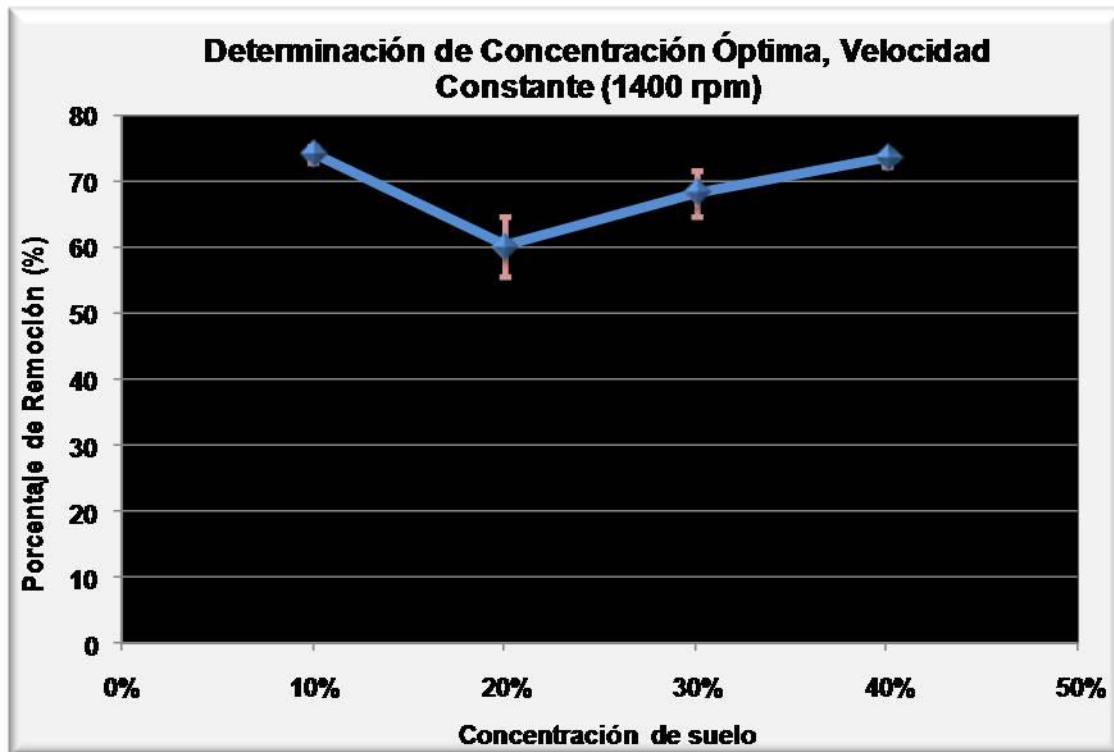


Con la figura 9.4 es ahora mucho más fácil aterrizar la idea de que al demandar menor consumo de potencia nuestro sistema de lavado de suelos nos permitirá ahorrar mayor energía. La energía asociada al consumo de potencia se obtuvo de integrar el área bajo la curva de las potencias mismas en cada una de las concentraciones de suelo analizadas. De esta manera se puede observar que a pesar de tener la concentración más alta de suelo (40%) la energía consumida es menor que la consumida por los sistemas con concentraciones menores (20 y 30%), de aquí que lavando 180 gr de suelo (40%) no sólo nos da un beneficio en cuanto a cantidad de suelo lavado, el beneficio también se refleja a la baja energía consumida por el sistema. Ahora bien, lo importante en este trabajo de

investigación es la eficiencia de remoción obtenida en cada una de las corridas de lavado a bajos costos de energía, por lo tanto debemos así mismo contrastar los resultados obtenidos en consumo de potencia y energía asociada, con los porcentajes de remoción; es decir, determinar de esta manera la concentración óptima de suelo de acuerdo a su eficiencia de remoción del herbicida 2,4-D.

Debido a lo anterior, en la figura 9.5 es posible observar que no sólo a una concentración del 40% de suelo (180 gr) se obtuvieron consumos de potencia y energía bajos; considerando que la cantidad de suelo es mucho mayor a las demás concentraciones puestas a prueba, sino que también la eficiencia de remoción resultó ser mayor a las pruebas con concentraciones de suelo menores. De esta manera, no sólo se lavará una mayor cantidad de suelo, sino que en base a los resultados mostrados en la siguiente gráfica, se logrará una eficiencia de remoción de casi 74%, y no hay que olvidar que todo esto es posible a un bajo consumo de energía.

Figura 9.5. Determinación de concentración óptima de suelo a velocidad constante (1400 rpm).



Como resultado, a una concentración de 40% de suelo (180 gr), al 0.5% de concentración de SDS (2.25gr), en una solución de agua destilada (450 mL), en un vaso de agitación con 4 deflectores a 90° cada uno y con la ayuda de un impulsor de tipo axial con 4 paletas inclinadas a 45°, la eficiencia de remoción obtenida fue de un poco más del 73%, con un consumo de energía de poco menos de 14kJ.

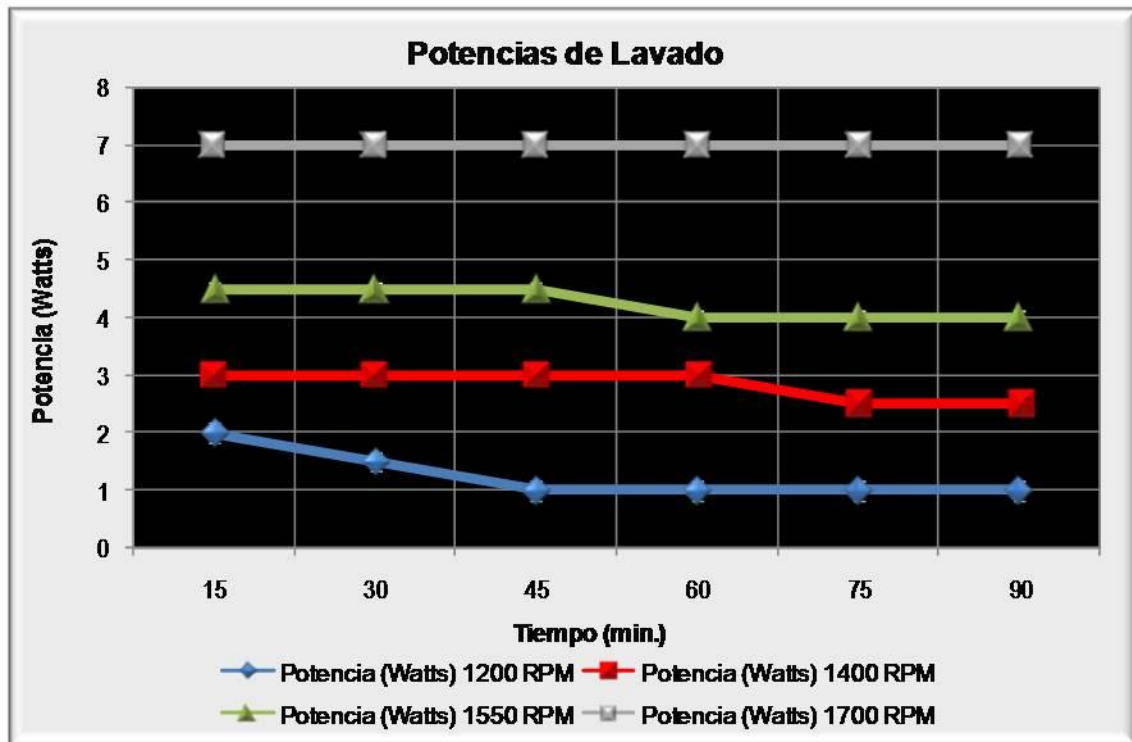
9.4 Pruebas de lavado a concentración de suelo constante con variaciones de velocidad

Las siguientes pruebas se realizaron para determinar la velocidad óptima que nos brinde un menor consumo de potencia, una baja energía asociada, en conjunto con un alto porcentaje de remoción de herbicida 2,4-D.

Se determinó una concentración de suelo constante para poder observar el efecto que tiene la variación de velocidades, la concentración de suelo elegida es de 40% es decir, en relación al volumen de la solución de agua destilada y surfactante (450 mL), el vaso de agitación, los deflectores, el impulsor empleado así como la posición de ellos serán los mismos; sin embargo será puesto a prueba el efecto que tiene la variación de velocidades sobre el sistema de lavado de suelos, las velocidades empleadas para esta fase de determinación de velocidad óptima serán de 1200, 1400, 1550 y 1700 rpm debido a experiencias obtenidas con anterioridad en otros trabajos de investigación (Castillo, 2008), así mismo, se recabaron lecturas de consumo de potencia en intervalos de tiempo de 15min.

A continuación, en la figura 9.6 se muestra el resultado de cada una de las lecturas de potencia generados por el sistema de lavado de suelos a diferentes velocidades de agitación.

Figura 9.6. Determinación de velocidad óptima de lavado.



Los datos de consumo de potencia en la figura 9.6, nos muestran la uniformidad y la estrecha relación entre el consumo de potencia y la velocidad a la que el sistema es sometido. Por lo tanto, si el impulsor es sometido a velocidades cada vez mayores, ese mismo aumento se verá reflejado en el consumo de potencia para poder realizar esta demanda de velocidad. Es muy claro que la diferencia de velocidades entre 1200 y 1700 rpm es demasiado en un sistema de agitación, ya que para poner en movimiento la cantidad de suelo antes descrita (40%) es necesario cambiar de un estado de reposo a un estado de movimiento vigoroso, ese esfuerzo necesario fue medido en potencia consumida, dicha

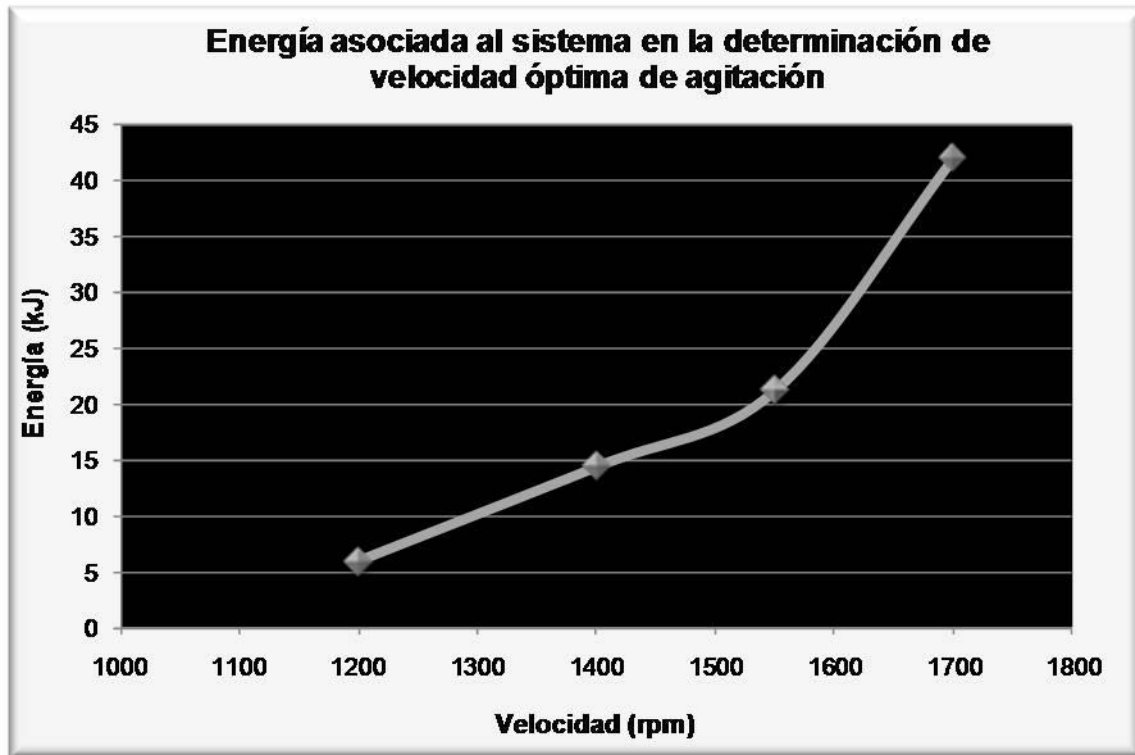
potencia se ve reflejada en la gráfica anterior. Así mismo, también se observa que en las velocidades de 1200, 1400 y 1550 rpm el consumo de potencia al principio es alto y constante, pero a través del tiempo, ese mismo consumo de potencia se estabiliza y disminuye, debido a que el estado de homogeneidad del suelo ya se ha alcanzado y el esfuerzo para mantener la mezcla en movimiento ya no es la misma que al principio.

Sin embargo, el consumo de potencia del impulsor a 1700 rpm, se mantuvo constante durante toda el tiempo de la prueba (90 min) en 7 watts, sin duda es atribuible al esfuerzo mayor necesario para mantener al sistema en movimiento a una velocidad constante.

Ahora bien, con el fin de comparar el consumo energético del impulsor A200 a diferentes velocidades, la siguiente gráfica contiene los datos de consumo de energía durante cada uno de los procesos de lavado de suelos en sus distintas velocidades. Como ya se mencionó con anterioridad, estos datos de consumo energético salen de calcular la integral bajo la curva del consumo de potencia del sistema de lavado de suelos en la fase de determinación de la velocidad óptima de agitación.

Figura 9.7.

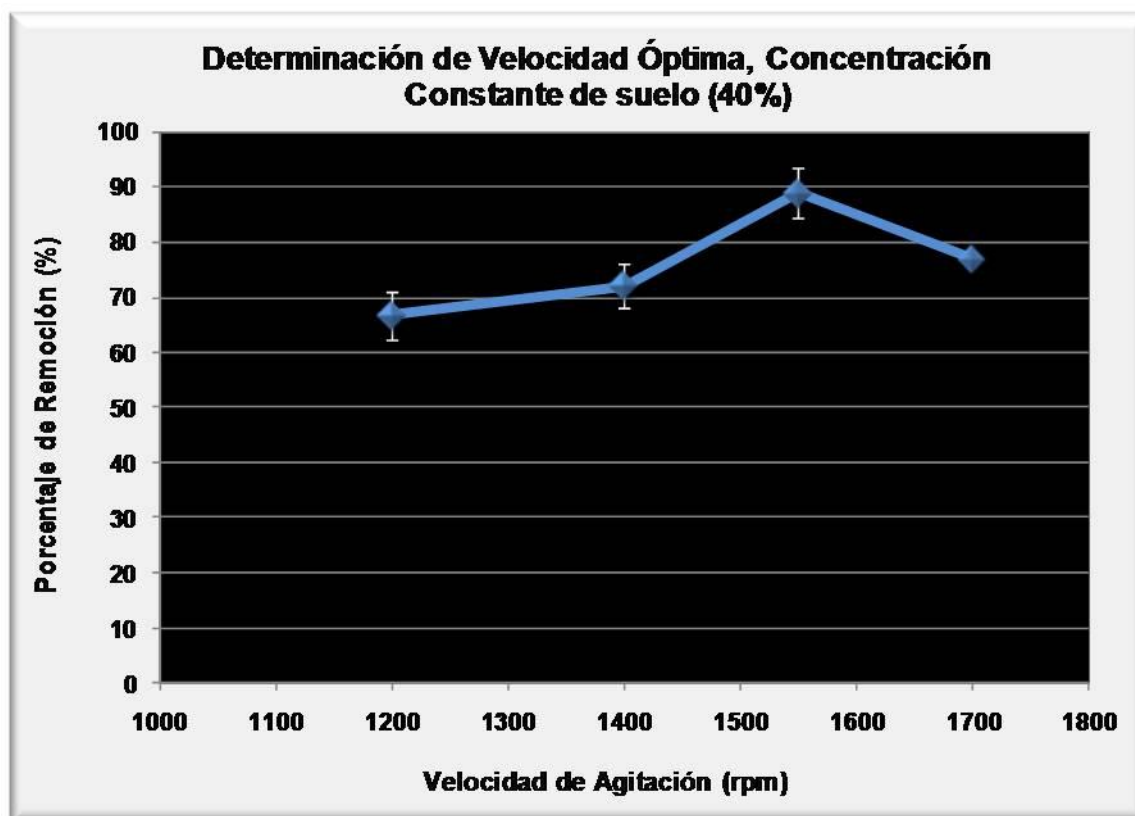
Energía asociada al sistema de lavado de suelos en la determinación de velocidad óptima de agitación.



Como puede notarse en la figura 9.7, a medida que la velocidad de agitación aumenta, la demanda de energía también se ve afectada, aumentando de la misma manera. A pesar de los resultados obtenidos a velocidad constante, es necesario también saber el porcentaje de remoción óptimo variando la velocidad de agitación, es decir, si además de contar con un bajo consumo de potencia a través del tiempo, un bajo costo energético durante todo el proceso, también logramos una eficiencia de remoción significativamente alta, pues será en ese caso el determinante para la elección de la velocidad óptima de lavado.

Con los resultados de la figura 9.8, se puede llegar a una decisión considerando los resultados de remoción obtenidos en las pruebas de concentración constante y de velocidades diferentes.

Figura 9.8. Porcentaje de remoción obtenido en la determinación de velocidad óptima.



Por lo tanto, con los datos de la figura 9.8 es posible notar que la velocidad de agitación que obtuvo el porcentaje más alto de remoción del contaminante 2,4-D del suelo es la de 1550 rpm, arrojándonos un poco menos del 90% de remoción, seguido de la velocidad de lavado de 1700 rpm con un porcentaje de remoción de 77%, así mismo la prueba de velocidad de 1400 rpm obtuvo un porcentaje de extracción del contaminante del 72% y finalmente el porcentaje de extracción más bajo obtenido de las pruebas de

determinación de tiempo óptimo fue a la velocidad de 1200 rpm, con un porcentaje de extracción del 67%. Sin embargo, como se hizo con las pruebas de determinación de concentración óptima de suelo, es importante contrastar los resultados obtenidos de remoción con los obtenidos de consumo de potencia y energía asociada al proceso completo.

Por una parte se tiene que a 1200 rpm, el consumo de potencia es el más bajo de las pruebas de determinación de velocidad óptima, por lo mismo el consumo energético es de casi 6kJ, muy bajo para un sistema de lavado de suelos con la ayuda de impulsores. Sin embargo, el porcentaje de remoción del contaminante es el más pobre de todo el sistema montado; es decir, a pesar de haberse obtenido un porcentaje de remoción mayor al 50%; en comparación con los demás resultados, un 67% de remoción podría no ser la mejor opción si lo que se desea es extraer la mayor cantidad posible del contaminante, a pesar de esto, ésta velocidad (1200 rpm) sería la ideal si la intención fuera obtener buenos resultados de remoción a bajos costos energéticos en un tiempo de lavado de 90 min.

Como segunda alternativa se tiene que a 1400 rpm el consumo de potencia es de 3 watts al principio, estabilizándose a 2.5 watts con el paso del tiempo hasta el término de la prueba, cabe destacar el bajo consumo de potencia necesario para desarrollar 1400 rpm, por lo tanto la energía consumida a esta velocidad es de 14.4kJ durante el tiempo de duración del proceso, este gasto energético ahora es un poco mayor al doble utilizado por el sistema de lavado a 1200 rpm pero el porcentaje de remoción también es mayor, obteniendo un 72% de extracción de 2,4-D. Sin embargo a una velocidad de 1550 rpm el consumo de potencia es de entre 4 y 5 watts durante el proceso de lavado, el consumo energético es

poco menos de 22kJ, pero el porcentaje de remoción es de 89%. En este caso también se debe hacer énfasis en la intención del proceso, ya que a 1550 rpm con una sola prueba de lavado se obtuvo una extracción del contaminante de 89%, el costo energético es tres veces mayor que el ya mencionado de 1200 rpm, pero su remoción es 22% más eficiente.

Es entonces cuando se creería que la tendencia a observar sería que a 1700 rpm el porcentaje de remoción fuera excelente, el porcentaje de remoción cae a un 77%, no así el consumo de potencia y el gasto energético de 7 watts y 42kJ respectivamente.