

## CAPÍTULO 11

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 11.1 Conclusiones

De acuerdo a la metodología empleada en esta investigación se determinó, de acuerdo a las pruebas granulométricas y pruebas de límite líquido y plástico, que el suelo que se tomó del almacén del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad de las Américas-Puebla corresponde, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S), a una arena mal graduada, con poca o nada de partículas finas.

Una vez caracterizado el suelo se procedió a contaminarlo con herbicida 2,4-Diclorofenoxiacético a una concentración de 20 mg/kg, en total fueron contaminados 4Kg. de material.

El surfactante empleado para realizar las pruebas de lavado es sodio dodecil sulfato (SDS) un surfactante aniónico con características anfifílicas, la concentración utilizada es de 0.5% (v/v) respecto al total del líquido empleado para el proceso de lavado (agua destilada).

El impulsor empleado es el A200 de Lightnin Mixers, este impulsor es de flujo axial, cuenta con 4 paletas inclinadas a un ángulo de 45°, con capacidad alta de bombeo y de acero inoxidable.

Para la realización de las pruebas de lavado, primeramente se ejecutaron pruebas para la determinación del tiempo óptimo de lavado. Una vez determinado el tiempo de lavado óptimo, se procedió a realizar las pruebas correspondientes para la determinación del porcentaje de concentración de suelo óptimo; a una velocidad constante de 1400 rpm y a concentraciones de suelo de 10, 20, 30 y 40% en relación a la cantidad de agua destilada empleada, y las pruebas para la determinación de velocidad óptima de lavado a una concentración de suelo constante de 40% igualmente en relación a la cantidad de agua destilada empleada y a velocidades de agitación de 1200, 1400, 1550, y 1700 rpm.

Como ya se mencionó con anterioridad en el apartado de metodología de análisis de muestras, el total de las muestras generadas fueron analizadas mediante un HPLC-UV usando un cromatógrafo de líquidos equipado con un diodo detector de UV.

Los resultados y conclusiones obtenidas de las pruebas mencionadas con anterioridad se muestran a continuación:

1. En las pruebas para la determinación de tiempo de lavado, se eligieron tiempos de ejecución de 15, 30, 60, 90, 120 y 150 min, siguiendo la metodología de obtención de datos y de realización de pruebas por duplicado se estableció que el mejor tiempo para la realización del proceso de lavado de suelo contaminado con herbicida 2,4-D, bajo las condiciones descritas con anterioridad, como lo son las dimensiones del tanque de agitación, contar con cuatro deflectores o baffles dentro del vaso de agitación y dispuestas a 90° cada una, las dimensiones del impulsor y el tipo de flujo generado por este (axial), es el tiempo de 90 min ya que en ambas pruebas el

porcentaje de remoción se mantuvieron en 71 y 75% respectivamente. Demostrando el comportamiento constante a diferencia de los otros tiempos, variando solamente un 4% de eficiencia de remoción entre ellas y sin embargo lo más importante es que el tiempo de 90 min demostró ser el de más alta eficiencia de remoción. Así mismo, se queda demostrado que si existe un tiempo óptimo de lavado, ya que después de los 90 min de lavado el comportamiento de la eficiencia de remoción comienza a caer y a presentar una inestabilidad significativa.

2. Teniendo ya un tiempo ideal para el sistema de lavado de suelos montado en esta investigación, se procedió a realizar las pruebas para la determinación de la concentración óptima de suelo y a una velocidad constante de 1400 rpm se ejecutaron cuatro corridas de lavado con diferentes concentraciones de 10, 20, 30, y 40% de suelo en relación del agua destilada utilizada.

Se hicieron mediciones de potencias a cada 15min en cada una de las corridas y se pudo observar que a los primeros 15min las cuatro pruebas de lavado tuvieron el mismo comportamiento de consumo de potencia (3 Watts), después de ese tiempo y debido a la diferencia de concentraciones en cada una de las pruebas, el impulsor varió en consumos de potencia y del supuesto lógico de que a mayor cantidad de suelo el consumo de potencia es mayor se demostró que en efecto a mayor cantidad de suelo la potencia necesaria también incrementa, sin embargo ocurrió que a la mayor concentración de suelo (40% o 180 gr) el consumo de potencia después de haberse mantenido constante a 3 Watts durante 45min comenzó a bajar estabilizándose en un consumo de potencia de 2.5 Watts hasta los siguientes 45min.

A diferencia de las pruebas de 20 y 30%, las cuales se mantuvieron en 3 Watts incluso después de los 45min.

Estos resultados nos dan una idea de lo que fue el cálculo de energías asociadas al sistema, el cual resulta del área bajo la curva de consumos de potencias. Una vez determinado el gasto energético relacionado con cada una de las pruebas se determinó que a pesar de ser la concentración más alta de suelo, el consumo de potencia fue el más aceptable de entre las concentraciones más altas, inclusive más bajo que las concentraciones de 20 y 30% de suelo.

Al calcular la energía asociada al sistema se reafirma el hecho de que la concentración de suelo que presenta el menor consumo de potencia en relación a la cantidad de suelo lavado es el de 40% ya que el gasto energético fue de menos de 14kJ mientras que para las pruebas de 20 y 30% el gasto energético superó los 14kJ. Ahora bien, teniendo la concentración óptima para consumo de potencia y gasto energético con respecto precisamente a su concentración, resta comparar los resultados de porcentaje de remoción para cada una de las pruebas, siendo el de 40% de concentración el de mayor eficiencia de lavado, logrando una remoción de casi 74%. Por lo tanto, contrastando el consumo de potencia, el gasto energético y el porcentaje de remoción con sus respectivas concentraciones de suelo, la prueba de lavado de suelo con una concentración del 40% de suelo es la que consiguió la mejor eficiencia de lavado. Esto debido a que la cantidad de suelo en esta prueba se ve equilibrada con respecto al volumen total de la solución agua destilada-surfactante, aunado a que a altas velocidades los impulsores de tipo axial propician

el contacto entre el surfactante y el contaminante (2,4-D) debido a su gran capacidad de bombeo.

Por lo tanto si se logra generar un alto flujo de corriente o bombeo es muy posible lograr altos porcentajes de remoción. Sin embargo al referirnos a altas velocidades es importante no caer en el error de provocar altas turbulencias que puedan afectar al sistema.

3. Sobre las pruebas realizadas para la determinación de la velocidad óptima de agitación, teniendo bien definida la concentración con la cual se trabajó, se procedió a realizar pruebas de lavado de suelo a concentración constante de 40% de suelos, pero a velocidades de 1200, 1400, 1550 y 1700 rpm. Las condiciones del sistema de lavado se mantuvieron iguales; dimensiones del tanque de agitación, posición del impulsor, el tipo de impulsor, las concentraciones de 2,4-D y de SDS, etc. Primeramente se tomaron datos de consumo de potencia del impulsor a cada 15min, se observó que en efecto a mayor velocidad del impulsor en el sistema, mayor es el consumo de potencia necesario. En cuanto a gasto energético se observó que el de menor gasto energético fue a la velocidad de 1200 rpm con 6kJ, obteniendo de la misma manera un porcentaje de remoción de casi 67%. A la velocidad de 1400 rpm el gasto energético se duplica, generando un gasto de energía de 14.5kJ, con un porcentaje de remoción de un poco más del 72%. Cuando ejecuta la prueba de velocidad de 1400 rpm, el gasto energético es de 21kJ, con un porcentaje de remoción del 89%. En la última de las pruebas y como era de esperarse, a 1700 rpm el gasto energético es de 42kJ, el incremento del gasto energético es notoriamente

muy alto, sin embargo es en esta prueba con la cual queda demostrado que sí existe una velocidad óptima de lavado y que a pesar de que se pudiera pensar que a mayor velocidad, mayor es el porcentaje de remoción, a pesar de esto, a 1700 rpm el flujo de corriente es tan alto que en lugar de favorecer el contacto entre el surfactante y el contaminante, una turbulencia violenta es generada, limitando de esta manera el contacto entre estos dos agentes y por lo tanto este fenómeno se ve reflejado en el porcentaje de remoción obtenido de 77%, disminuyendo de manera considerable comparado al resultado obtenido con la prueba de velocidad de 1550 rpm. Por lo tanto, la velocidad con mejor remoción y un considerable gasto energético es la de 1550 rpm, ya que en un solo ciclo de lavado se obtuvo un 89% de remoción a un costo energético de 21kJ

4. Debido a los resultados anteriores, es entonces cuando se comprueba que el gasto de la energía asociada dependerá de la velocidad de agitación del impulsor, ya que a mayor velocidad, mayor es el gasto energético asociado al proceso.
5. En cuanto a los resultados obtenidos en los cálculos de medición de velocidad mínima de agitación ( $N_{js}$ ), estuvieron muy por debajo de las obtenidas mediante las pruebas realizadas en laboratorio. De acuerdo a los resultados obtenidos teóricamente, las velocidades mínimas de agitación serían suficientes para hacer que el impulsor bombee el flujo suficiente para lograr que el surfactante entre en contacto con el contaminante en cuestión, sin embargo a estas velocidades, no lograron ni siquiera generar un buen flujo de corriente.

## 11.2 Recomendaciones

1. Con respecto al suelo empleado en esta investigación se llegó a la conclusión que es recomendable antes de efectuar el proceso, cribar el material y lavar aquel concerniente a las arenas, debido a que partículas muy finas como las arcillas o limos son muy difíciles de remediar mediante este proceso.
2. A pesar de no existir información sobre en qué orden deberán ser dispuestos los materiales para proceder a la ejecución del proceso, se recomienda que primeramente el suelo contaminado sea muy ligeramente humedecido con rocío de agua y después de esto se deberá verter en el tanque de agitación, posterior a esto se debe introducir la solución de agua destilada-surfactante, esto para evitar que partículas finas del suelo vuelen en el ambiente.
3. Con respecto al agua residual generada por el proceso se sugiere llevar a cabo un análisis con la intención de decidir el tratamiento de agua que deberá utilizarse de acuerdo a las características del agua. El método que se sugiere emplear es el degradación del ácido 2,4-D usando cobalto-peroximonosulfato en procesos parecidos al Fenton.