

# Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico

Oliva Uc, J.<sup>1</sup>, Giacomán Vallejos, G.<sup>2</sup>, Pérez Cortés, M.<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 19 de septiembre de 2007*

*Fecha de aceptación: 12 de junio de 2008*

## RESUMEN

Actualmente el problema de la contaminación del agua ocasiona que los procesos de las plantas de tratamiento de aguas residuales sean optimizados para una mayor eficiencia de remoción de los contaminantes. En este trabajo se realizó un sistema óptico para medir la velocidad de sedimentación de lodos en aguas residuales. Este parámetro es muy importante para el diseño de los sedimentadores en las plantas de tratamiento. Los resultados obtenidos, con el sistema óptico propuesto, concuerdan con los obtenidos mediante las técnicas de probeta graduada, además, proporcionan una mayor exactitud para el valor de la velocidad de sedimentación.

**Palabras clave:** sedimentación, lodos, aguas residuales, dispersión.

## Study of the mud sedimentation dynamics by means of an optical system

## ABSTRACT

Nowadays, the problem of water contamination causes that processes of residual waters at treatment plants be optimized for a high efficiency of the pollutants removal. In this work, an optical system to measure the sedimentation speed of mud in residual waters was carried out. This parameter is very important for the design of mechanisms for mud storage in the lower levels of the sediment at treatment plants. The results obtained with the optical system proposed, agree with those obtained by means of graduate test tube techniques. They also provide a higher accuracy of the sedimentation speed.

**Keywords:** sedimentation, mud, residual water, dispersion.

---

<sup>1</sup> Estudiante de maestría del centro de Investigaciones en Óptica, León, Guanajuato.

<sup>2</sup> Profesor Investigador. Cuerpo Académico de Ambiental, Facultad de Ingeniería de la UADY. e-mail: [giacomán@uady.mx](mailto:giacomán@uady.mx)

<sup>3</sup> Profesor de Carrera. Cuerpo Académico de Física, Facultad de Ingeniería de la UADY. e-mail: [mperez.cortes@uady.mx](mailto:mperez.cortes@uady.mx)

## **INTRODUCCIÓN**

Las plantas de tratamiento del agua requieren mejores sistemas de medición para la producción de agua con calidad potable que será vertida hacia algún lugar. Por lo tanto, los laboratorios de ingeniería ambiental se encargan de aplicar métodos y procesos para evaluar el daño ambiental debido a la contaminación; dichos laboratorios, estudian la sedimentación de partículas contaminantes de aguas residuales que se procesan en las plantas de tratamiento.

En el desarrollo de este trabajo, se utilizaron conceptos básicos de óptica y de ingeniería ambiental con objeto de estudiar en forma dinámica la sedimentación de las partículas suspendidas en el agua residual y se empleó un método óptico para la determinación de la velocidad de sedimentación. De esta manera, los resultados que se esperan del presente estudio, ayudarán en el mejoramiento de la operación de los procesos de tratamiento.

**Lodos De Aguas Residuales.** Las características de las aguas residuales se determinan por sus composiciones: física, química y biológica; entre sus características físicas se puede mencionar el olor, color y temperatura; si se habla de sus constituyentes químicos, se puede mencionar dos categorías: Orgánicos (carbohidratos, pesticidas, proteínas etc.) e inorgánicos (metales pesados, nitrógeno, fósforo etc.); y finalmente, como componentes biológicos podemos mencionar a la microvegetación, virus y bacterias. Las aguas residuales pueden ser aguas desechadas de procesos industriales y domésticos.

Un lodo o sólido sedimentable de aguas residuales es una mezcla de sustancias orgánicas e inorgánicas y contiene bacterias, además es tóxico para el ser humano si es ingerido y debe evitarse el contacto con la piel. Entonces, dado la complejidad de los componentes que pueden tener los lodos, se trabajó con lodos conformados de componentes orgánicos y bacterias, los cuales se generaron en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UADY.

**Características De Los Lodos.** Una de las características importantes de los lodos que se estudiaron, es la floculación, ésta consiste en la aglomeración de las partículas inestables en microfloculos y después en floculos más grandes que caen como consecuencia de la acción de la gravedad. Además los floculos que se pueden formar, tienen tamaños que varían desde las micras hasta varios milímetros y su forma es irregular. Otras características importantes de los lodos que se utilizaron, es que no tienen olores desagradables.

**La Sedimentación.** La sedimentación consiste en la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de la gravedad. Puesto que la sedimentación de lodos de aguas residuales es un proceso que depende del tiempo, el sistema que involucra la sedimentación de lodos puede analizarse dinámicamente y el conocimiento del comportamiento dinámico de las partículas, es primordial para conocer las ecuaciones de movimiento de las mismas cuando estén sedimentando. Existen 2 tipos principales de sedimentación:

**1.- Sedimentación discreta:** En ésta, las partículas no sufren cambios en sus características (forma, tamaño, densidad) durante la caída, además se presenta en suspensiones con bajas concentraciones de sólidos, cada una de las partículas se comporta como entidades individuales y casi no hay interacción entre ellas.

**2.- Sedimentación partículas floculentas:** Ésta es producida por la aglomeración de partículas coloidales desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas (forma, tamaño, densidad) sí cambian durante la caída. Este tipo de sedimentación ocurre cuando tenemos bajas concentraciones de partículas que son susceptibles de flocular.

Se debe enfatizar que el tipo de sedimentación que se presentó durante los experimentos realizados, fue el de sedimentación zonal (una variante de la sedimentación de partículas floculentas), éste se presenta cuando hay grandes concentraciones de lodo en las aguas residuales, se hablará detalladamente sobre éste en la siguiente sección.

**Sedimentación Zonal.** Cuando existen bajas concentraciones de partículas, éstas sedimentan o decantan libremente; en cambio, con una alta concentración de partículas floculentas, superiores a 500 mg/L (Maldonado, 2000), éstas se encuentran a distancias tan reducidas que se adhieren entre sí y sedimentan masivamente. Así, se crea una clara superficie de separación entre los floculos y el líquido que sobrenada y esto da origen al fenómeno de sedimentación conocido con el nombre de sedimentación interferida o zonal.

Una hipótesis fundamental para la sedimentación interferida es que, la velocidad de caída de una partícula depende principalmente de la concentración de las partículas.

En este tipo de sedimentación, la alta concentración de partículas, produce que el agua suba a través de los intersticios de las partículas que están cayendo, por lo tanto el agua que fluye hacia arriba, produce que ciertas partículas queden suspendidas y además hace que las más pequeñas suban en vez de bajar.

Durante el proceso de sedimentación de lodos (con una suspensión floculenta de elevada concentración en donde se tiene inicialmente una concentración distribuida uniformemente en toda la altura de la columna de líquido), la altura de la capa superior de los lodos A va cambiando con el tiempo  $t$  (Figura 1), por lo tanto el cambio de la altura con el paso de tiempo está relacionado con la velocidad de sedimentación, para verlo mejor se explicarán las zonas:

En la Zona A-B que corresponde a la zona clara (parte superior del recipiente (Figura 1), las partículas

descienden con un incremento sucesivo de la velocidad debido a que las partículas de las capas inferiores sedimentan previamente y por lo tanto no presentan mayores obstáculos durante su caída.

En la Zona B-C, considerada como la zona turbia, se puede ver que la curva tiene una pendiente rectilínea y esto corresponde a una velocidad de caída constante definida únicamente por el tipo de floculación y la concentración de las partículas.

En la Zona C-D (parte inferior de la zona turbia), se produce la disminución progresiva de la velocidad de caída de las partículas hasta su detención. Se le llama también zona de desaceleración o transición.

Para la Zona D-E: En esta zona los flocúlos se tocan y ejercen presión sobre las capas inferiores, puesto que están soportados por estas. Esta es la zona de compresión.

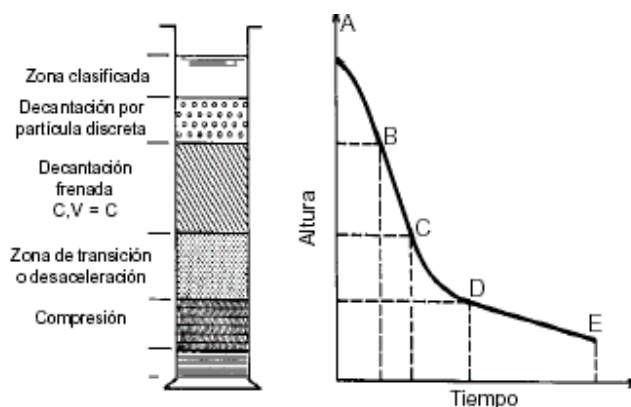


Figura 1. Diagrama para el proceso de sedimentación zonal y sus correspondientes etapas.

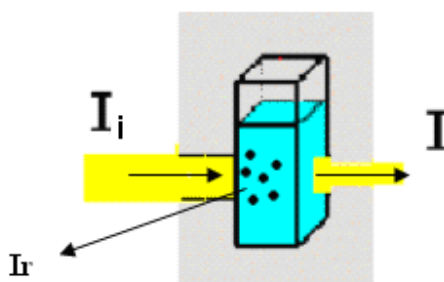
**Transmitancia, Absorbancia y Reflectancia.** Puesto que se quiere estudiar la dinámica de sedimentación de lodos con un sistema óptico, el cual involucra necesariamente a la luz, se necesita de algún fenómeno óptico que permita entender la interacción de la luz con los sólidos sedimentables. Para lo anterior, se considera a la transmitancia.

Se puede considerar a la luz como energía radiante que viaja en línea recta, cuando entra en una suspensión coloidal (agua turbia), una parte pasa por ella sin ser perturbada y la otra parte es absorbida, diseminada o reflejada por las partículas presentes. Se puede definir a la transmitancia  $T$  como (Hecht, 1985):

$$T = I_t \cos \theta_t / I_i \cos \theta_i \quad (1)$$

$$I [W / m^2] = \langle S \rangle_T = (c \epsilon_0 / 2) E_0^2 \quad (2)$$

Donde  $I_t$  es la irradiancia transmitida (en función del campo eléctrico  $E_0$ , la constante de permeabilidad en el vacío  $\epsilon_0$  y la constante de la velocidad de la luz  $c$ ),  $I_i$  es la irradiancia incidente. La irradiancia tiene unidades en  $W/m^2$ , es decir el flujo de energía por segundo y por unidad de área. Además  $\theta_t$  es el ángulo de salida de la luz transmitida y  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia de la luz. Por lo tanto se puede considerar a la transmitancia como una razón entre flujos de energías que inciden y que salen de un medio, como el que se encuentra en la Figura 2.



**Figura 2.** Representación de la luz a través de una muestra con sólidos en suspensión.

De la figura 2, se puede decir que la luz transmitida por la muestra  $I$  será igual a  $I = I_i - I_r$  cuando no hay luz absorbida y si hay luz absorbida la expresión será  $I = I_i \exp(-kd)$ , Ley de Beer (Born and Wolf, 2005), donde  $k$  es el coeficiente de absorción del material y  $d$  es la distancia que tiene que recorrer la luz a través del recipiente.

La absorción de la luz ocurre debido a que se considera a los átomos como pequeños resortes que oscilan alrededor en su punto de equilibrio, por lo tanto cuando chocan con una luz, por ejemplo la proveniente de un láser, que tiene la misma frecuencia de vibración que el átomo, ocurre el fenómeno de absorción. Para efectos de esta investigación, se consideró que la absorción de la luz es igual a cero, y que desde que se inicia el experimento, hay un mínimo de luz que pasa. La reflectancia  $R$  es el flujo de energía desviada por una partícula cuando la luz choca con ella. Ésta se define de manera similar a la transmitancia:

$$R = I_r \cos \theta_r / I_i \cos \theta_i \quad (3)$$

donde  $I_r$  es la irradiancia reflejada,  $I_i$  es la irradiancia incidente,  $\theta_r$  es el ángulo de salida de la luz reflejada o flujo de energía reflejada y  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia de la luz. Además cuando la absorción de luz es cero, la reflectancia y transmitancia deben de cumplir:

$$R + T = 1 = 100\% \text{ luz} \quad (4)$$

La transmitancia incluye los efectos debido a la interacción radiación-materia (que en este caso sería la interacción de la luz con los sólidos sedimentables). De esta manera se puede obtener información acerca de las propiedades de los lodos, tanto microscópica (tamaño de las partículas) como macroscópica (velocidad de sedimentación). Lo

anterior se debe realizar cuidando que la radiación no afecte a los sólidos que están sedimentando.

### METODOLOGÍA

**El Método De Probeta Graduada.** El método convencional de probeta graduada (Andrew and Lenore, 1996) se utiliza para determinar las características de sedimentación de lodos en aguas residuales. Con la obtención de las características anteriores, se puede calcular las áreas requeridas por los sedimentadores, de tal manera que se facilite el proceso de floculación-sedimentación, sin embargo se presenta el problema de que los resultados para la sedimentación no son los mismos para una misma muestra de aguas residuales.

El procedimiento para este método consistió en poner una muestra fresca de lodo en una probeta de 1000 ml y luego, cada 10 segundos durante los primeros 3 minutos y después cada 30 segundos durante otros 3 minutos, se marcó sobre la probeta la altura que tenía la columna de lodo que estaba sedimentando. Se consideró como punto de partida la línea de 1000ml de la probeta.

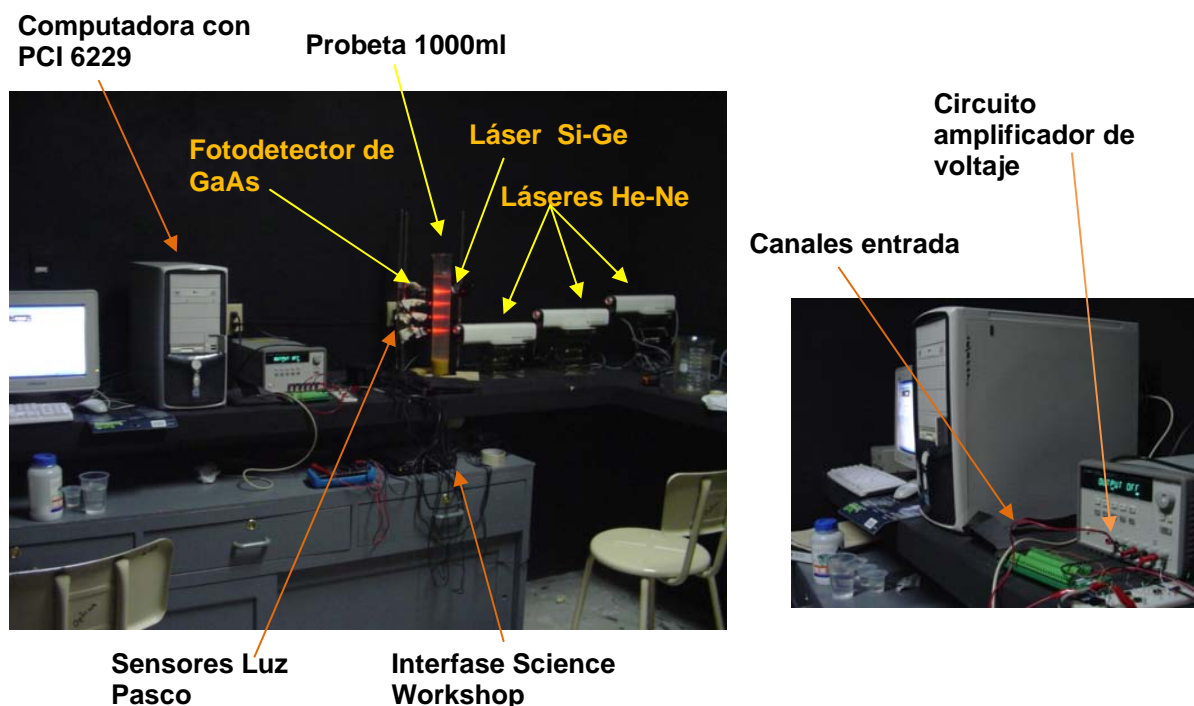
Posteriormente con los datos de altura y tiempo, se trazó una gráfica empleando el programa de EXCEL, en la que la ordenada es la altura  $h$  en centímetros de la columna formada por los sólidos y el eje de las abscisas es el tiempo en segundos. La gráfica que se obtuvo es similar a la presentada en la sección I.3.1 para la sedimentación zonal y ésta, se utilizó para obtener la velocidad de sedimentación de lodos en cm/seg (la velocidad se obtendrá con la pendiente de la recta observada entre los puntos B y C). Además, con la observación de las variaciones en los valores para la altura de la columna de lodo durante el proceso de sedimentación, se definió la zona clara, turbia y de compactación, la identificación de las zonas anteriores fue importante para el posicionamiento de los láseres utilizados en las pruebas ópticas, se necesitaba que los láseres estén

ubicados de tal manera que la luz proveniente de ellos, incida en la zona turbia donde el lodo descende a velocidad constante.

**Metodología De 4 Láseres.** Se llevó a cabo una técnica para medir la velocidad de sedimentación del lodo con 4 láseres y a partir de una gráfica de voltaje contra tiempo y de 3 gráficas de intensidad contra tiempo, se pudieron conocer los tiempos en los cuales el nivel principal de lodos pasaba por los láseres, posteriormente esta información se utilizó para elaborar una gráfica de distancia contra tiempo, la

cual proporcionaría finalmente la velocidad de sedimentación.

**Descripción Del Montaje Experimental.** El montaje experimental de esta investigación, incluyó distintos dispositivos electrónicos tales como el láser, fuentes de alimentación, fotodiodos, interfase etc. Cada uno de los componentes fue elegido de acuerdo a su estabilidad, disponibilidad, tamaño y respuesta espectral.



**Figura 3.** Montaje experimental para el monitoreo de la sedimentación.

En la Figura 3 se puede observar a los 4 láseres de 5 mW que generaron rayos de luz (3 láseres de He-Ne y uno de estado sólido), posteriormente estos rayos se dirigen hacia la probeta que contenía lodo en proceso de sedimentación, después los fotodetectores, que en este caso, fueron 3 sensores de luz marca Pasco y uno semiconductor de selenuro de galio (GaAs), son los que reciben la luz. El voltaje generado por los sensores de luz es recibido por la interfase science Workshop modelo 750 y las variaciones de este con el transcurso del tiempo, se observan en la computadora con el software correspondiente a esta interfase. En cambio los voltajes generados por el fotodetector semiconductor, eran primeramente amplificados por un circuito inversor de voltaje (se utilizó un voltaje de +8V y -8V para la alimentación

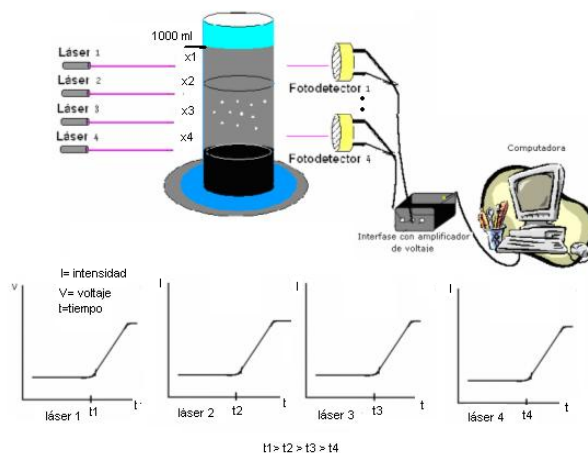
del circuito) y luego las variaciones del voltaje producidas con el paso del tiempo, eran observadas en la computadora con un programa diseñado en Labview 7.1.

**Funcionamiento Del Sistema Óptico De 4 Láseres.** Para poner en funcionamiento el sistema óptico propuesto para la velocidad de sedimentación, se realizó lo siguiente: Los 4 láseres se posicionaron considerando el tamaño de los fotodetectores y la incidencia de los rayos de luz de cada láser sobre el centro de una probeta con agua potable (figura 4). La luz al atravesar la probeta con agua se desviaba, entonces fue necesario reacomodar los fotodetectores de tal forma que se pudo obtener nuevamente un voltaje máximo (previamente identificado al hacer

incidir la luz láser sobre la probeta vacía). Gracias a esta calibración con el agua potable, se eliminó por completo la influencia de la probeta y el agua. Al eliminar los factores anteriores fue entonces factible decir, que las variaciones de voltaje cuando existe sedimentación del lodo, se deberán exclusivamente a la influencia de las partículas en movimiento.

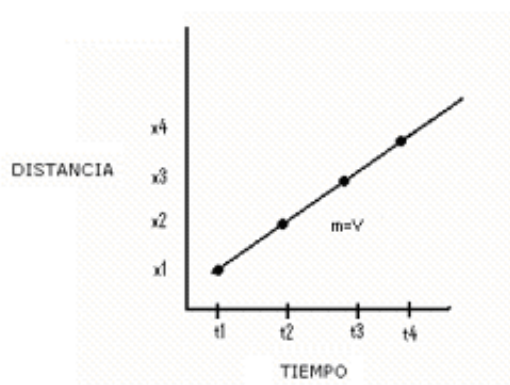
Después de lo anterior, se hizo la calibración del sistema óptico en la computadora y se vertió un litro de lodo sobre la probeta y se puso en marcha el experimento. Puesto que la sedimentación que

presenta el lodo es del tipo zonal, hubo un salto del voltaje detectado por el láser 1 en un tiempo  $t_1$  (gráfica del láser 1 en la Figura 4) y luego el nivel de lodo que estaba sedimentando fue detectado por el láser 2 en un cierto tiempo  $t_2 > t_1$  y se prosiguió de la misma manera con el resto de los láseres (todos ubicados en la zona de sedimentación de velocidad constante). Con estos tiempos y la distancia de separación de los láseres, se encontró la velocidad de sedimentación para el lodo con una gráfica de distancia contra tiempo.



**Figura 4.** Montaje experimental para determinar la velocidad de sedimentación de lodos con láseres colimados y gráficas de comportamiento del voltaje e intensidad contra tiempo producidos por los fotodetectores.

Con el procedimiento anterior, se obtuvieron una gráfica de voltaje contra tiempo y 3 gráficas de intensidad contra tiempo y en cada una de estas gráficas había un tiempo  $t$  en el cual la curva de voltaje contra tiempo o de intensidad contra tiempo, hacía un salto de un nivel inferior a otro superior y puesto que se conoce la distancia de separación entre fotodetectores, fue posible hacer en Excel una gráfica de distancia contra tiempo, donde  $x_1$  es la distancia de separación entre el límite de 1000 ml y el láser 1 (Figura 4),  $x_2$  es la distancia de separación entre los láseres 1 y 2, la distancia  $x_3$  es la de separación entre los láseres 2 y 3, finalmente  $x_4$  la distancia de separación entre los láseres 3 y 4. Los tiempos estuvieron dados por los saltos observados en las gráficas cuando se pasaba de un nivel inferior a otro superior de voltaje o de intensidad. La pendiente  $m$  de la recta, es igual a la velocidad de sedimentación  $V$  (Figura 5).



**Figura 5.** Gráfica para determinar la velocidad de sedimentación con la metodología de 4 láseres.

Posteriormente este valor para la velocidad de sedimentación fue comparado con el valor de la velocidad de sedimentación obtenido con la pendiente de la recta resultante del método de probeta graduada. No olvidar, que se considera que no hay luz absorbida por parte de las partículas y por lo tanto el voltaje

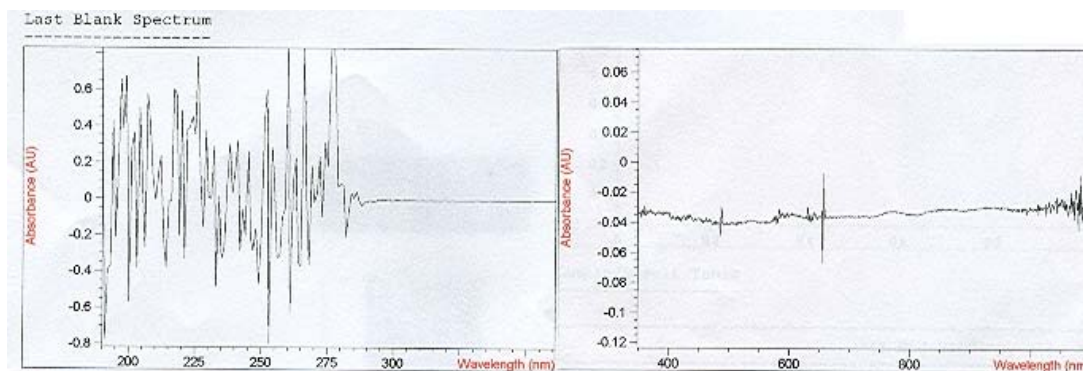


generado por el fotodetector es exclusivo de la luz que logra pasar.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Mediciones Preliminares.** En esta investigación se utilizó el espectrofotómetro del laboratorio de

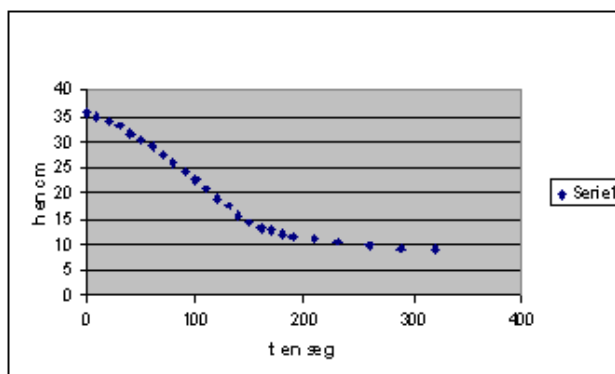
Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UADY (Agilent 8453) para conocer que longitudes de onda son las que absorbe más el lodo, ya que se ha supuesto que para los experimentos la absorción de luz por parte del lodo es cero. El diagrama obtenido en el espectrofotómetro es el siguiente:



**Figura 6.** Espectro del lodo utilizado en esta investigación, en este caso se graficó a la absorbancia contra la longitud de onda.

La Figura 6 muestra que los sólidos sedimentables con los que se trabajaron presentan una absorbancia igual a cero o muy pequeña, es decir que no absorberían nada de una radiación incidente y por lo tanto reflejarían o dispersarían el 100% de una radiación incidente de baja potencia, ya que a longitudes de onda de la luz menores a 275nm, el lodo tiene una absorbancia relativamente alta, sin embargo para longitudes de onda mayores a 400nm, la absorbancia es cero, ya que una absorbancia negativa indica que se está por debajo del nivel de detección del espectrofotómetro. Por tanto la longitud de onda de 633nm utilizado en los experimentos del sistema óptico, tendría una energía que no sería posible de absorber en ninguna medida por el lodo, es decir que la cantidad de luz absorbida por el lodo es considerada cero.

**Resultados Para La Metodología de Probeta Graduada.** Los resultados obtenidos con este método, se obtuvieron variando las concentraciones de lodo desde 105 ml/L hasta 190ml/L. Para todas las concentraciones menores a 100ml/L, no se pudo efectuar la prueba de probeta, por que la cantidad de lodo que había en la probeta no era lo suficientemente grande para que ocurra una sedimentación zonal y formar así, una capa de lodo lo suficientemente definida para ser detectada por simple observación, por tanto las pruebas con el sistema óptico para estas concentraciones no se realizaron. Para concentraciones de lodo mayores a 100ml/L, se aplicó la metodología explicada en la sección II.1 y se obtuvieron gráficas parecidas a la de la Figura 1 en la sección I.3.1.



**Figura 7.** Curva de sedimentación obtenida con el método de probeta graduada.

La Figura 7 es la curva de sedimentación para un agua residual que tenía una concentración de lodo de 160ml/L, y muestra varios aspectos importantes sobre el comportamiento del lodo durante la sedimentación: Aproximadamente durante los primeros 50 segundos, el descenso de la altura h de la columna de lodo no se realiza de manera proporcional, posteriormente el decremento de la altura de la columna de lodo se efectúa de manera proporcional conforme pasa el tiempo (con esto se identificó la sección de la probeta en la que el lodo sedimentaba a velocidad constante), ya que se puede distinguir una recta en descenso durante el intervalo de tiempo de 50-150 segundos, de

hecho mientras más inclinada sea ésta, mejor será la sedimentación del lodo. También se observa otra recta que indica un descenso de lodo más tardado, lo cual demuestra que se refiere a la zona en la cual el lodo se está comprimiendo, prácticamente todo el lodo ha sedimentado y se puede distinguir claramente en el fondo de la probeta.

Después de trazar la figura anterior, se tomaron los puntos que indicaban una disminución de la altura h de la columna de lodo con el tiempo y se obtuvo la siguiente gráfica:

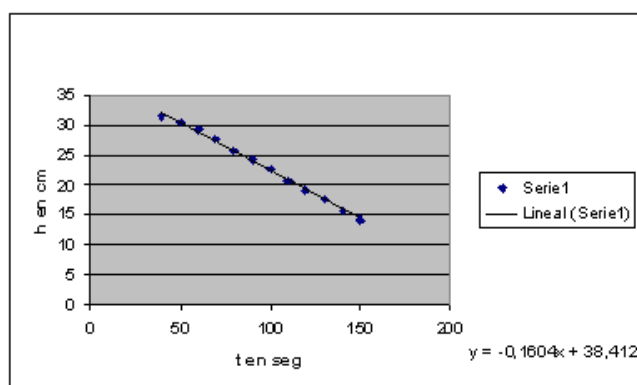


Figura 8. Gráfica de altura contra tiempo para la metodología de Probeta Graduada.

La Figura 8 indica que hay una disminución de la altura h de la columna del lodo, directamente proporcional con el tiempo. Además se puede observar que la curva que mejor describe a todos los puntos es una recta que tiene por ecuación  $Y = -0.1604x + 38.412$ , puesto que la recta tiene la forma  $Y = mx + b$ , donde m es la pendiente, se puede decir que la pendiente de la gráfica tiene un valor igual a  $-0.1604\text{cm/seg}$ , éste último es el valor de la velocidad de sedimentación de un agua residual con una concentración de lodo de 160 ml/L; el signo negativo solo indica la dirección del movimiento del lodo, el cual fue de arriba hacia abajo a lo largo de la probeta.

**Resultados Para La Metodología de 4 Láseres.** Esta es la metodología empleada para obtener los valores de la velocidad de sedimentación con el sistema óptico. Después de tomar los valores de tiempo  $t_0$  en los cuales ocurría un salto repentino de la intensidad en las gráficas de intensidad contra tiempo obtenidas en el programa del Science Workshop, se tomó el valor del tiempo en el que ocurría el cambio repentino de voltaje en la gráfica de voltaje contra tiempo hecha en Labview (Figura 9), para posteriormente usar los 4 tiempos en una gráfica de distancia contra tiempo. En el caso del agua residual con una concentración de

160ml/L de lodo, la gráfica de distancia contra tiempo, se observa en la Figura 11. Con la gráfica de la Figura 9, se pudo demostrar que existe un mínimo de luz que pasa, ya que hay un voltaje inicial pequeño de aproximadamente 0.5 V. También se puede observar en la gráfica un incremento no constante de voltaje debido al incremento en la cantidad de luz, el aumento no fue proporcional ya que existían partículas relativamente grandes que no sedimentaban con el nivel principal de lodos, entonces sedimentaban después del descenso de la capa principal y esto ocasionó disminuciones repentinas de voltaje, sin embargo el periodo de ascenso del voltaje no fue perjudicado de manera radical.

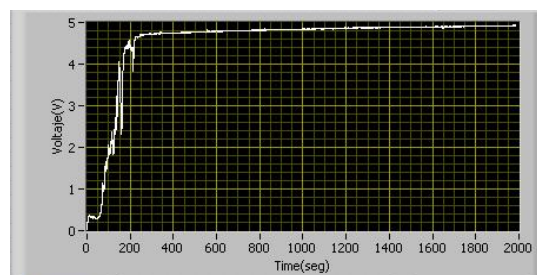


Figura 9. Gráfica Voltaje contra tiempo obtenida con el programa Labview 7.1



A continuación la tabla que muestra los valores para los tiempos  $t_0$  en los cuales ocurre un cambio

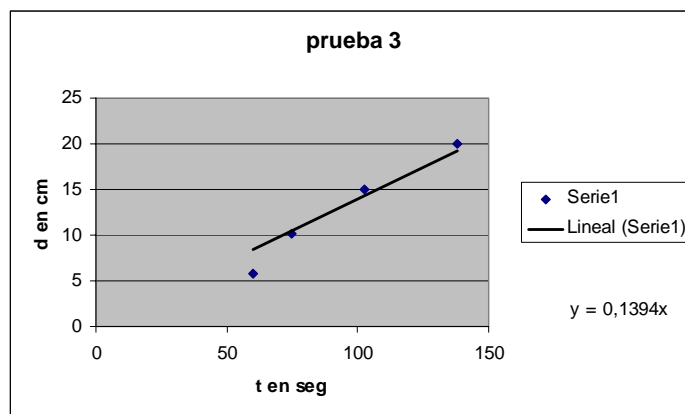
repentino del voltaje (para la gráfica en Labview) o de intensidad (para la gráfica en Science Workshop):

**Tabla 1:** Valores de distancia y tiempo obtenidos con el método de 4 láseres.

Tiempo $t_0$ en seg.	Distancia d en cm.	
60	5.75	Sensor Labview(LV)
74.52	10.1	Sensor A
102.32	15	Sensor B
138.17	20	Sensor C

Las distancias que muestra la tabla para cada uno de los tiempos se obtuvieron considerando el nivel de 1000ml de la probeta como punto de partida o cero y

posteriormente conforme descendía el lodo la distancia recorrida iba aumentando.



**Figura 10.** Gráfica de distancia contra tiempo para la metodología de 4 láseres, obtenida de un agua residual con una concentración de lodo de 160ml/L.

La figura 10 muestra los puntos correspondientes a los 4 fotodetectores, el primer punto (yendo de izquierda a derecha) corresponde al tiempo de salto del voltaje registrado por el sensor que utilizaba el labview para graficar voltaje contra tiempo, y los otros tres puntos corresponden a los tiempos de salto en las gráficas de intensidad contra tiempo hechas en Science Workshop. La recta que mejor se ajusta a los puntos de la figura 10 tiene la forma  $Y=mx$  donde m es la pendiente, así, se puede decir que el valor de la velocidad de sedimentación obtenido con el sistema óptico es de 0.1394cm/seg y si lo comparamos con el de 0.1604 obtenido con el método de probeta, el margen de error resultante es del 14.3%.

**Resultados Generales.** Para tratar de obtener una equivalencia entre lo obtenido con el método convencional de probeta y el sistema óptico, se hizo una gráfica de velocidad de sedimentación de la probeta graduada contra velocidad de sedimentación del sistema óptico (Figura 11). Como podemos observar, la correlación entre ambos sistemas es buena por que se tiene un factor de  $R^2=0.8444$ , es decir que el 84.44% de los puntos están sobre la recta o muy cerca de ella. La curva que mejor se ajusta a estos puntos que muestran una tendencia creciente, es una recta cuya ecuación es  $Y = 0.9431x$ .

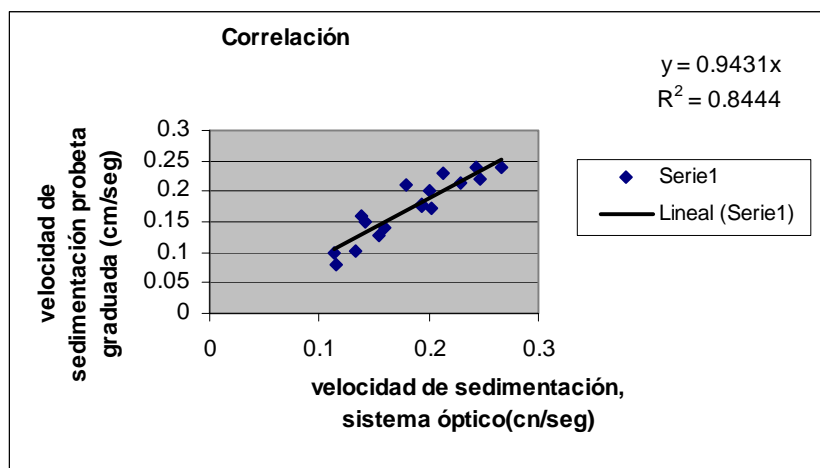


Figura 11. Correlación entre los resultados para la velocidad de sedimentación del método convencional y óptico.

La Figura 12 muestra la gráfica de concentración de lodo contra  $t_0$ , donde  $t_0$  es el tiempo en el cual ocurre un cambio abrupto del voltaje (tiempo salto) en la gráfica de voltaje contra tiempo correspondiente al sensor del Labview. Como se puede observar, hay una tendencia creciente de la concentración del lodo conforme el tiempo de salto es más grande, lo cual es lógico ya que al haber más lodo en la probeta, el

proceso de sedimentación se dificulta por que la aglomeración de los sólidos suspendidos ocurriría de manera preferencial que el mismo proceso de sedimentación, por tanto hay un mayor retardo en pasar por el mismo punto cada vez que aumenta la cantidad de sólidos o lodo. Sin embargo la tendencia de la curva no está bien definida ya que existen puntos fuera de ésta. El rango manejado de concentración de lodo fue de 100-190ml/L.

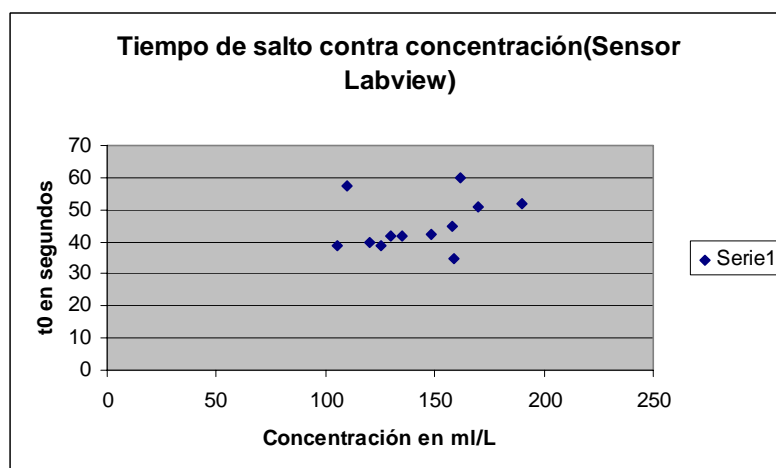


Figura 12. Tendencia de la concentración del lodo conforme aumenta el tiempo de salto, para el sensor del Labview.

La Figura 13 muestra que hay un punto en el tiempo después del proceso de sedimentación de las partículas más grandes, para el cual el voltaje empieza

a ser nuevamente estable, este tiempo de estabilización se relacionó con la concentración, obteniendo así la gráfica correspondiente.

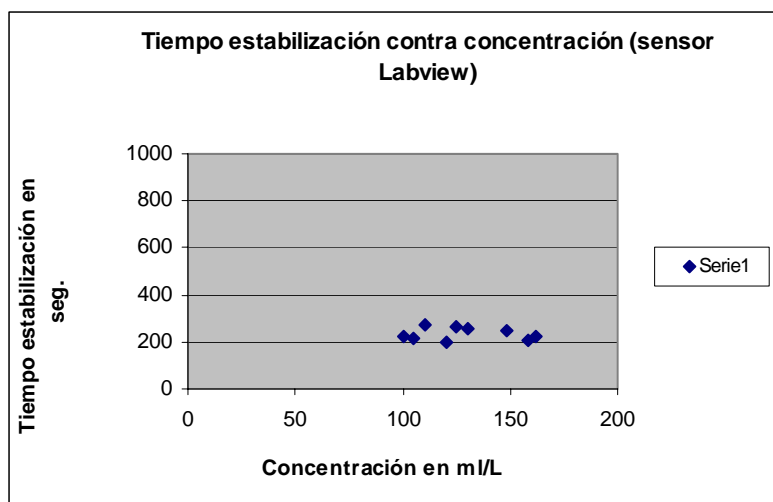


Figura 13. Comportamiento del tiempo para el cual se estabiliza el voltaje con la concentración.

Según lo mostrado en la figura 13, la tendencia indica que sin importar el aumento de la concentración (para el rango de 100-190ml/L de lodo), existe un tiempo promedio para el cual la señal de voltaje empezará a estabilizarse (gráfica de voltaje contra tiempo en Labview), la tendencia muestra que de ser así, el tiempo transcurrido en la prueba para el cual se garantiza que todas las partículas grandes ya han sedimentado es de 220 segundos.

Finalmente se hizo una gráfica de velocidad de sedimentación (sistema óptico) contra tiempo de salto  $t_0$  del voltaje (Figura 14) y los tiempos  $t_0$

corresponden a los de las gráficas obtenidas en Labview. Esta gráfica muestra una tendencia decreciente, ya que conforme el tiempo de salto aumenta, la velocidad de sedimentación disminuye, es lógico pensar que debe ser así, ya que un tiempo  $t_0$  cada vez más tardado, para un punto donde hay un fotodetector, el lodo se mueve más lento debido a que cada vez tiene más baja su velocidad, y esto concuerda con la gráfica de la Figura 13, donde a medida que aumenta el tiempo  $t_0$ , la concentración también aumenta, lo que trae como consecuencia que la velocidad de sedimentación disminuya.

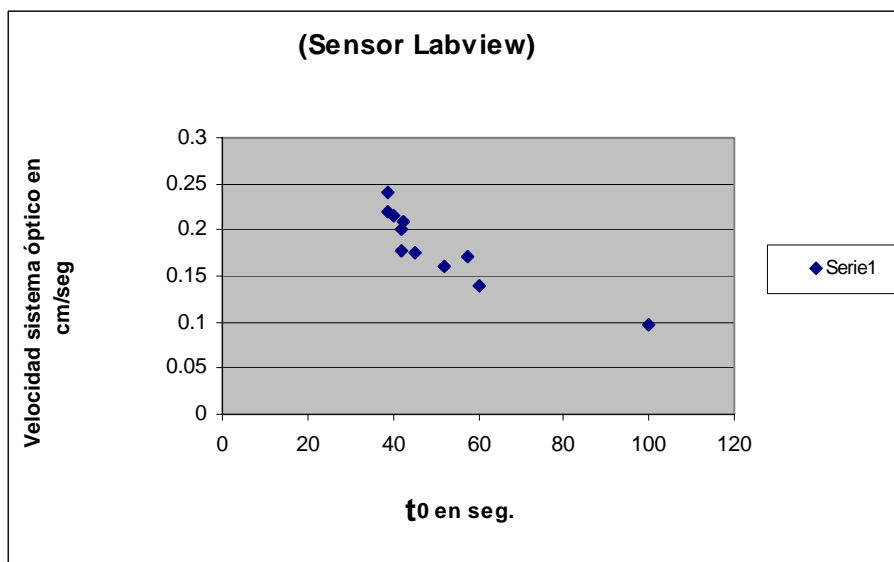


Figura 14. Comportamiento de la velocidad de sedimentación obtenida con el sistema óptico, donde  $t_0$  es el tiempo de salto del voltaje (gráficas de voltaje contra tiempo obtenidas con el sensor que utilizaba el Labview).

## **CONCLUSIONES**

Con base en los resultados encontrados en este trabajo, se puede concluir que es factible obtener la velocidad de sedimentación de lodos en aguas residuales mediante un sistema óptico, debido a las pequeñas diferencias entre los valores del método convencional y óptico.

También se determinó una tendencia entre la concentración del lodo y el tiempo de salto en la gráfica de voltaje contra tiempo, que establece que mientras más grande sea la concentración del lodo, más grande es el tiempo  $t_0$  de salto. La determinación de una función que describa adecuadamente esta tendencia, llevaría posiblemente, a encontrar una manera de determinar la concentración de los sólidos sedimentables para una muestra dada de lodo.

De los datos obtenidos por el método óptico se determinó el tiempo de estabilización, con el cual se puede garantizar que el proceso de sedimentación para las partículas de mayor tamaño, ha terminado en un punto específico. Después de este tiempo se puede

concluir que lo que queda en la probeta son partículas coloidales, ya que éstas continúan en suspensión y pueden ser observadas por medio del efecto Tyndall.

Se encontró en este trabajo una tendencia para la velocidad de sedimentación del lodo en función del tiempo de salto  $t_0$ , si una función es encontrada para esta tendencia, sería posible obtener la velocidad de sedimentación del lodo con simplemente observar el tiempo  $t_0$ .

Este trabajo permite obtener la velocidad de sedimentación de aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento y además permite mejorar las técnicas de diseño de los sedimentadores, ya que se pueden obtener valores de la velocidad de sedimentación con un margen de error no mayor al 20%. Al menos un margen de error se ha establecido en este trabajo para la obtención de la velocidad de sedimentación, lo cual no se ha fijado de manera formal para el método convencional de probeta graduada.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri. (1996). Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater, Sixth Edition.

Angelina Domínguez, Thomas Kretzschmar, Francisco Nuñez Sánchez. (2004). VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EN AGUAS PLUVIALES DE Cd. JUÁREZ, CHIHUAHUA, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3, p. 412-420

Bernardo Rivera, Diana M. Tangarife, Hernán Rojas. (1999). DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE CAUDALES Y NIVELES DE SEDIMENTACIÓN, Universidad de Caldas, Departamento de Sistemas de Producción ASPA.

Born and Wolf (2005), Principles of Optics, 7<sup>th</sup> edition, Cambridge University Press, United Kingdom.

César Alberto Cab Cauich. (2003). Estudio de la velocidad de sedimentación de eritrocitos mediante luz láser, Tesis de Maestría, Cinvestav Unidad Mérida.

Eugene Hecht. (2002). Óptica, (Editorial Adison Wesley, cuarta edición.

G. Salinas, M. Stintz y B. Wessely. (2005). Construcción y calibración de una celda de sedimentación gravimétrica para la medición fototérmica de la distribución de tamaño de micropartículas, Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá, vol. 13 no. 2, pp. 39-49

Juan Carlos Sánchez Barrera. (2004). Análisis de la Dinámica de Sedimentación Globular Mediante Técnicas Ópticas, Tesis licenciatura, Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de Yucatán.

Metcalf and Hedí, (1991). Wastewater Engineering, Treatment Disposal Reuse (Mc Graw Hill), Third Edition.

Nuevos métodos de tratamiento de aguas, memorias del simposio realizado en Asunción Paraguay, Agosto 1972. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS).

Salvato. (1999) Environmental Engineering and Sanitation. Editorial Wiley Interscience.

Shundar Lin, (1990). Water and Wastewater Calculations Manual.

Water Quality and Treatment. (1999). A Handbook of Community Waters Supply. American Water Works Association.

Victor Maldonado Yactayo. (2000). Capitulo 7 Sedimentación, Manual I para Plantas Potabilizadoras, Tomo II

---

Este documento se debe citar como:

Oliva Uc, J., Giacoman Vallejos, G. y Pérez Cortés, M. (2008). **Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-2, pp. 17-29, ISSN: 1665-529X