EVALUACION DE DOS CASOS DE ESTUDIO DEL FENOMENO DE SEDIMENTACION EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

Villacreses, JA [(1)]; Vega, JC [(1)]; y Matamoros, D [(2)]
[(1)] Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politecnica del Litoral, teléfono 042269400, e-mail joe198357@hotmail.com
[(2)] Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales, Escuela Superior Politécnica del Litoral, teléfono 042269550, e-mail dmata@espol.edu.ec

RESUMEN
El artículo tiene por objeto presentar una metodología adecuada de enseñanza de laboratorio de ensayos de sedimentación en la materia Ingeniería Sanitaria II de la Facultad Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Esta metodología se basa en ensayos de sedimentación establecidos previamente en literatura relacionada. En la actualidad, dicha facultad no cuenta con un laboratorio de tratamiento de agua, y este trabajo presenta el uso de equipos comúnmente encontrados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos. Se ensayaron dos diferentes tipos de agua en columnas de sedimentación: agua residual artificialmente preparada y agua del lavado de camiones mezcladores de hormigón. Finalmente, la investigación determinó índices de diseño de sedimentadores relativos a las muestras analizadas. Los resultados mostraron que el agua "residual" preparada puede ser usada confiablemente para propósitos didácticos.

ABSTRACT
The paper's objective is to present an adequate teaching methodology for settling analysis in Sanitary Engineering course at the Faculty of Earth Sciences Engineering. This methodology is based on settling analysis previously established in related literature. Actually, that faculty does not have a water treatment laboratory, and this research presents the usage of equipment normally found at Soil Mechanics Lab. Two different water types were tested in settling columns: artificially prepared wastewater and washed water from concrete mixers. Finally, the research developed indices of sedimentation basin design related to the evaluated water samples. Results showed that the artificially prepared wastewater can be used for didactic purposes with confidence.

Palabras claves:
Sedimentación, Análisis de Flujo de Sólidos, Tratamiento de Agua

INTRODUCCIÓN

La sedimentación es una operación unitaria comúnmente usada en el tratamiento de aguas residuales como de agua potable. Los parámetros de diseño de sedimentadores se obtienen de ensayos realizados en columnas de sedimentación considerando diversas aproximaciones teóricas (análisis tipo *batch*, análisis de flujo de sólidos, entre otros). Las columnas de sedimentación usadas en estos ensayos varían en sus dimensiones en función del tipo de análisis seguido.

La teoría de la sedimentación es enseñada como parte del curso de Ingeniería Sanitaria II en la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (ESPOL). Al 2006, la enseñanza de esta materia ha sido principalmente teórica ya que no se cuenta con un laboratorio de tratabilidad de aguas en la Facultad. Debido a esto, surgió la idea de adaptar los ensayos de sedimentación a equipos normalmente usados en otro tipo de ensayos y disciplinas, como es el caso de la hidrometría en la Mecánica de Suelos. Cabe señalar que este trabajo es parte de una tesis de grado sobre la aplicación de la teoría de la sedimentación en diversos tipos de aguas residuales (Villacreses y Vega, 2006).

Los objetivos alcanzados en la presente investigación son:

- Obtención de las curvas de sedimentación a partir de cada tipo de muestra estudiada usando cilindros gradados del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT).
- A partir de las curvas de sedimentación, obtener índices de diseño relativos a las muestras analizadas.
- Finalmente, evaluar la influencia de una sustancia química usada como floculante para acelerar el proceso de sedimentación.

La teoría de la sedimentación en suspensiones líquidas establece que el nivel de la interfase agua – sedimento variará con el tiempo transcurrido (Dick y Ewing, 1967), tal como se muestra en la figura 1. La velocidad de sedimentación irá disminuyendo paulatinamente a medida que las partículas sedimentadas pasen de una sedimentación de tipo discreto a una sedimentación por compresión. Adicionalmente, la velocidad inicial de sedimentación es inversamente proporcional a la concentración de la suspensión tal como se muestra en la figura 2.

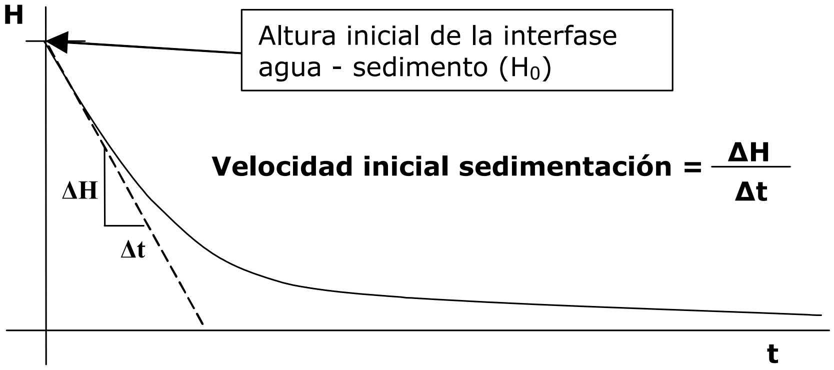

Figura 1. Curva típica de sedimentación de una suspensión líquida (después de Tchobanoglous y Burton, 1995)

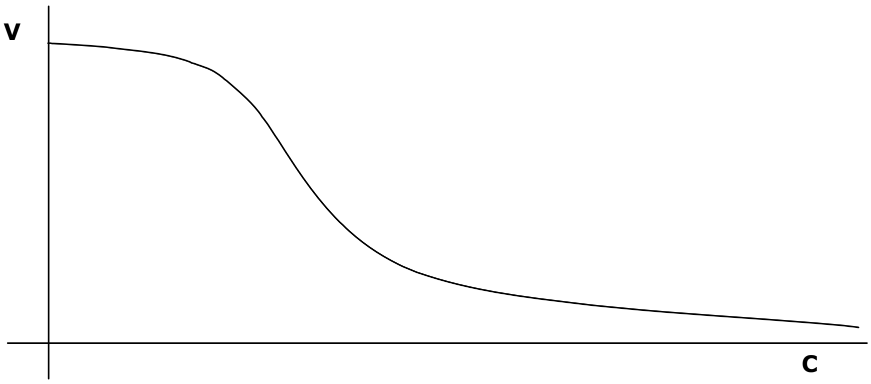

Figura 2. Comportamiento típico de la velocidad inicial del ensayo de sedimentación a medida que se concentra la suspensión ensayada (después de Tchobanoglous y Burton, 1995)

Para diseñar la geometría del sedimentador necesario para el tipo de agua residual evaluada, se puede usar la curva respectiva de sedimentación (ensayo tipo "*batch*" para la concentración inicial deseada) o el análisis de flujo de sólidos (considerando la relación entre la velocidad inicial de sedimentación y cada concentración analizada). En el presente trabajo, se utilizará el segundo método que establece el parámetro denominado Flujo de Sólidos que representa la multiplicación entre la velocidad inicial de sedimentación y su respectiva concentración evaluada.

La figura 3 representa la variación típica del flujo de sólidos calculado en función de la concentración evaluada. Esta curva es utilizada para determinar el área superficial mínima que se requiere en la sedimentación del tipo de agua analizada en función de un parámetro denominado flujo de sólidos limitantes (SF_L). Este parámetro se determina gráficamente de la curva obtenida para una concentración de lodos esperada en el fondo del sedimentador (Keinath, 1981; Tchobanoglous y Burton, 1995). La ecuación utilizada también utiliza el caudal ($Q_{ENTRADA}$) y la concentración de la suspensión ($C_{ENTRADA}$) que ingresan al tanque sedimentador.

$$A_{SEDIMENTADOR} = \frac{Q_{ENTRADA}\ C_{ENTRADA}}{SF_L}$$

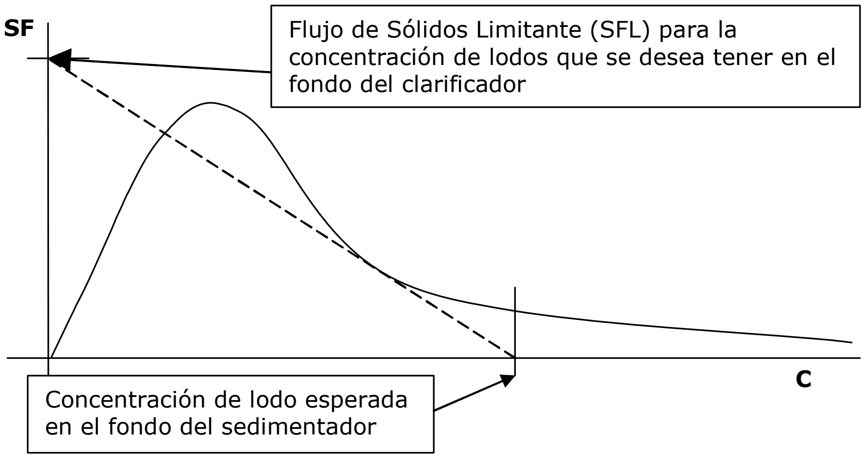

Figura 3. Curva típica obtenida en el análisis del flujo de sólidos y determinación del flujo de sólidos limitantes (SFL)

En el presente trabajo, no se contempló el diseño específico de tanques sedimentadores debido a que era parte del objetivo de la investigación. Sin embargo, se evaluó el comportamiento de la ecuación determinando el área que se requeriría por caudal unitario evaluado.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el ensayo de columnas de sedimentación se utilizaron cilindros graduados de vidrio de 1 litro de capacidad que normalmente se usan en los ensayos hidrométricos de determinación de granulometría de suelos. Los cilindros existentes en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT tienen diversos diámetros y alturas, tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de cilindros utilizados en los ensayos de sedimentación

Cilindro Nº	Diámetro (cm)	Altura a la capacidad de 1 litro (cm)
1	5.97	35.75
2	6.08	34.47
3	6.60	29.19

Adicionalmente se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza electrónica con una precisión de ± 0.1 g.
- Mezcladora para preparar el agua residual artificial.
- Cronómetro para registrar el tiempo de ensayo.

- Sulfato de Aluminio en polvo usado para ensayar el efecto de la floculación en las muestras.

La metodología de ensayo aplicada es referida por Tchobanoglous y Burton (1995) para evaluar sedimentación a diversas concentraciones de sólidos suspendidos. En el ensayo se registra la variación de la altura de la interfase sedimento-agua con respecto al tiempo. La curva resultante y su posterior procesamiento ayudan a determinar los parámetros de diseño de un sedimentador apropiado para el tipo de agua analizada. El principio básico de esta curva es que la altura de la interfase decrece pseudo-exponencialmente con el tiempo y por ende, la velocidad de sedimentación.

Adicionalmente, los ensayos fueron realizados en dos fases:

1. Sedimentación de las muestras sin floculación y
2. Sedimentación de las muestras añadiendo una cantidad de sulfato de aluminio como floculante. En esta fase, solamente se ensayaron la muestra de "agua residual" preparada y la del agua del río Daule. El agua residual proveniente del lavado de vehículos mezcladores de hormigón no necesitó de floculación. Las dosis de floculante ensayados fueron 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 y 2 g/l.

El ensayo de columna de sedimentación fue aplicado a dos suspensiones líquidas de características físico químicas diferentes que presentan una potencial remoción de sólidos por sedimentación.

- Agua "residual" artificialmente preparada mezclando agua potable con suelo pasante del tamiz #200 (partículas menores a 75 µm). Debido a su fácil obtención, la comparación del comportamiento de esta "agua residual" con las otras suspensiones ensayadas es importante para decidir si este tipo de material es o no usado en la enseñanza práctica del curso de Ingeniería Sanitaria. Como parte de la hipótesis planteada, se consideró el uso del pasante #200 de dos muestras de suelo de la misma área disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT. Se asumió que el comportamiento de ambos suelos sería el mismo debido a que provenían del mismo sitio (no se determinaron ni propiedades geomecánicas ni físico químicas de las muestras de suelo). Se analizaron 92 g del Suelo A distribuidos en concentraciones de 4, 6 y 8 g/l; y 510 g del Suelo B distribuidos en concentraciones de 10, 15, 20 y 40 g/l (ambos casos sin y con floculación). Las cantidades seleccionadas para cada tipo de suelo dependieron exclusivamente del material disponible en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la FICT al inicio de la investigación.

- Agua residual proveniente del lavado de vehículos mezcladores de hormigón cuya concentración inicial fue de 61.7 g/l. Para realizar el ensayo a concentraciones mayores, primero se sedimenta una muestra de líquido original. Luego, se separa el líquido decantado y se guarda el sedimento de fondo. El sedimento retirado es añadido a una muestra de líquido original. Este procedimiento se repite el número de veces necesarias para obtener una concentración mayor a la inicialmente ensayada. Debido a la limitación en la disponibilidad de muestra, solamente se logró dos muestras concentradas a 85.6 y 188.7 g/l, adicionales a la originalmente ensayada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron las curvas de sedimentación para las diversas concentraciones en cada tipo de agua analizada. La figura 1 muestra un ejemplo de las curvas obtenidas para dos concentraciones de cada tipo de agua analizada. En algunas curvas, se tuvo que realizar correcciones a los datos desplazando el tiempo de monitoreo, tal como se muestra abajo en la figura.

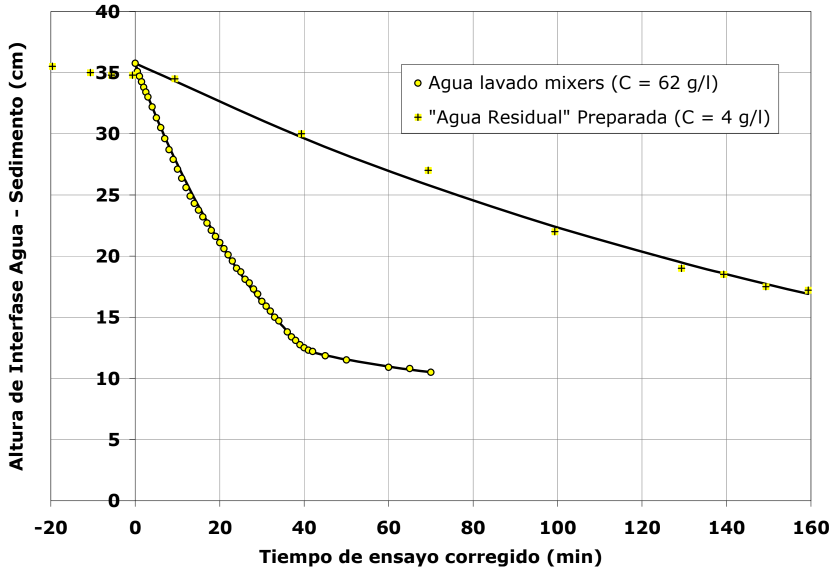

Figura 4. Curvas típicas de sedimentación para dos tipos de suspensiones ensayadas

En el caso de la muestra de agua "residual" preparada se procedió a evaluar el comportamiento tanto para el <u>Suelo A</u> como del <u>Suelo B</u> sin utilizar floculante. En el caso del <u>suelo A</u>, no se pudo obtener una curva válida de velocidad en función de la concentración para los datos obtenidos. Una razón podría ser algún error de medición producido durante los ensayos de columna de sedimentación. Los datos del <u>Suelo B</u> produjeron una curva que se ajusta mejor al comportamiento de la velocidad inicial de sedimentación para cada concentración analizada (figura 5).

Basándose en dicha figura, se realizó el análisis de flujo de sólidos para determinar al menos tres valores de flujo limitante (SF_L) a partir de concentraciones de lodo esperadas en un sedimentador (figura 6). Estos valores fueron usados en la ecuación inicialmente mostrada para evaluar la variación del área de un sedimentador por caudal unitario que ingresaría a dicho sedimentador (figura 7). Se puede observar que una mayor concentración de la suspensión requiere una mayor área de sedimentación. Igualmente, a mayor concentración de lodo esperada en el sedimentador el área necesaria para la sedimentación también es mayor en cada concentración inicial evaluada.

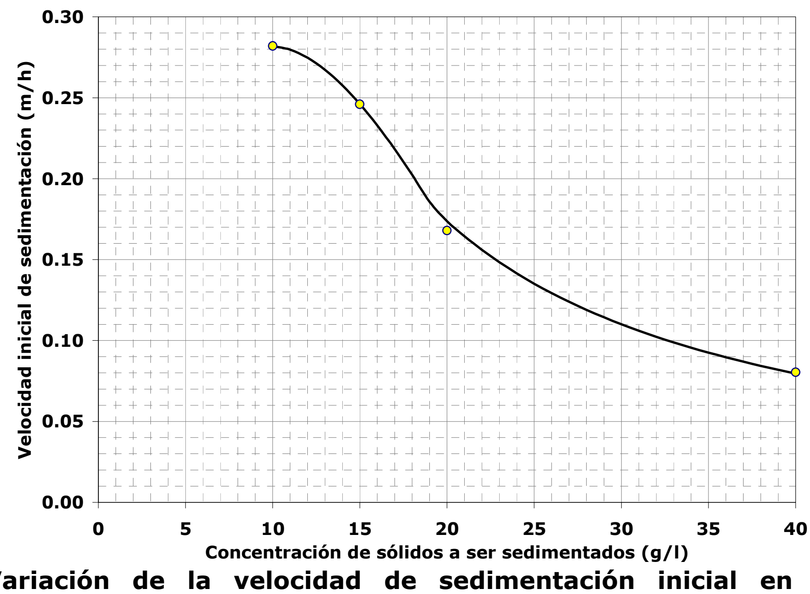

Figura 5. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la concentración usada en el ensayo del agua "residual" preparada con la muestra de <u>Suelo B</u> sin uso de floculante

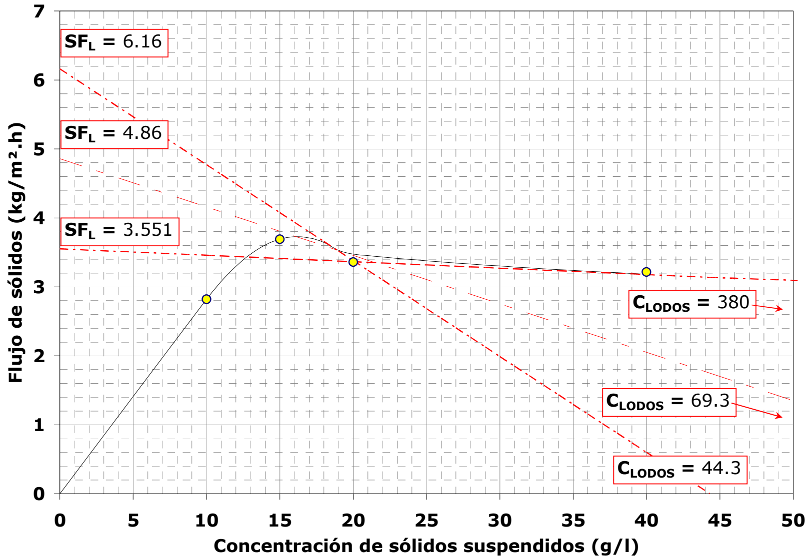

Figura 6. Análisis de flujo de sólidos para el agua "residual" preparada con la muestra de Suelo B sin uso de floculante

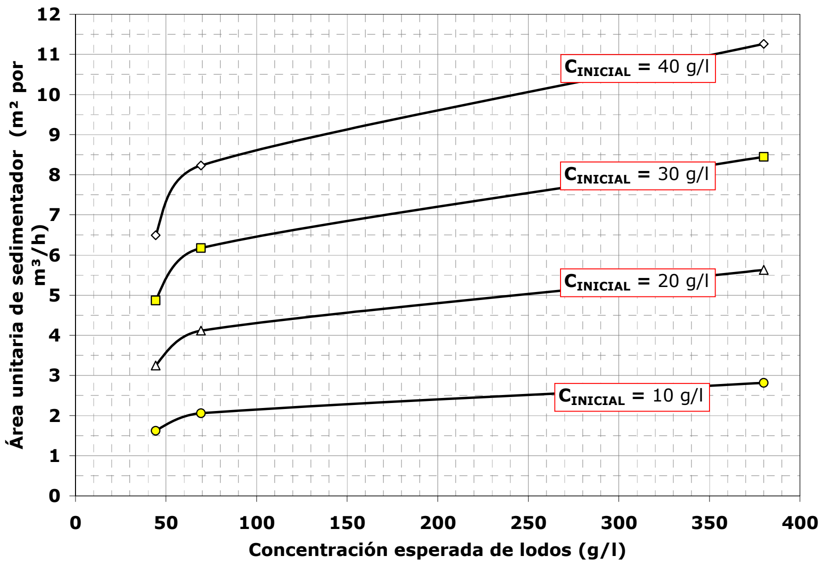

Figura 7. Variación del área de un sedimentador para el agua "residual" preparada con la muestra de Suelo B sin usar floculante

Para poder producir una mayor efectividad en la sedimentación de las muestras de suelo evaluadas, se usó sulfato de aluminio como floculante que resulta en un incremento de la velocidad de sedimentación y una mayor remoción de sólidos de la columna de agua. Una variación en la cantidad de floculante añadido producirá una mayor o menor velocidad de sedimentación inicial. Sin embargo, sólo hay una cantidad óptima de floculante que produce la mayor velocidad de sedimentación para una concentración específica de sólidos en la columna de agua.

Normalmente, la dosis de floculante óptima se determina en un ensayo denominado la *Prueba de Jarras*. El laboratorio de la FICT no posee dicho equipo de ensayo, así que se decidió determinar la cantidad óptima de floculante usando el ensayo de columna de sedimentación combinando muestras de agua "residual" a diferentes concentraciones y diversas dosis de sulfato de aluminio. Las figuras 8 y 9 muestran los resultados obtenidos en la muestra preparada con el Suelo A y en la del Suelo B, respectivamente.

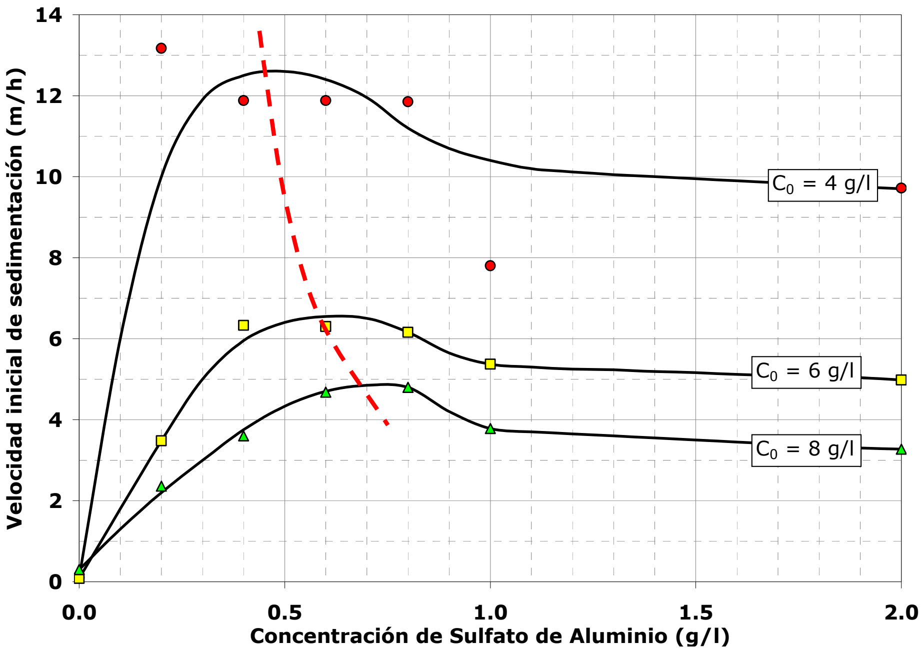

Figura 8. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con <u>Suelo A</u>)

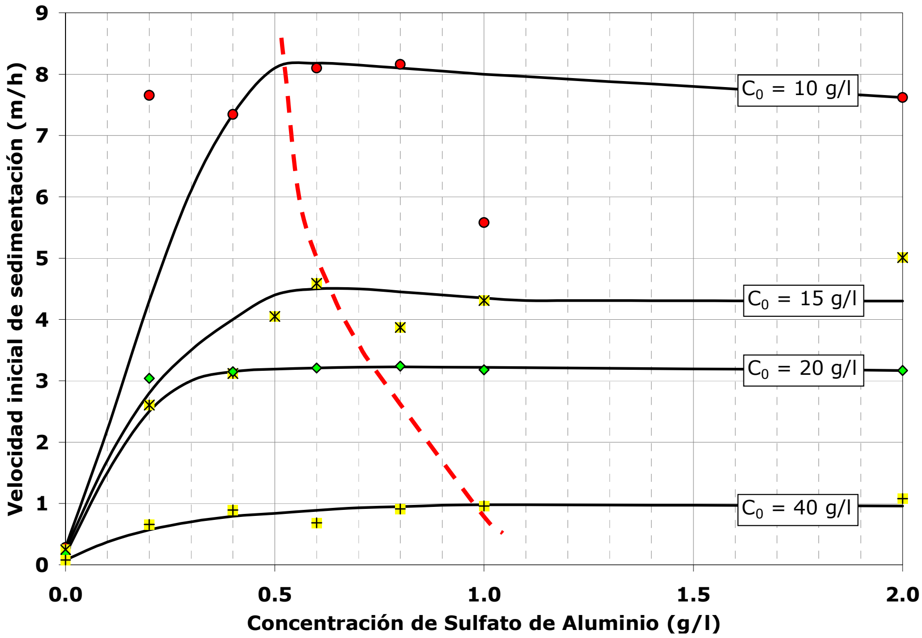

Figura 9. Variación de la velocidad de sedimentación inicial en función de la dosis de floculante y la concentración inicial del ensayo (Mezcla preparada con <u>Suelo B</u>)

La línea entrecortada en ambas figuras muestra una tendencia similar del comportamiento del punto óptimo de floculación a medida que se varía la concentración inicial de la suspensión analizada. La dosis óptima del sulfato de aluminio aumenta a medida que la concentración inicial usada en el ensayo también aumenta, tal como se muestra en la figura 10.

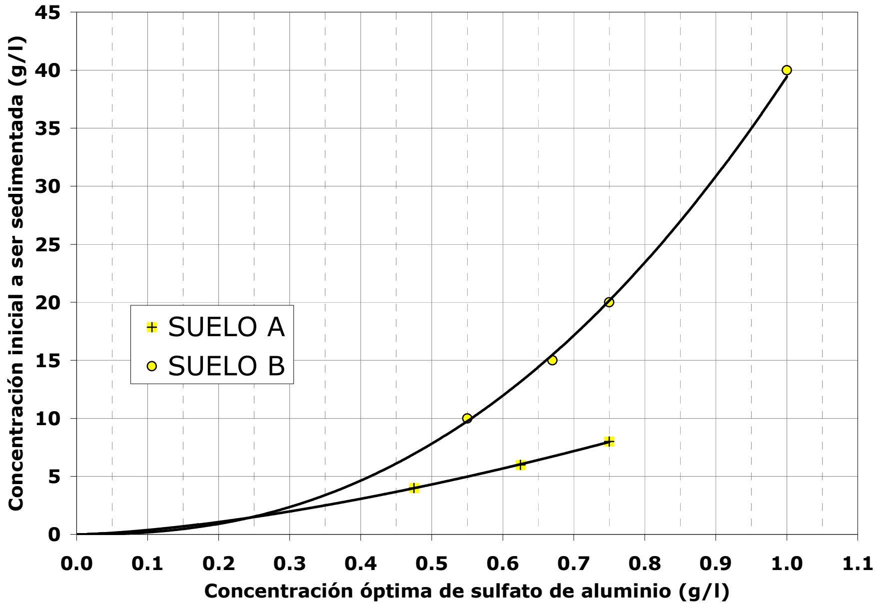

Figura 10. Variación de la dosis óptima del sulfato de aluminio en función de la concentración de sólidos en la muestra a ser sedimentada

Al agua "residual" preparada añadiendo la dosis óptima de sulfato de aluminio, se aplicó el análisis de flujo de sólidos para ambos tipos de preparación (Suelo A y Suelo B). Este análisis presentó un incremento entre 10 a 20 veces los valores estimados para el análisis de la muestra sin floculante (figura 11). Este incrementó produce una disminución del tamaño del sedimentador debido a que el flujo de sólidos es inversamente proporcional al área de sedimentación.

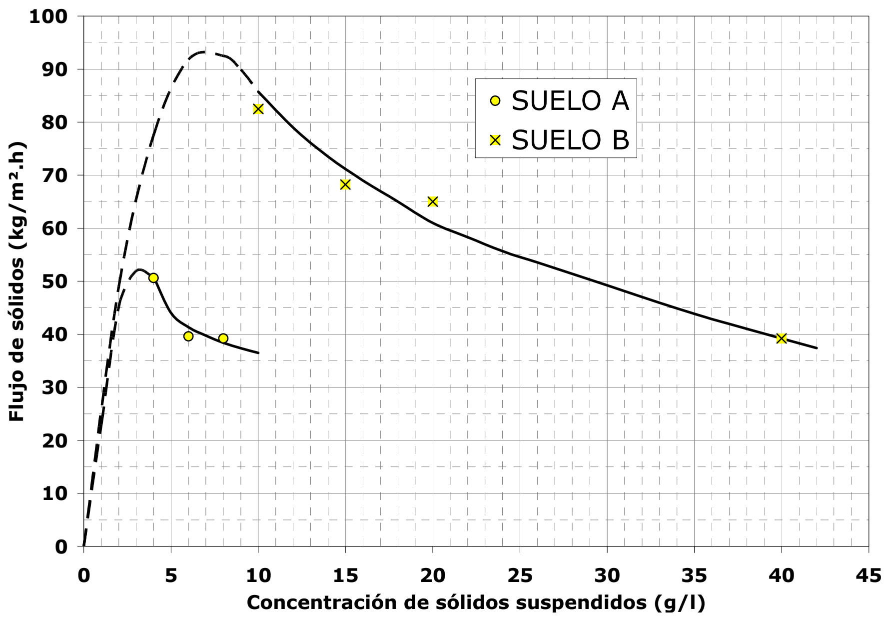

Figura 11. Análisis del flujo de sólidos en el agua "residual" preparada con los dos tipos de muestras de suelo y con la dosis óptima de floculante

En el caso del agua de lavado de vehículos mezcladores, no hubo necesidad de utilizar sulfato de aluminio como floculante ya que siempre se produjo una sedimentación uniforme (definición clara de la interfase agua – sedimento). Cuando se realizó el análisis de flujo de sólidos, se obtuvieron valores altos que produjeron un área pequeña de sedimentación (figura 12).

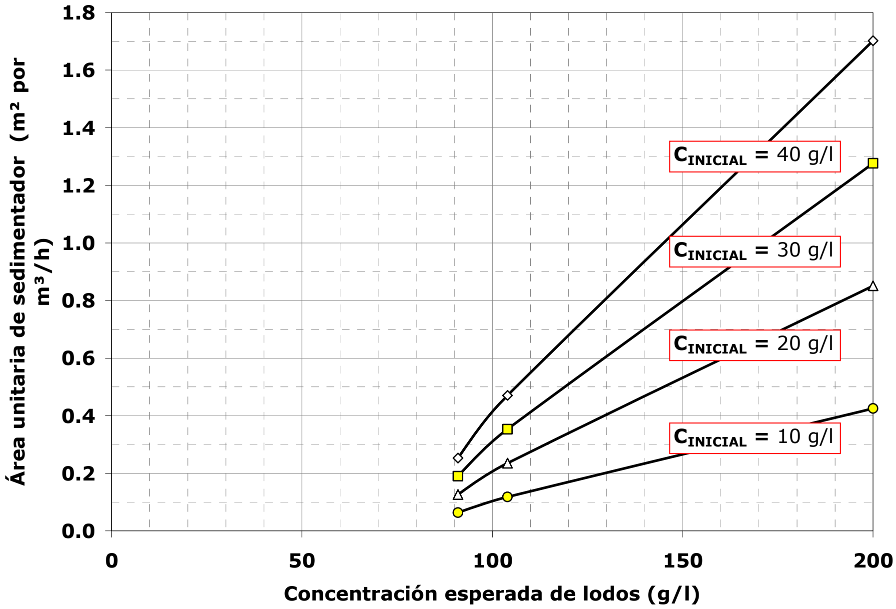

Figura 12. Variación del área de un sedimentador para el agua de lavado de vehículos mezcladores de hormigón.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El agua "residual" preparada mostró, en el proceso de sedimentación, un comportamiento similar al agua residual obtenida del lavado de vehículos mezcladores de hormigón. Se pudieron obtener todos los parámetros aplicados en el diseño de tanques sedimentadores / clarificadores. En el dictado del curso de Ingeniería Sanitaria, la práctica de sedimentación debería replicar esta experiencia mezclando agua de la llave con suelo que pasa el tamiz #200. En el futuro, se debería probar con otros materiales para que se pueda representar aguas residuales generadas en procesos industriales conocidos.

Una limitación de las muestras de suelo utilizadas es la cantidad presente de partículas arcillosas (partículas menores a 20 µm). A mayor contenido arcilloso, la interfase agua – sedimento es más difícil de definir debido a que las partículas arcillosas tienden hacia un estado coloidal en la suspensión. Por lo tanto, es recomendable usar muestras de suelo de tamaño uniforme con mayor contenido de limo o en su defecto usar el material retenido entre el tamiz #200 y el #300.

Todos los ensayos realizados muestran que la velocidad inicial de sedimentación disminuye a medida que la concentración de sólidos usada en el ensayo disminuye en los dos tipos de suspensiones analizadas.

Respecto a los ensayos de sedimentación en las muestras preparadas usando floculante, se pudo determinar que la dosis óptima de sulfato de aluminio aumenta con la concentración de sólidos usada en cada ensayo. La adición de sulfato de aluminio resultó en un incremento de la velocidad de sedimentación y por consiguiente en el flujo de sólidos resultante. Debido a que el flujo de sólidos es inversamente proporcional al área requerida por la sedimentación, el espacio ocupado por el sedimentador es optimizado también con la adición del floculante.

Finalmente, el agua de lavado de vehículos mezcladores de hormigón no necesitó del uso de floculantes ya que se pudo definir una interfase clara agua – sedimento desde el inicio del ensayo. Una de las principales razones de este comportamiento es que las partículas sólidas en este tipo de agua son básicamente polvo de cemento, la mayoría de las cuales tienen un tamaño uniforme. Esta característica produce una sedimentación uniforme.

AGRADECIMIENTO
Los autores agradecen la colaboración prestada por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT - ESPOL) en la realización de los ensayos. Igualmente, la planta de Hormigones HOLCIM colaboró en la obtención de las muestras de agua del lavado de camiones mezcladores de hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

CEPIS, 1981. *Evaluación de plantas de tratamiento de agua*. Tomo I, Manual DTIAPA C-5, Programa de Protección de la Salud Ambiental-HPE.

Dick R.I. y Ewing B.B., 1967. Evaluation of Activated Sludge Thickening Theories. *J. Sanit. Eng. Div.*, ASCE, vol. 93, No. SA-4

Keinath T.M., 1981. Operational Dynamics and Control of Secondary Clarifiers. *Journal WPCF*, vol. 57, No. 7, pp 770.

HPE/OPS/CEPIS, 1992. *Sedimentación*. Manual III, Tomo 11. Programa de Mejoramiento de la Calidad del Agua, Serie Filtración Rápida, 1992.

Perez J. M., 1977. *Evaluation of lower cost methods of water treatment in Latin America*. Lima: CEPIS/OPS, pp. 290.

Tchobanoglous G. y Burton F., 1995. Operaciones Físicas Unitarias. *En: Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales; tratamiento, vertido y reutilización*. España: McGraw-Hill. Volumen 1, tercera Edición, ISBN 84-481-1727-1

Villacreses J.A. y Vega J.C., 2006. Estudio de la sedimentación en el tratamiento del agua. Tesis de grado de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Yao K.M., 1970. Theoretical study of high-rate sedimentation. *Journal of the Water Pollution Control Federation,* 42 (2, parte I), pp. 218-228.