

Esquema para el dimensionamiento de unidades de sedimentación de alta tasa de flujo ascendente¹

Scheme for sizing the sedimentation units in high rate upflow

A Rincón, OF. Herrera y MF. Ortiz

Recibido Agosto 6 de 2013 – Aceptado Noviembre 20 de 2014

Resumen - En este trabajo se formula un esquema metodológico sistemático para el dimensionamiento de unidades de sedimentación de alta tasa de flujo ascendente con placas inclinadas. Para ello se utilizan los lineamientos y las ecuaciones existentes en la literatura. El desarrollo planteado permite definir valores adecuados para carga superficial (C_s) y razón entre longitud de placa y distanciamiento entre placas (l/d), que cumplan los lineamientos para carga superficial (C_s), tiempo de retención en placas (t_p), razón entre longitud de placa y distanciamiento entre placas (l/d), y velocidad crítica de asentamiento (V_{sc}). La implementación de esta metodología, presenta beneficios como: i) indicar un orden claro de los cálculos que llevan a satisfacer los lineamientos de la literatura, sin necesidad de ensayo y error; ii) indicar los límites permisibles de las variables definidas por el usuario. El ejemplo realizado muestra que el esquema planteado puede llevarse a un ordenador de manera sencilla, y la información generada por el ordenador permite una fácil, rápida y adecuada definición de las variables seleccionadas por el usuario.

Palabras Clave - alta tasa, placas inclinadas, sedimentación, sedimentación laminar, tratamiento de aguas residuales, tratamiento primario avanzado.

Abstract - In this article a systematic methodological approach for the design of sedimentation units high rate upflow inclined plates is formulated. It uses the guidelines and the

existing equations in the literature. The development raised to define appropriate values for surface charge (C_s) and ratio of plate length and distance between plates (l/d), which meet the guidelines for surface charge (C_s), retention time plates (t_p), reason plate between length and distance between plates (l/d), and settlement critical speed (V_{sc}). The implementation of this methodology has benefits such as: i) indicate a clear order of the calculations that lead to meet the guidelines of the literature, without the need of trial and error; ii) indicate the permissible limits of user-defined variables. The example shows that the proposed plan may be simply carried to a computer, and the information generated by the computer allows for easy, quick and proper definition of the user-selected variables.

Key Words - high rate, inclined plates, sedimentation, laminar sedimentation, wastewater treatment, advanced primary treatment.

I. INTRODUCCIÓN

EL sedimentador de alta tasa es comúnmente usado para el tratamiento de aguas residuales como tanque de sedimentación primario, secundario o terciario. Aprovecha el hecho de que el proceso de sedimentación es más afectado por el área de sedimentación que por el tiempo de retención [1], [2]. Los cálculos de las dimensiones del sedimentador de alta tasa deben satisfacer varios lineamientos y emplear varias ecuaciones, como se puede concluir a partir de las referencias que se discuten a continuación. En el trabajo de Henao e Isaza [3] se realizó el diseño y construcción de una unidad de banco para tratamiento de aguas residuales, y consta de las unidades de coagulación, floculación y sedimentación. El sedimentador es de alta tasa de flujo ascendente. Para los valores de los parámetros, por ejemplo inclinación de placas, se utilizaron datos típicos de la literatura. Algunos de los cálculos fueron: i) carga superficial, velocidad promedio de flujo en el sedimentador, velocidad crítica de asentamiento,

¹Este trabajo fue financiado por el Centro de Investigación, Proyección y Desarrollo de la Universidad Católica de Manizales, a través del proyecto 'Agua termal: caracterización y aplicaciones industriales', cuyo referenciado es RIN068.

A. Rincón y M.F. Ortiz pertenecen a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Católica de Manizales, Manizales, Colombia (correos: arincons@ucm.edu.co; mortiz@ucm.edu.co).

O.F. Herrera pertenece a la Universidad Federal de Ouro Preto, OP, MG, Brasil (correo: oscarherrera10@gmail.com) “

número de Reynolds y número de placas planas, ii) pérdida de carga para la pantalla entre el tanque de pre-tratamiento y el tanque de coagulación, iii) paso del floculador al sedimentador: pérdida de carga y gradiente de velocidad. Además, se diseñó una unidad de banco adicional para un mayor caudal de diseño, que consta de tres cámaras de floculación, y un sedimentador más largo. Se realizaron los planos de cada diseño y se construyó la primera unidad de banco propuesta.

En algunos trabajos se presentan diagramas, ecuaciones, lineamientos y ejemplos para el diseño de unidades de sedimentación de alta tasa [4-8]. En el libro de Romero [4] se incluye: i) ecuaciones para velocidad crítica de asentamiento, tiempo de retención, número de placas, área de sedimentación de alta tasa, ii) parámetros de diseño, iii) ejemplos de diseño. En el libro de Arboleda [5] se incluye el cálculo de los siguientes parámetros: velocidad crítica de caída de la partícula, velocidad del flujo entre las placas, número de placas, área total horizontal, y relación entre longitud de las placas y espaciamiento entre placas. En el libro de Pérez [6] se incluye el cálculo de: velocidad a través de las placas, número requerido de placas, longitud ocupada por las placas.

Son pocos los trabajos de investigación sobre sedimentadores de alta tasa. En el trabajo de Demir [9] se realiza un estudio experimental de determinación de la eficiencia de sedimentación y el efecto de ángulo del plato para un sedimentador laminar. Mediante experimentos y de acuerdo con criterios estadísticos se evaluó el efecto de distintas cargas superficiales y distintos ángulos de plato sobre la eficiencia de sedimentación. Dicha eficiencia se define con base en la turbidez. Se formuló una ecuación que describe el efecto de ángulo y carga superficial sobre eficiencia de sedimentación, realizando ajuste de sus parámetros mediante regresión no-lineal de dos pasos. Utilizando esta ecuación se determinó el ángulo de plato que proporciona una máxima eficiencia de sedimentación. En el estudio de Lekang y colaboradores [10] se evaluó un sedimentador laminar biológico, el cual consiste de bio-películas en soportes que se localizan en la unidad de sedimentación, y mejora la remoción de sólidos suspendidos debido a la adhesión de las partículas de contaminante. El sedimentador acogía agua de un acuario. Se realizó un estudio experimental de 22 días, en el cual se midió la calidad del agua de entrada y de salida de la unidad de sedimentación, lo cual incluye el valor de los sólidos suspendidos totales y el fósforo total.

Se obtuvieron buenas remociones de estos dos parámetros. En el estudio de Gasperi y colaboradores [11] se analiza la presencia y remoción de diversos contaminantes en un tratamiento de aguas residuales por clarificación laminar y biofiltración. Se comparó la eficiencia de remoción en los dos procesos, y observó que la eficiencia de remoción depende de las propiedades fisicoquímicas de cada componente y de las condiciones de operación de cada método. La clarificación laminar realizada logró una buena

remoción de contaminantes, con remoción de la mayoría de compuestos contaminantes. Se logró alta remoción de sólidos suspendidos totales (TSS), DQO total, DBO_5 , y fósforo, aunque la remoción de nitrógeno fue baja. Se encontró que la remoción de compuestos orgánicos depende en gran medida del potencial de adsorción y por lo tanto depende del valor del coeficiente de partición del compuesto. De hecho, para los compuestos con alto nivel de hidrofobicidad se logra una gran remoción, lo cual ocurre a través de sedimentación de sólidos solubles totales y a través de sorción (absorción o adsorción) con formación de partículas de lodo. En contraste, para los compuestos hidrofílicos se logra un nivel muy bajo de remoción. Para la biofiltración, la remoción de compuestos depende de varios mecanismos: i) filtración física de los sólidos suspendidos totales, ii) volatilización, iii) sorción (absorción o adsorción), iv) transformación biológica de los compuestos. Estos procesos no permiten determinar una clara predicción de la remoción de contaminantes, sin embargo se pueden identificar niveles de remoción para dos grupos de compuestos: i) compuestos hidrofóbicos o volátiles, para los cuales se observa una alta remoción, ii) compuestos hidrofílicos, no-volátiles, para los cuales se obtiene una baja remoción. En el trabajo de Robescu y colaboradores [1] se realiza modelación del flujo en un sedimentador de alta tasa secundario. Se realiza modelación por método numérico de elementos finitos. Se obtiene un gráfico de dos dimensiones que muestra la dirección del flujo y su distribución a través de las bandejas.

En el trabajo de Wood y colaboradores [12] se analiza la factibilidad de un tratamiento de agua lluvia por sedimentación convencional y sedimentación laminar, con y sin adición de polímero floculante, para la ciudad de Toronto. Se utilizó una unidad de clarificación rectangular a escala piloto con platos laminares, mediante la cual se trató el agua de lluvia de la ciudad de Toronto de los años 2001, 2002, 2003. Se caracterizó el agua lluvia, incluyendo caudal, sólidos totales suspendidos, DQO, DBO_5 , metales. Se realizaron en total 73 pruebas de clarificación laminar y convencional: 56 pruebas de clarificación laminar, y 17 de convencional. Se observó que la adición del polímero mejoraba significativamente la velocidad de sedimentación. El proceso de clarificación generó un lodo concentrado con un alto contenido de metales pesados. Los mejores resultados se obtuvieron con un polímero catiónico con una dosis de 4 mg/L, y clarificación laminar, dando lugar a una remoción de 83% de sólidos suspendidos totales, para cargas superficiales hasta de 36 m/h. Se concluye que la combinación de clarificación laminar con ayudante polimérico de floculación mejora significativamente la eficiencia de la clarificación convencional, además de que disminuye el área requerida del proceso.

Los procedimientos mencionados anteriormente para el cálculo de las dimensiones del sedimentador de alta tasa presentan varias dificultades a saber: i) no hay forma de satisfacer los lineamientos de manera secuencial, ii) no hay un orden claro de los cálculos que lleven a satisfacer

los lineamientos, de modo que se debe emplear ensayo y error cuando no se satisfaga algún lineamiento, iii) no hay una forma de saber los límites permisibles de las variables definidas por el usuario. Los anteriores inconvenientes se soportan además en el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS de Colombia, debido a que allí se definen valores guías para diseñar sedimentadores y algunas metodologías para los cálculos, pero no se establece con precisión la forma de realizar estos de manera que garantice exactitud y reiteración en el diseño de las unidades de interés.

En el presente trabajo se considera un sedimentador de alta tasa de flujo ascendente, que opera de manera continua. Se formula un esquema que permite calcular las dimensiones del sedimentador, es decir, el volumen, el largo y ancho del sedimentador, y el largo y ancho de cada placa, a su vez que permite cumplir los lineamientos mostrados en la literatura y superar las dificultades ii y iii mencionadas en el ítem anterior.

Metodología. Se utiliza la metodología de diseño de sedimentadores de alta tasa con placas planas inclinadas con respecto a la horizontal, según el método que aparece referenciado en [4], que se basa en la suposición de sedimentación simple, que ocurre cuando se sedimentan partículas discretas, es decir partículas que no cambian de forma, tamaño o densidad durante el descenso. Se considera la subdivisión del espacio en compartimentos. Además, para el desarrollo del presente trabajo se utilizan los siguientes métodos: i) solución analítica de ecuaciones, ii) despeje de ecuaciones con desigualdades (inecuaciones) de acuerdo a diagramas de bloques, iii) métodos numéricos: utilizando software Matlab, con ciclo ‘for’ para el cálculo de los valores de la velocidad crítica de asentamiento y número de Reynolds, y con gráficas en tres dimensiones. Es importante mencionar que un método muy efectivo y práctico para analizar el efecto de distintas variables sobre otras, en sistemas de ecuaciones, consiste en la combinación de un orden de cálculo con gráficas en tres dimensiones [13].

II. CONCEPTOS, LINEAMIENTOS Y ECUACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNIDADES DE SEDIMENTACIÓN DE ALTA TASA

La complejidad y el tipo de tratamiento para tratar el agua dependen de la calidad de la misma [3]. El diseño de una planta de tratamiento comprende la selección de procesos y operaciones de tratamientos adecuados y económicos, de acuerdo a la calidad del agua [3]. El diagrama de bloques de una planta de coagulación y filtración clásica para reducción de turbiedad, microorganismos y color se muestra en la Fig. 1, tomada de [3].

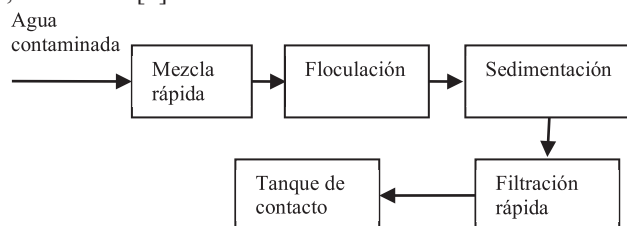


Fig. 1. Esquema general del diseño de una planta de tratamiento.

Las unidades de coagulación, floculación y sedimentación se diseñan con base en el caudal de diseño seleccionado.

El sedimentador de alta tasa mejora la capacidad del sedimentador convencional mediante placas que son inclinadas con respecto a la horizontal y subdividen el espacio en compartimentos, de modo que divide el caudal y da lugar al régimen hidráulico laminar. Así, tiene dos acciones principales: incrementar el área para decantación y originar el flujo laminar [7, 10]. La inclinación de las bandejas permite que los lodos puedan deslizarse por su propio peso y caer a una zona para ellos, de modo que no se necesitan mecanismos de limpieza. En el sedimentador de alta tasa de flujo ascendente el agua entra a través de la parte inferior de las placas, asciende por entre las placas y luego es evacuada por tuberías perforadas o canaletas ubicadas hacia la parte superior de las placas [6]. Los compartimentos entre las placas actúan cada uno como un sedimentador. El sedimentador debe tener tolvas cónicas en el fondo, con el fin de facilitar la extracción periódica de los lodos [3]. Algunas de las diferencias con respecto a los sedimentadores convencionales son [4-6], [14]: i) la profundidad del decantador es bastante baja, ii) el flujo en el sedimentador es de tipo laminar, con número de Reynolds menores a 500, iii) generalmente el período de detención en los sedimentadores de alta tasa es menor a 10 min, mientras que en los convencionales es de horas. En el libro de Pérez [6] se puede ver una descripción completa de dicho sedimentador. Una descripción del sedimentador de alta tasa se muestra en las Fig. 2, Fig. 3 y Fig. 4, de acuerdo con el libro de Pérez [6].

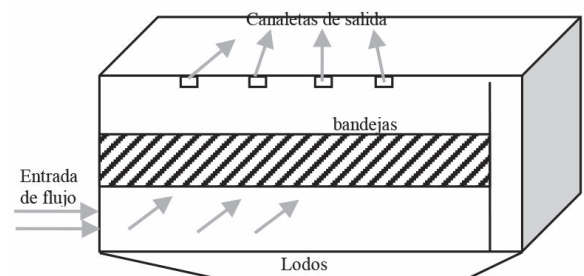


Fig. 2. Esquema general de un sedimentador de alta tasa de flujo ascendente.

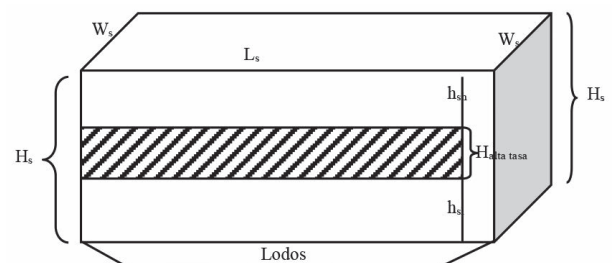


Fig. 3. Esquema de las dimensiones de un sedimentador de alta tasa de flujo ascendente.

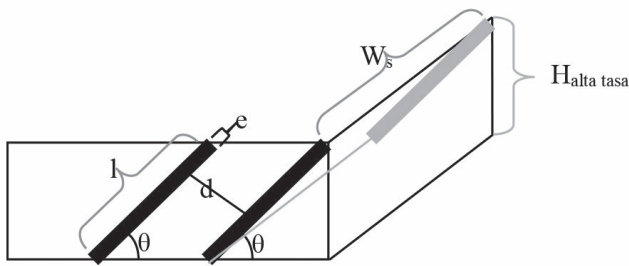


Fig. 4. Esquema general de las bandejas del sedimentador de alta tasa de flujo ascendente.

Para el diseño de sedimentadores, el parámetro más empleado es la carga de sedimentación superficial, y el área superficial que es función de la carga superficial [4]. En el libro de Romero [4] y el libro de Pérez [6] se muestran algunos parámetros de diseño de sedimentadores de alta tasa, los cuales se muestran en la Tabla I.

TABLA I. PARÁMETROS DE DISEÑO DE SEDIMENTADORES DE ALTA TASA		
Sím-bolo	Parámetro	Valor
C_s	Carga superficial	60 - 180 [m/d]
t_p	Tiempo de retención en placas	8 a 25 min
θ	Inclinación de placas	60°
N_{Re}	Número de Reynolds	< 500 ; <20000
	Tasa de rebose	1.7 - 3.3 L/s·m
d	Distancia entre placas	5 cm
	Fracción del tanque a tasa elevada	<75%
V_{sc}	Velocidad crítica de asentamiento	15 - 60 m/d
l/d	Razón entre longitud de las placas y distanciamiento entre placas	>8

Algunas observaciones con respecto a estos lineamientos son:

- En el libro de Romero [4] se muestran los siguientes rangos para el tiempo de retención en placas, obtenidos a su vez de diferentes fuentes de la literatura: 15 a 25, 10 a 15, y >4. Además, en los ejemplos mostrados en las páginas 191 y 203, se obtienen tiempos de retención t_p de 9.2 min y 8.3 min, respectivamente. Por tanto, se toma el rango $t_p \in [8, 25]$ min.

- La velocidad crítica de asentamiento (V_{sc}) debe ser comparable con los valores de carga superficial para sedimentadores convencionales [4], para los cuales se han reportado los rangos 20-60 m/d, 30-60 m/d, 15-30 m/d. La combinación de estos rangos implica que V_{sc} debe estar comprendida en el rango 15-60 m/d, y dicho lineamiento se considera en la Tabla I.

- En el libro de Pérez [6] se obtiene una remoción mayor a 60% para una relación $l/d > 8$, mientras que se obtiene una remoción mayor a 70% para una relación $l/d > 12$. Por esta razón se toma como lineamiento el rango $(l/d) > 8$.

- En el estudio de Robescu, Mandis y Robescu [1] se utilizó un ejemplar escala piloto, con una distancia entre placas (d) de 3.5 cm, mientras que en el trabajo de Henao e Isaza [3] se utilizó un ejemplar escala banco con una distancia entre placas (d) de 2 cm.

Para el diseño se deben conocer los siguientes parámetros: caudal de entrada y propiedades del fluido, por ejemplo la viscosidad cinemática. En el trabajo de Henao e Isaza [3] y en el libro de Romero [4], se toma el ancho de cada placa igual al ancho de la unidad de sedimentación:

$$W_{sp} = W_s \quad (1)$$

El tiempo de retención en las celdas es:

$$t_p = \frac{l}{v_o} \quad (2)$$

Donde l es el largo de las placas y v_o es la velocidad promedio del fluido en el elemento de sedimentación de alta tasa. La carga superficial es [4]:

$$C_s = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Donde Q [m³/seg o litro/min] es el caudal, A [m²] es el área útil de sedimentación de alta tasa. La velocidad promedio del fluido en el elemento de sedimentación de alta tasa es [4]:

$$v_o = \frac{Q}{A \sin \theta} \quad (4)$$

Donde A es el área útil de sedimentación de alta tasa, θ es el ángulo formado por las placas, para el cual se recomienda un valor de 60° según la Tabla I, Q [m³/s o litro/min] es el caudal de diseño. El número de Reynolds es [4]:

$$N_{Re} = \frac{v_o d}{\nu_{sv}} \quad (5)$$

Donde ν_{sv} [m²/seg] es la viscosidad cinemática del fluido, d es la separación entre placas, v_o es la velocidad promedio del fluido en el elemento de sedimentación de alta tasa. El valor de la separación entre placas (d) está recomendado en la Tabla I. La velocidad crítica de asentamiento es [4]:

$$V_x = \frac{S_c v_o}{\sin(\theta) + L_c \cos(\theta)} \quad (6)$$

Donde S_c es el parámetro de eficiencia, $S_c=1$ para sedimentadores de placas paralelas; v_o [m/s] es la velocidad promedio de flujo en el elemento de sedimentación; θ es el ángulo formado por las placas, cuyo valor está recomendado en la Tabla I. Las unidades de V_{sc} son las mismas unidades de v_o . L_c es la longitud relativa efectiva de sedimentación en flujo laminar y está dada por [4]:

$$L_c = (l/d) - 0.013N_{Re} \quad [\text{adim}] \quad \text{si } (l/d) - 0.013N_{Re} \geq 0 \quad (7)$$

$$L_c = (1/2)(l/d) \quad \text{si } (l/d) - 0.013N_{Re} < 0 \quad (8)$$

Donde l [m] es el largo de las placas, y d [m] es la separación entre placas, cuyo valor está recomendado en la Tabla I, y N_{Re} está definido en (5). Según el libro de Romero [4], el tiempo de retención en el tanque de sedimentación satisface la siguiente expresión:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{Ad}{Q} \quad (9)$$

Donde V es el volumen de la cámara de sedimentación, Q es el caudal, A es el área útil de sedimentación de alta tasa.

El largo y ancho del sedimentador se pueden determinar a partir del área útil de sedimentación, como se explica a continuación. En el trabajo de Henao e Isaza [3] se tomaron iguales valores para el ancho del tanque de sedimentación y el ancho del tanque de floculación, de modo que $W_s=W_f$, donde W_s es el ancho del sedimentador. En el trabajo de Henao e Isaza [3] y el libro de Romero [4], se define el ancho de cada placa igual al ancho de la unidad de sedimentación:

$$W_{sp} = W_s \quad (10)$$

El área útil de sedimentación de alta tasa es igual al producto entre el largo (L_s) y el ancho (W_s):

$$A = L_s W_{sp} = L_s W_s \quad (11)$$

En el libro de Romero [4] se presentan lineamientos o rangos para la razón entre largo y ancho del sedimentador, para sedimentadores convencionales. Por tanto, una opción es tomar valores de la razón entre largo y ancho del sedimentador, es decir L_s/W_s , según valores utilizados en la literatura. Esto permitiría calcular L_s y W_s , a partir del área de sedimentación (A) y (11). Según el trabajo de Henao e Isaza [3] y el libro de Romero [4], el número de placas planas (N) se puede calcular de la siguiente expresión:

$$N = \frac{L_s \sin \theta + d}{d + e} \quad (12)$$

Donde L_s es el largo del sedimentador, d es la separación entre placas, e es el espesor de las placas, y θ es el ángulo formado por las placas.

A. Canal de agua floculada

Se realizó el dimensionamiento del canal para la conducción del agua que sale del floculador hacia la unidad de sedimentación usando la metodología y los valores de las propiedades físicas de interés propuestos en el libro de Pérez [6]. Para proteger los flóculos, evitar el rompimiento de los flóculos y evitar la alteración del proceso de coagulación/floculación, el gradiente de velocidad en los orificios, canales, tuberías, etc. debe ser menor o igual al de la cámara de floculación precedente. El gradiente G [s^{-1}] en dichas estructuras es:

$$G = \eta \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} R^{-0.67} v^{1.5} \quad (13)$$

Donde η es el coeficiente de rugosidad de Manning, γ es el peso específico del agua [Kgf/m^3], μ es la viscosidad absoluta del fluido [$Kgf \cdot s/m^2$], v es la velocidad [m/s], y R es el radio hidráulico de la estructura de paso del agua [m]. Para los parámetros se toman los siguientes valores: $\eta=0.013$, $\gamma=999 \text{ Kg}/m^3$, $\mu=1.14 \times 10^{-4} \text{ Kg} \cdot s/m^2$. La velocidad v [m/seg] se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$v = \frac{\text{caudal}}{(\text{No. orificios}) \times (\text{área transversal})} \quad (14)$$

$$v = \frac{q}{N_o A_i}$$

Donde N_o es el número de orificios, A_i [m^2] es el área transversal, q [m^3/s] es el caudal. Es importante resaltar que en el trabajo de Henao e Isaza [3] se utiliza un valor $N_o=1$ por ser un solo orificio. El radio hidráulico se define como

$$R = \frac{A_{\text{orificio}}}{P_{\text{mojado}}} \quad (15)$$

Donde A_{orificio} es el área del orificio y P_{mojado} es el perímetro del orificio.

En el trabajo de Henao e Isaza [3] se tienen las siguientes consideraciones: I) el orificio es rectangular y es uno sólo, de modo que $N_o=1$, II) el ancho del orificio es igual al ancho de la unidad de floculación, III) el gradiente de velocidad en el orificio debe ser menor que el gradiente de velocidad de la cámara de floculación. En el presente trabajos tomamos estas consideraciones, y definimos b' , h' como la base y la altura del orificio. La consideración II implica que b' es fijo. La consideración I y la ecuación (15), dan como resultado:

$$R = \frac{b'h'}{2(b'+h')}, \quad A_i = b'h' \quad (16)$$

Combinando (14) con (15), (17), se obtiene:

$$G = \eta \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} \left(\frac{b'h'}{2(b'+h')} \right)^{-0.67} \left(\frac{q}{N_o b'h'} \right)^{1.5} \quad (17)$$

Donde la anterior ecuación debe satisfacer la condición III. La anterior ecuación, junto con el requerimiento III, nos permite encontrar el valor de la altura del orificio h' . Se puede graficar G versus h' , y la línea G_f donde G_f es el valor del gradiente de floculación, para así determinar el rango de valores de h' que da como resultado $G < G_f$.

III. DESARROLLO DE LAS ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS VALORES PERMISIBLES DE C_s Y (l/d)

En esta sección se desarrollan las ecuaciones necesarias para determinar las dimensiones de la unidad de sedimentación de alta tasa, teniendo en cuenta los lineamientos mostrados en la Tabla I. Las variables que son definidas por el usuario son: C_s y (l/d) . La idea central es determinar los rangos de valores de C_s y (l/d) que implican el cumplimiento de las restricciones, en C_s , (l/d) y t_p pero también de V_{sc} y N_{Re} , mostradas en la Tabla I.

Combinando (6) con (3), (4) y (5) se obtiene:

$$V_{sc} = \frac{C_s}{\text{sen}(\text{sen}\theta + L_c \cos\theta)} \quad (18)$$

$$L_c = (l/d) - 0.013N_{Re} \text{ [adim]} \text{ si } (l/d) - 0.013N_{Re} > 0$$

$$\begin{aligned} v_o &= \frac{C_s}{\text{sen}\theta}, \quad N_{Re} = \frac{v_o d}{\nu_{sv}} \times \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ seg}} \\ &= \frac{d}{\nu_{sv}} \frac{C_s}{\text{sen}\theta} \times \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ seg}} \quad (19) \end{aligned}$$

$$d = 0.05 \text{ m}, \quad \nu_{sv} = 1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Por tanto, V_{sc} es función de (l/d) y C_s , y se necesita definir los rangos de valores en los cuales C_s y (l/d) pueden variar.

Para determinar estos rangos es necesario incorporar el efecto de los lineamientos para C_s , (l/d) , t_p y V_{sc} . La Fig. 5 indica la esquematización de cómo las ecuaciones y lineamientos se combinan para dar lugar a la definición de los rangos de C_s y (l/d) , los cuales a su vez permiten generar valores de V_{sc} que cumplan todos los lineamientos. De hecho, la Fig. 5 indica el orden de cálculos y de acople de ecuaciones con lineamientos. Se debe definir el valor máximo y el valor mínimo de (l/d) , que implican rangos de (l/d) que cumplen los lineamientos y restricciones, con base en acoplamiento de ecuaciones y lineamientos.

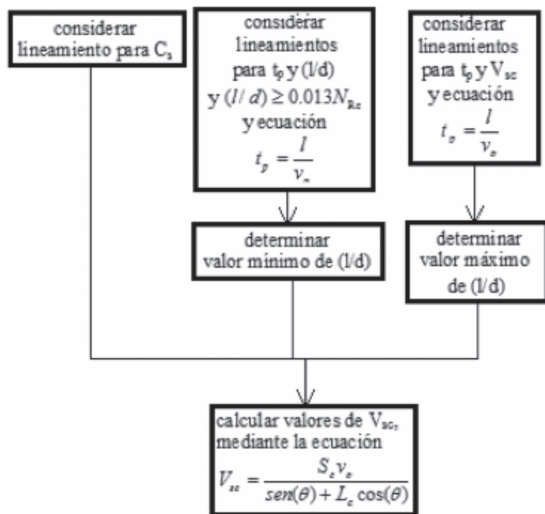


Fig. 5. Esquema general para el desarrollo de ecuaciones que permitan el cálculo de valores de V_{sc} que cumplan con los lineamientos en C_s , t_p , (l/d) y V_{sc} .

Para definir las ecuaciones necesarias, se realizan las siguientes actividades:

Tarea i: retomar de la literatura los lineamientos y ecuaciones para C_s , t_p , (l/d) y V_{sc} , **tarea ii:** definir el valor máximo y el valor mínimo de C_s , de acuerdo a los lineamientos, **tarea iii:** definir el valor mínimo de (l/d) que implica el cumplimiento de los lineamientos sobre (l/d) , t_p , N_{Re} , **tarea iv:** definir el valor máximo de (l/d) que implican el cumplimiento de los lineamientos sobre t_p y V_{sc} , **tarea v:** definir el cálculo de V_{sc} , el área (A) , la longitud de placa (l) , la altura del tanque (H_s) . Se debe incorporar la transformación de unidades en cada ecuación con el fin de facilitar los cálculos. La definición del valor mínimo y el valor máximo de (l/d) permite a su vez la definición del vector (l/d) .

Tarea i. Los lineamientos para C_s , t_p , (l/d) y V_{sc} son los mostrados en la Tabla I y se retoman a continuación:

$$C_s \in [60 - 180] \text{ m/dia} \quad (20)$$

$$t_p \in [8 - 25] \text{ min} \quad (21)$$

$$V_{sc} \in [15 - 60] \text{ m/dia} \quad (22)$$

$$l/d \geq 0.013N_{Re}, \text{ y } l/d \geq 8, \text{ o equivalentemente, } l/d \geq \max\{0.013N_{Re}\} \quad (23)$$

El lineamiento $l/d \geq 0.013N_{Re}$ se tomó en vista de (7) y (8), con el fin de facilitar los cálculos.

Tarea ii: el valor mínimo y máximo de (C_s) está dado por el lineamiento en C_s .

Tarea iii. A continuación calculamos el valor mínimo del vector (l/d) , para cada valor dado de C_s . Formulamos la definición del vector (l/d) con base en los lineamientos para (l/d) , t_p y N_{Re} . La ecuación para t_p (2), combinada con (3) y (4) da lugar a:

$$t_p^{[\text{min}]} = \text{sen}\theta \frac{(l/d) d^{[m]}}{C_s^{[m/dia]}} \times 24 \times 60 \frac{\text{min}}{\text{dia}} \quad (24)$$

Despejando para (l/d) , se obtiene

$$l/d = \frac{C_s^{[m/dia]} t_p^{[\text{min}]}}{d \text{ sen}\theta} \frac{1}{24 \times 60 \text{ min}} \quad (25)$$

El lineamiento $t_p > 8 \text{ min}$, que se obtiene de (21), se debe cumplir para cada valor tomado de C_s , no sólo para su valor mínimo. Para definir el valor mínimo del vector (l/d) , se tiene en cuenta (25) en conjunto con la recomendación (23) y el lineamiento $t_p > 8 \text{ min}$:

$$\min\{l/d\} = \max \left\{ \begin{aligned} &0.013N_{Re}, \min\{l/d\}, \\ &\frac{1}{d \text{ sen}\theta} \frac{C_s^{[m/dia]} \min\{t_p^{[\text{min}]}\}}{24 \times 60 \text{ min}} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

donde $\min\{t_p\} = 8 \text{ min}$, $\min\{l/d\} = 8$

Tarea iv. Ahora procedemos a calcular el valor máximo del vector (l/d) , para cada valor dado de C_s , con base en los lineamientos para t_p y V_{sc} . Por un lado, el lineamiento (21) y (25) implican que (l/d) debe satisfacer:

$$(l/d) \leq \frac{1}{d \frac{[m/dia]}{[m]}} \frac{[m/dia]}{C_s} \max\{t_p\} \frac{1}{24 \times 60 \text{ min}} \quad (27)$$

$$\max\{t_p\} = 25 \text{ min}$$

Por otro lado, el lineamiento de V_{sc} también implica otra restricción a (l/d) . Combinando (6), (5), (4), (3), se obtiene:

$$(l/d) = \frac{[m/dia]}{sen\theta} \left[0.013 \frac{[m]}{v_{sv}} \times \frac{1}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{V_{sc} \cos\theta} \right] - \frac{sen\theta}{\cos\theta} \quad (28)$$

Dado que V_{sc} debe cumplir el lineamiento $V_{sc} \in [15 \text{ } 60]$ m/día, el valor de (l/d) debe cumplir:

$$(l/d) \leq \frac{[m/dia]}{sen\theta} \left[0.013 \frac{[m]}{v_{sv}} \times \frac{1}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{15 \cos\theta} \right] - \frac{sen\theta}{\cos\theta} \quad (29)$$

$$\max\{l/d\} = \min \left\{ \frac{1}{d \frac{[m/dia]}{[m]}} \frac{[m/dia]}{C_s} \frac{1}{25 \text{ min}} \frac{1}{1440 \text{ min}}, \frac{[m/dia]}{sen\theta} \left[0.013 \frac{[m]}{v_{sv}} \times \frac{1}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{15 \cos\theta} \right] - \frac{sen\theta}{\cos\theta} \right\} \quad (30)$$

El vector (l/d) se forma tomando varios valores desde $\min\{l/d\}$ hasta $\max\{l/d\}$, utilizando para esto (26) y (30).

Tarea v. El vector V_{sc} se calcula a partir de los vectores v_o , N_{Re} y (l/d) :

$$V_{sc} = \frac{[m/dia]}{sen\theta + (l/d - 0.013N_{Re})\cos\theta} \quad (31)$$

Ver también (18), (19). El lineamiento para V_{sc} está dado por:

$$V_{sc} \in [15 - 60] \text{ m/dia} \quad (32)$$

El área (A) se calcula a partir de (21) [4]:

$$A = \frac{[m^2]}{C_s} \times \frac{[litro/min]}{1000 \text{ litro dia}} \times \frac{24 \times 60 \text{ m}^3 \text{ min}}{1000 \text{ litro dia}} \quad (33)$$

La longitud de la placa se calcula a partir de

$$l = \left(\frac{l}{d}\right) d \quad (34)$$

La altura del tanque se calcula a partir de la recomendación de porcentaje del tanque a alta tasa, mostrada en la Tabla I. Ahora se define el cálculo de la altura del tanque de sedimentación. La Tabla I muestra la recomendación del porcentaje del tanque a alta tasa. Por tanto, se tiene:

$$V_{altatasa} = PV_s \quad (35)$$

Donde P es el porcentaje del tanque a alta tasa, el cual debe satisfacer el lineamiento dado en la Tabla I. Además, $V_{altatasa}$ es el volumen del tanque a alta tasa, y V_s es el volumen del tanque de sedimentación, teniendo en cuenta que $V_{altatasa}$ es una parte del volumen V_s . Se tiene que

$$V_{altatasa} = AH_{altatasa}, \quad V_s = AH_s, \quad (36)$$

Donde $H_{altatasa}$ es el valor de la altura correspondiente a alta tasa, y H_s es la altura del tanque de sedimentación. Se debe tener en cuenta que $H_{altatasa}$ es una parte de la altura H_s . Reemplazando las expresiones de (36) en (35) y organizando, se obtiene:

$$H_{altatasa} = PH_s \quad (37)$$

De la Fig. 4 se obtiene la siguiente relación:

$$H_{altatasa} = lsen\theta \quad (38)$$

Substituyendo esta relación en (38) y resolviendo para H_s , se obtiene:

$$H_s = \frac{1}{P} lsen\theta \quad (39)$$

La altura del tanque de sedimentación se calcula a partir de (39), que fue obtenida a partir de la recomendación del porcentaje del tanque a alta tasa, mostrada en la Tabla I.

Observación 1. En esta sección se han desarrollado las ecuaciones necesarias para el esquema, a saber: N_{Re} (19), $\min\{l/d\}$ (26), $\max\{l/d\}$ (30), V_{sc} (18) y (31), Área (A) (33), longitud de la placa (l) (34), tiempo de retención en placas (t_p) (24), altura del tanque de sedimentación (H_s) (39), número de placas (N) (12).

IV. DEFINICIÓN ANALÍTICA DE LA REGIÓN C_s -(L/D) PARA EL VALOR LÍMITE INFERIOR $V_{sc}=15$ M/D

Para $V_{sc}=15$ m/d hay una curva que relaciona a C_s y a (l/d) . El cálculo de dicha curva permite tener una mayor claridad gráfica en la selección de los valores permisibles de C_s y (l/d) . Dicha curva cumple los lineamientos para C_s , (l/d) , t_p y V_{sc} . La ecuación (6) en conjunto con (3), (4) y (5) permiten definir la relación entre (l/d) y C_s . Combinando (3), (4), (5), (6) se obtiene:

$$V_{sc} = \frac{C_s}{sen\theta(\sin\theta + (l/d - 0.013N_{Re})\cos\theta)} \quad (40)$$

$$(l/d) = 0.013N_{Re} + \frac{1}{\cos\theta} \left[\frac{C_s}{V_{sc}sen\theta} - sen\theta \right]$$

Combinando (3), (4), (5), y teniendo en cuenta el cambio de unidades, se obtiene:

$$N_{Re} = \frac{v_o d}{v_{sv}} \times \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ seg}} = \frac{[m]}{v_{sv}} \frac{[m/dia]}{sen\theta} \times \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ seg}} \quad (41)$$

Substituyendo esta ecuación en (40), se obtiene:

$$(l/d) = \frac{[m/dia]}{sen\theta} \left[0.013 \frac{[m]}{v_{sv}} \times \frac{1}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{V_{sc} \cos\theta} \right] - \frac{sen\theta}{\cos\theta} \quad (42)$$

Esta ecuación implica que (l/d) aumenta con C_s , es decir, (l/d) es monótonicamente creciente con respecto a C_s . Esta ecuación permite calcular la curva que relaciona a (l/d) como función de C_s , para $V_{sc}=15$ m/día. Sin embargo, es necesario calcular los valores máximo y mínimo de C_s que hacen

que los valores calculados de (l/d) cumplan las diferentes restricciones que hay sobre C_s , (l/d) y t_p mostrados en la Tabla I. Primero determinamos el valor extremo inferior de C_s (tarea i), y luego determinamos el valor extremo superior de C_s y luego el valor extremo inferior de C_s (tarea ii).

Tarea i. Para calcular el valor extremo inferior de C_s , designado \underline{C}_s , se debe tener en cuenta que hay varios valores inferiores de C_s que deben ser superados por los valores tomados de C_s : el primero se obtiene del lineamiento para C_s , el segundo se obtiene de (42) combinada con el valor mínimo de (l/d) , el tercero se obtienen del lineamiento para t_p en conjunto con (2). La combinación de estos tres valores genera el valor límite inferior de C_s , a partir del cual se obtienen los valores adecuados de (l/d) .

El primer valor inferior de C_s se obtiene de la cota inferior del lineamiento de C_s mostrado en la Tabla I:

$$C_s^a = 60 \text{ m/d} \quad (43)$$

El segundo valor inferior de C_s se obtiene de (42), combinada con el valor mínimo de (l/d) dado en la Tabla I. Resolviendo (42) para C_s , e introduciendo el valor mínimo de (l/d) , se obtiene:

$$C_s^b = \frac{\text{sen} \theta (\min\{l/d\} + \text{sen} \theta / \cos \theta)}{0.013 \times \frac{d}{v_{sv}} \times \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{V_{sc} \cos \theta}} \quad (44)$$

$\min\{l/d\} = 8, V_{sc} = 15 \text{ m/d}$

El tercer valor inferior de C_s se obtiene de la cota inferior del lineamiento para t_p mostrado en la Tabla I, combinado con (2) y (42). La ecuación (2) genera (23), la cual se puede despejar para C_s :

$$C_s^c = \frac{(l/d)^{[m]}}{t_p^{[min]}} d \text{ sen} \theta \times 24 \times 60 \frac{\text{min}}{\text{día}} \quad (45)$$

Combinando (42) y resolviendo para C_s se obtiene el tercer valor mínimo de C_s :

$$C_s^c = \frac{\text{sen}^2}{\cos \theta \left(0.013 \times \frac{d}{v_{sv}} \times \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{V_{sc} \cos \theta} - \frac{t_p}{d \times 1440} \right)} \quad (46)$$

con $t_p = 8 \text{ min}, V_{sc} = 15 \text{ m/d}$

Dado que los valores tomados de C_s deben superar todos los valores inferiores obtenidos, entonces el valor mínimo que se debe tomar de C_s es:

$$\underline{C}_s = \max\{C_s^a, C_s^b, C_s^c\} \quad (47)$$

Donde C_s^a, C_s^b, C_s^c están dados en (43), (44), (46).

Tarea ii. Ahora necesitamos calcular el valor extremo superior de C_s , designado \overline{C}_s , hasta el cual se pueden obtener valores de (l/d) que satisfagan los lineamientos de

C_s y t_p dados en la Tabla I. Hay dos valores superiores de C_s , con respecto a los cuales los valores tomados de C_s deben ser menores: el primero se obtiene del lineamiento para C_s , y el segundo se obtiene del lineamiento para t_p . La combinación de estos dos valores genera el valor de \overline{C}_s máximo tomado para el cálculo del vector (l/d) . El primero se obtiene de la cota superior del lineamiento de C_s mostrado en la Tabla I:

$$C_s^A = 180 \text{ m/d} \quad (48)$$

El segundo se obtiene del lineamiento para t_p mostrado en la Tabla I, combinado con (2) y con (42). La ecuación (42) nos permite obtener (l/d) como función de C_s . Por otro lado, (2) da lugar a (24), la cual retomamos:

$$l/d = \frac{\frac{[m/dia] C_s}{[m]} \frac{[min] t_p}{24 \times 60 \text{ min}}}{d \text{ sen} \theta} \quad (49)$$

Ya que el valor máximo de t_p es 25 min, según Tabla I, se obtiene:

$$l/d \leq \frac{\frac{[m/dia] C_s}{[m]} 25 \text{ min}}{d \text{ sen} \theta} \frac{1}{24 \times 60 \text{ min}}$$

Combinando esta ecuación con (42), con $V_{sc} = 15 \text{ m/d}$, se obtiene:

$$\frac{C_s^{[m/dia]}}{\text{sen} \theta} \left[0.013 \frac{d^{[m]}}{v_{sv}^{[m^2/seg]}} \times \frac{1}{86400 \text{ seg}} + \frac{1}{V_{sc} \cos \theta} - \frac{25 \text{ min}}{d \times 1440} \right] < \frac{\text{sen} \theta}{\cos \theta} \quad (50)$$

$V_{sc} = 15 \text{ m/d}$

El término entre brackets es negativo, de modo que la anterior ecuación se cumple para cualquier valor de C_s que esté en el rango definido por la Tabla I, y no se generan nuevas restricciones para C_s . Entonces, el valor extremo superior de C_s es dado por (48):

$$\overline{C}_s = 180 \text{ m/d} \quad (51)$$

Observación 2. En esta sección se han desarrollado las ecuaciones que permiten calcular la curva de (l/d) como función de C_s , para $V_{sc} = 15 \text{ m/d}$, teniendo en cuenta los lineamientos en C_s , (l/d) , y t_p . Así, tenemos: i) el valor extremo inferior de C_s , dado por (47), donde C_s^a, C_s^b, C_s^c están dados en (43), (44), (46), y ii) el valor extremo superior de C_s , dado por (51). Con base en estos dos valores, se puede generar un vector para C_s , y calcular (l/d) a partir de (42) con $V_{sc} = 15 \text{ m/d}$. El resultado es la curva de (l/d) versus C_s para $V_{sc} = 15 \text{ m/d}$. Esta curva se calculará para un ejemplo que se mostrará en una sección posterior.

V. DESARROLLO DEL ESQUEMA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS VALORES PERMISIBLES DE C_s Y (L/D)

En esta sección se presenta el esquema para determinar las dimensiones de la unidad de sedimentación de alta tasa. Para esto se plantea el diagrama de bloques que indica el orden de cálculo, y se realiza la respectiva explicación con el fin de facilitar su utilización. El esquema le permite al

usuario: i) definir las variables C_s y (l/d) , de tal forma que se cumplan las restricciones, en C_s , (l/d) , t_p , V_{sc} y N_{Re} , mostradas en la Tabla I, y ii) calcular el volumen, largo y ancho del sedimentador, y el largo y ancho de cada placa de sedimentación. Se parte de los lineamientos para C_s , (l/d) , t_p , V_{sc} y N_{Re} , y se utilizan las ecuaciones mencionadas en la Observación 1 y la Observación 2, conforme se muestra en la Fig. 6.

Este diagrama se puede explicar en términos de los siguientes pasos:

- i. considerar los lineamientos para V_{sc} , C_s , t_p y (l/d) , dados en (20), (21), (22) y (23). Formar el vector de C_s , con base en el lineamiento (20), tomando valores desde la cota inferior hasta la cota superior.
- ii. calcular los vectores v_o y N_{Re} , para cada valor de C_s , mediante (19).
- iii. calcular el vector (l/d) para cada valor de C_s ; calcular el valor mínimo y el valor máximo de (l/d) mediante (26) y (30), y formar el vector.
- iv. calcular los vectores V_{sc} y N_{Re} , mediante (18) y (19).
- v. realizar la gráfica para V_{sc} . Esta gráfica tiene a C_s y (l/d) como variables independientes y a V_{sc} como variable dependiente. Además, incluye la curva para $V_{sc}=15$ m/d, que se obtiene de acuerdo con la Observación 2: el valor extremo inferior de C_s está dado por (47), donde C_s^a , C_s^b , C_s^c están dados en (43), (44), (46), mientras que el valor extremo superior de C_s está dado por (51). Con base en estos dos valores, se puede generar un vector para C_s , y calcular (l/d) a partir de (42) con $V_{sc}=15$ m/día.
- vi. realizar la gráfica para N_{Re} . Esta gráfica tiene a C_s y (l/d) como variables independientes y N_{Re} como variable dependiente.
- vii. a partir de las gráficas para V_{sc} y N_{Re} , verificar que los vectores V_{sc} y N_{Re} cumplen los lineamientos correspondientes.
- viii. definir el valor puntual de C_s .
- ix. definir el valor puntual de (l/d) y calcular longitud de la placa (l) mediante (34).
- x. calcular los valores de V_{sc} y t_p con base en los valores definidos de C_s y (l/d) , mediante (18), (19), (24), y verificar que se satisfacen los lineamientos para V_{sc} y t_p definidos en la Tabla I.
- xi. calcular el área (A) del tanque de sedimentación con base en el valor definido de C_s , mediante (33).

- xii. calcular la longitud de la placa (l) ; definir el porcentaje del volumen del tanque a tasa elevada; calcular la altura del tanque de sedimentación (H_s) mediante (39), calcular el número de placas mediante (12).

Este esquema fue desarrollado en el software Matlab, con el fin de facilitar los cálculos.

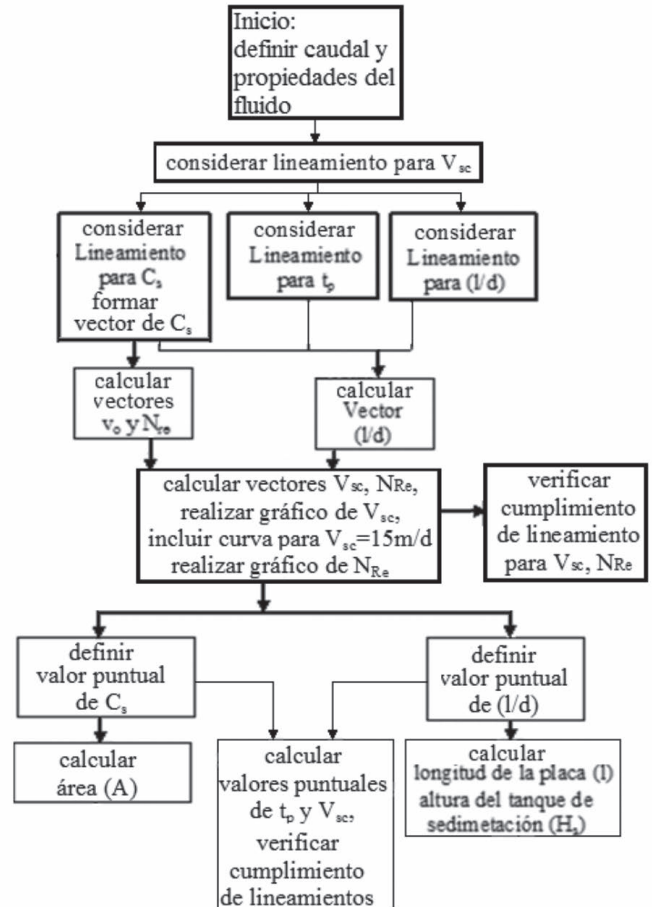


Fig. 6. Esquema general de la configuración para el dimensionamiento del sedimentador de alta tasa de flujo ascendente, basado en los lineamientos para C_s , t_p , (l/d) y V_{sc} . La definición de los valores puntuales de C_s y (l/d) utiliza dos gráficas: i) la primera tiene a C_s y (l/d) como variables independientes, y V_{sc} como variable dependiente, ii) la segunda gráfica tiene a C_s y (l/d) como variables independientes y a N_{Re} como variable dependiente. El cálculo de los valores puntuales de t_p y V_{sc} sigue con la verificación del cumplimiento de los lineamientos respectivos.

Observación 3. En esta sección se ha desarrollado el esquema que permite: i) definir los valores de C_s y (l/d) que impliquen el cumplimiento de los lineamientos en C_s , (l/d) , t_p , V_{sc} , ii) determinar las dimensiones de la unidad de sedimentación de alta tasa, es decir, el volumen, largo y ancho del sedimentador, y el largo y ancho de cada placa de sedimentación. El esquema se muestra en la Fig. 6, se basa en los lineamientos para C_s y t_p , (l/d) y V_{sc} , y utiliza las ecuaciones mencionadas en la Observación 1 y la Observación 2 para realizar los cálculos necesarios.

VI. EJEMPLO DE DISEÑO

En esta sección se muestra un ejemplo de aplicación del esquema de diseño para un sedimentador de alta tasa de flujo ascendente, con base en la metodología presentada en la sección anterior, de acuerdo a la Observación 3. Se toman las propiedades del agua a 20°C: viscosidad cinemática $\nu_{sv}=1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$. Se toma un caudal de diseño de $Q=1 \text{ l/min}$. En la Fig. 7 y Fig. 8 se muestra el resultado.

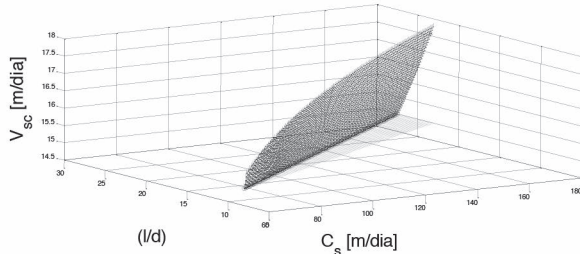


Fig. 7. Curva de velocidad crítica de asentamiento (V_{sc}), versus carga superficial (C_s) y razón entre longitud de las placas y distanciamiento entre placas (l/d), para el diseño del tanque de sedimentación de alta tasa. La superficie horizontal corresponde a $V_{sc}=15 \text{ m/día}$.

La Fig. 7 muestra la velocidad crítica de asentamiento (V_{sc}), para diferentes valores de carga superficial (C_s) y razón entre longitud de las placas y distanciamiento entre placas (l/d). De esta manera, la Fig. 7 indica los valores de C_s y (l/d) que cumplen los lineamientos para C_s , (l/d), t_p , V_{sc} y N_{Re} . Se seleccionan los siguientes valores:

$$\begin{aligned} C_s &= 180 \text{ m/d} \\ (l/d) &= 23.5 \end{aligned} \quad (52)$$

En la Fig. 7 se indica dicho punto. Se calcula t_p para verificar el cumplimiento del lineamiento dado en la Tabla I y (21), y se obtiene $t_p=8.14 \text{ min}$, de modo que se satisface el lineamiento. Para verificar, calculamos V_{sc} con los valores seleccionados de C_s y (l/d), y se obtiene $V_{sc}=17.6 \text{ m/d}$. Calculamos el área (A) con base en (33), usando el caudal de diseño, de modo que se obtiene $A=0.008 \text{ m}^2$. Calculamos la longitud de cada placa (l) con base en (34), usando el valor del espaciado entre placas (d) recomendado en la Tabla I, de modo que se obtiene: $l=1.18 \text{ m}$. Calculamos la altura del tanque de sedimentación (H_s) con base en (39), usando un porcentaje de $P=65\%$, de modo que se obtiene $H_s=1.57 \text{ m}$.

En el libro de Romero [4], se tiene que el largo del sedimentador es casi el doble del ancho. Por tanto, se va a tomar esta relación, de modo que:

$$W_s = (1/2)L_s \quad (53)$$

De esta expresión se obtiene la longitud del tanque:

$$\begin{aligned} A &= W_s L_s = 2W_s^2 \\ L_s &= \sqrt{2A}, W_s = \sqrt{\frac{A}{2}} \end{aligned} \quad (54)$$

El número de placas se calcula con base en (12), y se obtiene $N=2.3$ placas, lo que implica 3 placas.

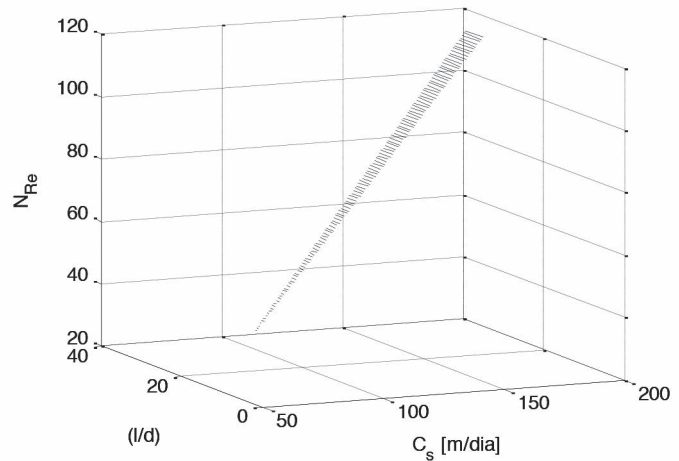


Fig. 8. Curva de número de Reynolds (N_{Re}) versus carga superficial (C_s) y razón entre longitud de las placas y distanciamiento entre placas (l/d), para el diseño del tanque de sedimentación de alta tasa.

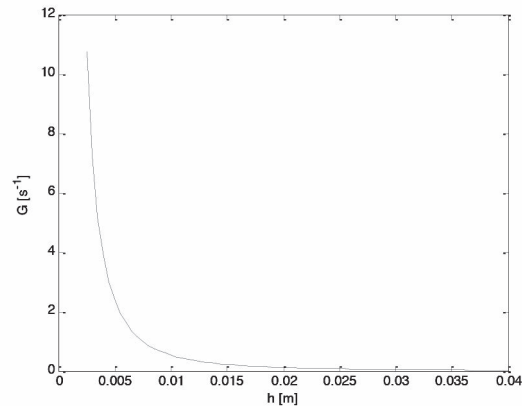


Fig. 9. Curva de gradiente de velocidad, para la selección de la altura (h) del canal de conducción del agua que sale de la unidad de floculación hacia la unidad de sedimentación. La altura seleccionada debe ser tal que el valor correspondiente de G sea menor al valor de G de la unidad de floculación, es decir 75 s^{-1} . La gráfica anterior muestra que el rango $h>0.005 \text{ m}$ cumple este criterio.

La Fig. 9 muestra que el rango $h>0.005 \text{ m}$ cumple con el criterio: $G < G_f = 75 \text{ s}^{-1}$.

En la Tabla II se muestra los resultados del dimensionamiento de sedimentadores de alta tasa, incluyendo el ejemplo realizado, una variación del ejemplo, y el ejemplo de la página 191 del libro de Romero [4].

TABLA II

RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO DE SEDIMENTADORES DE ALTA TASA. EL CASO C1 CORRESPONDE AL EJEMPLO REALIZADO, EL CASO C2 CORRESPONDE A UNA VARIACIÓN DE CASO C1, Y EL CASO C3 CORRESPONDE AL EJEMPLO MOSTRADO EN LA PÁGINA 191 DEL LIBRO DE ROMERO [4].

	Caso C ₁ : $Q=1$ litro/min, $d=0.05$ m, $e=0.005$ m	Caso C ₂ : $Q=1$ litro/min, $d=0.05$ m, $e=0.005$ m	Caso C ₃ : $Q=22$ litro/seg = 1320 litro/min, $d=0.06$ m, $e=0.01$ m
Carga superficial (C_s) [m/dia]	180 m/d	80 m/d	162 m/d
Razón entre largo de las placas y distanciamiento entre placas (l/d)	23.5	11	20
Tiempo de retención en placas (t_p) [min]	8.14 min	8.57 min	9.2 min
Velocidad crítica de asentamiento (V_{sc}) [m/dia]	17.6 m/d	15.3 m/d	18.5 m/d
Largo de las placas (l) [m]	1.18 m	0.55 m	1.2 m
A [m ²]	0.008 m ²	0.018 m ²	55.6 m ²
Número de placas (N)	2.30 =3	3.02=4	55

En la Fig. 10 se muestra la gráfica de V_{sc} para el caso del ejemplo de la página 191 del libro de Romero [4]. El punto blanco indica el valor puntual tomado de (l/d) y C_s .

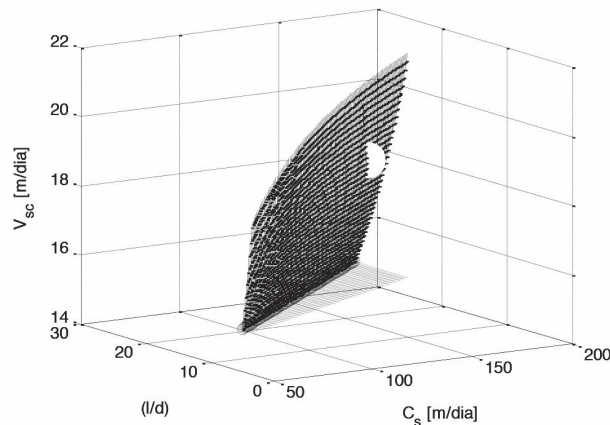


Fig. 10. Curva de velocidad crítica de asentamiento (V_{sc}), versus carga superficial (C_s) y razón entre longitud de las placas y distanciamiento entre placas (l/d), para el diseño del tanque de sedimentación de alta tasa, para el caso del ejemplo de la página 191 de [4]. La superficie horizontal corresponde a $V_{sc}=15$ m/dia.

VII. CONCLUSIONES

El esquema desarrollado proporciona un orden claro de los cálculos que llevan al cumplimiento de los lineamientos para el dimensionamiento de la unidad de sedimentación de alta tasa. Además, permite calcular los límites permisibles de las variables C_s y (l/d) definidos por el usuario, sin utilizar método de ensayo y error.

El desarrollo en computador del algoritmo planteado es sencillo, es decir, no requiere utilización de software altamente especializado, ni herramientas de software especiales, ni conocimientos avanzados de programación. De hecho es posible desarrollar el algoritmo en Matlab sin utilizar las herramientas especializadas del mismo. Además, es posible utilizar vectores para los siguientes parámetros: la velocidad promedio del fluido en el elemento de sedimentación de alta tasa, el número de Reynolds y la razón entre longitud y distanciamiento entre placas. Esta utilización de vectores hace aún más sencillo el desarrollo del algoritmo. De hecho, el algoritmo involucra un solo ciclo for. Los gráficos de la velocidad crítica de asentamiento y de número de Reynolds permiten un análisis de la influencia de la carga superficial y la razón entre longitud y distanciamiento en placas sobre los valores del número de Reynolds y la velocidad crítica de asentamiento.

El ejemplo realizado muestra que el esquema desarrollado es útil y de aplicación práctica, para seleccionar los valores de carga superficial y razón entre longitud y distanciamiento en placas, que implican el cumplimiento de lineamientos definidos por el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –RAS de Colombia y lineamientos de las referencias pertinentes.

Como muestran las gráficas del ejemplo, el cálculo analítico de los límites inferior y superior de los rangos permisibles de los parámetros carga superficial y razón entre longitud y distanciamiento en placas, para un valor de V_{sc} de 15m/d, tiene la ventaja de que es rápido, preciso y complementa la gráfica de V_{sc} .

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por el Centro de Investigación, Proyección y Desarrollo de la Universidad Católica de Manizales, bajo el proyecto ‘Agua termal: caracterización y aplicaciones industriales’, cuyo referenciado es RIN068.

REFERENCIAS

- [1] D. Robescu, C. Mandis, y D. Robescu. “Design lamellar secondary settling tank using numerical modeling,” *UPB Sci. Bull. Series D*, vol. 72, no. 04, pp. 211-216, 2010.
- [2] C. Desjardins, B. Koudjonou, y R. Desjardins. “Laboratory study of ballasted flocculation,” *Wat. Res.*, vol. 36, no. 03, pp. 744-754, 2002.
- [3] JD. Henao, y GC. Isaza, *Diseño y Construcción de una Unidad de Banco para Coagulación, Floculación y Sedimentación*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2004.

- [4] JA. Romero, *Purificación del Agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2006.
- [5] J. Arboleda, *Teoría y Práctica de la Purificación del Agua*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1992.
- [6] JA. Pérez, *Manual de Potabilización del Agua*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 1997.
- [7] A. Hernandez, *Depuración de Aguas Residuales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1992.
- [8] G. Rivas, *Tratamiento de Aguas Residuales*. Caracas: Ediciones Vega, 1978.
- [9] A. Demir. "Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks," *Wat. Res.*, vol. 29, no. 02, pp. 611-616, 1995.
- [10] O. Lekang, AM. Bomo, y I. Svendsen. "Biological lamella sedimentation used for wastewater treatment," *Aquacultural Eng.*, vol. 24, no. 02, pp. 115-127, Feb. 2001
- [11] J. Gasperi, V. Rocher, S. Gilbert, S. Azimi, y G. Chebbo. "Occurrence and removal of priority pollutants by lamella clarification and biofiltration," *Wat. Res.*, vol. 44, no. 10, pp. 3065-3076, 2010.
- [12] J. Wood, S. Dhanvantari, M. Yang, Q. Rochfort, P. Chessie, J. Marsalek, S. Kok, y P. Seto. "Feasibility of stormwater treatment by conventional and lamellar settling with and without polymeric flocculant addition," *Wat. Qual. Res. J. Canada*, vol. 39, no. 04, pp. 406-416, 2004.
- [13] R. Braga y S. Conceicao. "Mathematical modeling and analysis of the flocculation process in chambers in series," *Bioprocess. Biosyst. Eng.*, vol. 36, no.03, pp. 357-363, 2013.
- [14] EP. Tangerino, "Floculador de manta de lodo asociado a decantador laminar en tratamiento de agua," presentado en el Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDS), Lima, Peru, Nov. 01-05, 1998.



María Fernanda Ortiz obtuvo el título de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales en el año de 1999, el título de Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental en el año 2001 de la Universidad del Valle.

Tiene experiencia en el sector del Agua Potable y Saneamiento Básico y como docente e investigadora. Desde el 2010 hasta la actualidad trabaja en la Universidad Católica de Manizales. Sus intereses de investigación están enfocados a los tratamientos avanzados en aguas residuales y en saneamiento básico.



Alejandro Rincón obtuvo el título de ingeniería química, en el 2006, el título de maestría en ingeniería-automatización industrial, en el 2007, y el título de doctorado en ingeniería –línea automática, en el 2010, de la universidad nacional de colombia, manizales, colombia. Su area principal de estudio es la teoría de control adaptativo.

Desde el 2011 hasta el el 2013 ha trabajado en la universidad católica de manizales, en manizales. Sus intereses de investigación incluyen análisis dinámico aplicado a reactores biológicos, teoría de control adaptativo, y tratamiento de aguas residuales por coagulación/floculación/sedimentación.



Oscar F. Herrera obtuvo el título de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales en el año 2007. Desde el 2010 hasta febrero de 2014 trabajó en la Universidad Católica de Manizales, en Manizales, como profesor e investigador. Desde Marzo de 2014 realiza estudios de posgrado en Ingeniería Ambiental en la Universidad Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

Sus intereses de investigación están en el área de la ingeniería ambiental y sanitaria, enfocados en tratamientos avanzados en aguas residuales, saneamiento básico y obtención de bioenergía.