

Torre de sedimentación para cálculo y análisis de partículas floculantes en suspensión.¹

Sedimentation tower for calculation and analysis of flocculating particles in suspension

Torre de sedimentação para cálculo e análise de partículas floculantes em suspensão

A. F. Ballesteros-Escobar, L. X. Moreno-Portela y F. Santamaria-Álzate

Recibido: – Aceptado:

Resumen- A lo largo de este artículo se presentará una propuesta basada en la ejecución de pruebas de laboratorio orientadas al estudio de agua con sedimentos de partículas floculantes. Para ello, se realizaron mediciones a diferentes intervalos de tiempo y con diversas dosis de coagulantes y bentonita, utilizando una torre de sedimentación de acrílico de 1.70 metros de altura, equipada con siete puntos de medición. Esta configuración permitió simular el comportamiento de las partículas floculantes, lo que facilitó el desarrollo de una ecuación teórica para evaluar la eficiencia de sedimentación del prototipo.

Además, se analizó el efecto combinado de estos factores, el cual podría resultar en una disminución de la velocidad de sedimentación y en un incremento del tiempo de retención, lo que influiría directamente en los datos obtenidos durante las pruebas de laboratorio.

Palabras clave- Sedimentación, turbiedad, partículas floculantes, ecuación cuadrática y eficiencia de sedimentación.

Abstract- This article presents a proposal based on laboratory tests aimed at studying water with flocculating particle sediments. To this end, measurements were taken at different time intervals and with various doses of coagulants and bentonite, using an acrylic sedimentation column of 1.70 meters in height, equipped with seven measurement points. This setup allowed for the simulation of the behavior of the flocculating particles, which facilitated the development of a theoretical equation to assess the sedimentation efficiency of the prototype.

Additionally, the combined effect of these factors was analyzed, which could result in a decrease in sedimentation velocity and an increase in retention time, directly influencing the data obtained during the laboratory tests.

Keywords- Sedimentation, Turbidity, Flocculant Particles, Quadratic equation and Sedimentation efficiency

Resumo- Ao longo deste artigo será apresentada uma proposta baseada na execução de ensaios laboratoriais voltados ao estudo de águas com sedimentos particulados floculantes. Para isso, foram feitas medições em diferentes intervalos de tempo e com diversas doses de coagulantes e bentonita, utilizando uma torre de sedimentação de Acrílico com 1,70 metros de altura, equipado com sete pontos de medição. Essa configuração nos permitiu simular o comportamento das partículas floculantes, que facilitou o desenvolvimento de uma equação teórica para avaliar a eficiência da sedimentação do protótipo.

Além disso, foi analisado o efeito combinado desses fatores, o que poderia resultar em uma diminuição da taxa de sedimentação e aumento do tempo de sedimentação retenção, o que influenciaria diretamente nos dados obtidos durante os testes de laboratório.

Palavras-chave— Sedimentação, turbidez, partículas floculantes, equação quadrática e eficiência de sedimentação

¹Producto apoyado por la Universidad Piloto de Colombia a través del pregrado de Ingeniería Civil.

A. F. Ballesteros-Escobar, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia, email: andres-ballesteros@upc.edu.co.

L. X. Moreno-Portela, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia, email: laury-moreno@upc.edu.co.

F. Santamaria-Álzate Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia, email: felipe-santamaria@upc.edu.co.

Como citar este artículo: Ballesteros-Escobar, A. F., Moreno-Portela L. X., y Santamaria-Álzate, F. Torre de sedimentación para cálculo y análisis de partículas floculantes en suspensión., Entre Ciencia e Ingeniería, vol. xx, no. xx, pp. x-xx, enero-junio año. DOI: <https://doi.org/xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx>.



I. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es fundamental para la vida, el desarrollo económico y la estabilidad ambiental. Es esencial para el consumo humano, la producción de alimentos, la generación de energía, la industria y el saneamiento básico [1]. Además, desempeña un papel crucial en la regulación de los ecosistemas, manteniendo la biodiversidad y asegurando el equilibrio de los ciclos naturales. La disponibilidad y calidad del agua son determinantes para la salud pública y la calidad de vida, especialmente en un contexto de cambio climático que aumenta su vulnerabilidad. Proteger y gestionar de manera sostenible este recurso es clave para garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras [2].

No obstante, la contaminación del agua en Colombia [3], y particularmente en Bogotá, es un problema grave causado por vertimientos industriales, domésticos y agrícolas, la minería, el mal manejo de residuos sólidos y el uso excesivo de químicos en la agricultura [4], [5]. Esto afecta principalmente al río Bogotá, uno de los más contaminados del país, así como a quebradas y humedales urbanos, impactando la biodiversidad, la salud pública y la economía [6], [7]. Aunque existen iniciativas como la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y campañas de educación ambiental, persisten desafíos relacionados con la infraestructura insuficiente, el cumplimiento de normativas y la conciencia ciudadana, lo que requiere esfuerzos coordinados para su solución. Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, con la presente investigación se pretende crear una herramienta efectiva para la eliminación de materiales como arena, plásticos y sedimentos de tierra, que, aunque no potabilizará el agua, permitirá su uso en otras actividades de saneamiento básico, generación de energía entre otras.

Para lograr una correcta limpieza del agua, se han utilizado otras sustancias como desinfectantes, cloro libre, cloro combinado, Dióxido de Cloro, Ozono y Luz Ultravioleta. Al respecto, las herramientas más destacadas son las torres de sedimentación que son estructuras que se utiliza para realizar ensayos de laboratorio sobre el proceso de sedimentación, la cual se refiere al proceso que separa los sólidos de un líquido, basándose en la diferencia de densidades entre sus componentes [8], [9].

En este sentido, en el presente estudio tuvo como objetivo diseñar y desarrollar una ecuación de eficiencia que permita caracterizar el comportamiento óptimo de la torre de sedimentación de partículas floculante, contribuyendo al diseño de sistemas más eficientes para el tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua. Para esto, inicialmente, se realizó una revisión teórica y un análisis del estado del arte sobre sedimentación, para comprender las técnicas y procedimientos aplicados en la remoción de partículas del agua. A continuación, se realizaron cálculos teóricos y prácticos para la construcción del prototipo, evaluando los materiales a emplear y seleccionando la muestra problemática para los ensayos.

Una vez construido el prototipo, se llevaron a cabo los ensayos pertinentes, durante los cuales se recolectaron y

analizaron datos relevantes, como el porcentaje de turbidez en cada punto de muestreo, las velocidades de sedimentación y los tiempos de retención.

Se hace especial énfasis en que, se llevó a cabo la elaboración de una serie de gráficos que permitieron observar el comportamiento de la remoción de partículas, con el fin de determinar si se alcanza un porcentaje óptimo de eliminación en una muestra problemática. Esta muestra consiste en arcilla tipo bentonita, la cual, al dispersarse en agua, genera un fenómeno de turbidez natural.

II. METODOLOGÍA

A. Revisión teórica y análisis del estado del arte.

Para una comprensión de los procesos de sedimentación, se consultó el tipo de material y coagulante que se pueden usar para observar en laboratorio dicho proceso. Información que de manera experimental se conoce. Por esta razón, se decidió utilizar el coagulante Decantador Clarificador HICLOR 1000 CC [10], el cual, a diferencia del sulfato de aluminio (el más comúnmente empleado), está diseñado para su uso en piscinas y procesos de limpieza asociados. Esto no solo responde a su efectividad en estas aplicaciones, sino que también busca ofrecer una alternativa al uso tradicional del sulfato de aluminio [11].

Por otro lado, el material seleccionado para sedimentar es la Bentonita, ya que presenta un comportamiento similar al de los sedimentos encontrados en entornos naturales. La elección de la bentonita se basa en sus características, que son muy similares a las de la arena y la arcilla, materiales comúnmente involucrados en los procesos de filtración en situaciones reales [12].

B. Construcción de la torre de sedimentación.

Las torres de sedimentación son estructuras verticales utilizadas comúnmente en laboratorios para estudiar y simular el proceso de sedimentación, un fenómeno físico que separa sólidos suspendidos en un líquido [13], [14]. Este proceso se basa en la diferencia de densidades entre los componentes, donde las partículas sólidas, debido a la fuerza gravitacional, tienden a asentarse en el fondo del recipiente mientras el líquido permanece en la parte superior. Las torres están diseñadas para observar y medir el comportamiento de las partículas en suspensión, evaluar la eficiencia de coagulantes o floculantes, y estudiar parámetros relacionados con la dinámica de sedimentación en condiciones controladas [15].

Estas estructuras suelen estar fabricadas de materiales transparentes, como vidrio o acrílico, lo que facilita la observación del movimiento de partículas. Además, pueden incluir dispositivos para introducir coagulantes, sistemas de agitación, y puertos de muestreo a diferentes alturas para analizar la distribución de partículas durante el proceso [16].

No obstante, considerando que el objetivo es encontrar una ecuación de funcionamiento óptimo, fue necesario realizar algunas modificaciones en las medidas y materiales inicialmente propuestos, tomando como referencia la torre de sedimentación descrita en el estudio de Manrique y Gómez

(2016) [17]. Por lo tanto, en el desarrollo de la construcción de la torre de sedimentación se consideraron aspectos como: i) resistencia de los materiales, ii) cantidad de materiales, iii) disponibilidad de los materiales y iv) Funcionamiento adecuando los parámetros que se presentan a continuación (Tabla 1).

TABLA I
ESPECIFICACIONES DE LA TORRE DE SEDIMENTACIÓN PARA ESTE ESTUDIO

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
Altura	172 centímetros
Ancho	15 cm interno, 18 cm externo.
Número de secciones	4 secciones de acrílico, cada una con una altura de 43 centímetros.
Número de válvulas de paso	8 (7 en PVC y 1 en bronce, de media pulgada cada una).
Número de adaptadores macho	8 para la unión de las válvulas (de media pulgada).
Número de tornillos Bristol	27 de 1/8 de pulgada, junto con sus respectivas tuercas y arandelas.
Número de bridas de caucho	4 para las respectivas secciones.
Número de empaques	8 para la unión entre los adaptadores y las válvulas.
Manguera	5 metros para el paso de aire desde el compresor hasta la entrada de la válvula de aire.
Válvula de paso de aire	de cobre a 5 centímetros de la base.

C. Métodos

1) Cálculo de la muestra problema.

Inicialmente se calculó la dosificación adecuada de la muestra problema (bentonita), la cual debía satisfacer el parámetro de turbiedad de aproximadamente 15 NTU. Para ello, se realizaron tres (3) pruebas con diferentes concentraciones de Bentonita y a través de la titulación de la muestra se pudo identificar los valores de alcalinidad y acidez que apoyaran la elección del gramaje (Fig. 1).



Fig. 1. Proceso de medición de la muestra problema.

Respecto a lo anterior, se elige 0,12 gramos de bentónica como gramaje adecuado, ya que la turbiedad presentada (NTU) es la más cercana a la recomendada (15 NTU). Asimismo, los valores de alcalinidad y acidez fueron cercanos a 0,57 lo que indica que es adecuado [18] (Tabla 2).

TABLA II
PRUEBAS PARA IDENTIFICAR EL GRAMAJE CORRECTO DE BENTÓNITA.

	Agua (ml)	Bentonita (gr)	Alcalinidad (ml)	Acidez (ml)	Turbiedad (NTU)
Muestra 1	1000	1,0	0,92	0,62	228
Muestra 2	1000	0,5	0,62	0,58	134
Muestra 3	1000	0,12	0,57	0,52	16,42

2) “Test de Jarras”

A continuación, se procedió a realizar a realizar el *Test de Jarras*, el cual consiste en generar una interacción entre los diferentes volúmenes de coagulantes en 1 Litro de agua. Posteriormente después de un determinado tiempo (40 min), verificar el comportamiento de las partículas floculantes en conjunto con el coagulante, es decir identifica en cual volumen hay una mayor sedimentación. De esta forma, se consideraron los volúmenes 10 ml, 20 ml, 30 ml, 40 ml y 50 ml respectivamente y los 0,12 g de Bentonita como muestra problema (Fig. 2). Obteniendo que, hubo mayor sedimentación en 40 ml de coagulante.

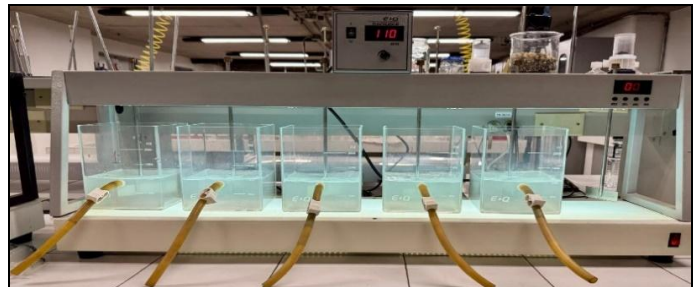


Fig. 2. Test de Jarras.

3) Cálculo de la cantidad necesario de material.

A continuación, con la información obtenida de la bentónica y el coagulante necesario, a través *una regla de tres directa* se calculó la cantidad necesaria de bentónica para la torre de sedimentación, teniendo en cuenta que se necesitan 40 ml de coagulante para mejorar el proceso de sedimentación (Tabla 3).

TABLA III
DOSIFICACIONES REQUERIDAS PARA LA TORRE DE SEDIMENTACIÓN.

	Agua (L)	Bentonita (gr)	Coagulante (ml)
Ensayo de laboratorio	1,0	0,12	40
Torre de sedimentación	27,5	3,3	1100

4) Montaje de la torre de sedimentación.

Una vez realizado el montaje y preparado el sistema para su

funcionamiento (Fig. 3), se encendió el flujo de aire a presión, el cual comenzó a mezclar la bentonita y el coagulante en el agua. Este procedimiento se llevó a cabo en dos etapas: primero, se mantuvo el aire a una presión alta durante un minuto para asegurar la completa dispersión del coagulante en el agua; posteriormente, se ajustó a un flujo constante durante 10 minutos, con el objetivo de lograr la mayor homogeneidad posible en la mezcla antes de proceder con los ensayos en el laboratorio.



Fig. 3. Montaje torre de sedimentación.

Tras completar la mezcla de los materiales, se detuvo el paso del aire y se inició la toma de muestras en diferentes intervalos de tiempo desde cada una de las siete (7) salidas de la torre de sedimentación. Se aclara que, la turbidez del agua se midió con instrumento llamado turbidímetro, que mide la cantidad de luz que se dispersa al pasar por una muestra de agua. Esto debido a las partículas que pueden contener.

D. Ensayos.

Se realizaron dos (2) ensayos debido al tiempo requerido para completar todas las actividades en el laboratorio. Además, dado que el experimento tenía un carácter exploratorio, se consideró que dos ensayos eran suficientes para realizar un análisis preliminar de la problemática planteada. Cuando se hace referencia al "Ensayo 1", se incluyen todos los datos recopilados y su respectivo análisis provenientes de la toma de muestra número 1. De manera similar, el "Ensayo 2" abarca los datos y análisis correspondientes a la toma de muestra número 2.

Para cada uno de los ensayos se realizó la recolección de datos a través de la herramienta de Microsoft Excel y se generaron las siguientes gráficas y tablas de resultados:

Gráfico de líneas para evidenciar el comportamiento de las partículas floculantes y su asentamiento. En donde, el eje horizontal (X) representa el tiempo y El eje vertical (Y) muestra los valores de turbidez. Cada línea representa una serie diferente, correspondiente a distintas alturas (h) en centímetros, como se indica en la leyenda.

Tabla de rangos de eficiencia, en donde se hace comparativo en términos de porcentaje de la turbiedad inicial general con respecto a la turbiedad en cada punto con el paso del tiempo, logrando identificar ocho (8) rangos (Fig. 4). Esta división se plantea de manera que se logre evidenciar que el crecimiento de la eficiencia no era de manera lineal si no de manera exponencial.

DOI: <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.41.2026>

Color rojo	0- 0,001
Color amarillo	0,001- 0,01
Color verde claro	0,01-0,08
Color azul oscuro	0,08-0,2
Color Gris	0,2-0,25
Color rosado	0,25- 0,35
Color Azul claro	0,35-0,45
Color verde oscuro	0,45-0,52

Fig. 4. Rangos de eficiencia.

Gráfica de Eficiencia del Prototipo. La gráfica fue elaborada utilizando el programa *AUTOCAD*, con el propósito de representar de manera más clara los rangos de eficiencia alcanzados. El término "eficiencia" se emplea para describir cómo se reduce la turbiedad (NTU) del agua durante el proceso. La turbiedad se refiere a la cantidad de luz que se dispersa al atravesar una muestra de agua, lo que está directamente relacionado con la presencia de partículas en suspensión.

Inicialmente, el agua presentaba un aspecto más oscuro debido a su alta turbiedad, pero al finalizar el proceso, esta se observaba más clara. Por esta razón, se asignan porcentajes de eficiencia que reflejan la mejora en la calidad del agua en términos de reducción de turbiedad. Este enfoque permite evaluar de manera cuantitativa la efectividad del prototipo.

Grafica rangos de eficiencia. La imagen muestra un diagrama de dispersión con puntos distribuidos en un sistema de ejes coordenados, representando los rangos de eficiencia asociados a las diferentes coloraciones previamente mencionadas. La curva que atraviesa el gráfico ilustra el comportamiento del sistema, específicamente el funcionamiento de la torre de sedimentación donde la remoción del material, en este caso la bentonita, se mantiene más constante.

III.RESULTADOS

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, destacando las mediciones, observaciones y análisis correspondientes para evaluar el comportamiento del sistema y su eficacia en las condiciones experimentales establecidas.

1) Ensayo 1.

A continuación, se presentan los valores de turbiedad (NTU) obtenidos en cada una de las muestras (Tabla 4). Dado que el valor inicial de turbiedad es de 16,42 NTU, se espera que los valores registrados disminuyan progresivamente, evidenciando la sedimentación del material gracias a la acción del coagulante. Este comportamiento se refleja en la reducción de la turbiedad en cada punto de medición. Por ejemplo, al cabo de 45 minutos (min) y a una altura (h) de 122 centímetros (cm), la turbiedad había disminuido notablemente.

Este patrón indica que, a medida que transcurre el tiempo, la turbiedad disminuye de manera consistente, lo que confirma

la eficacia del proceso de sedimentación, que también se puede evidenciar en la gráfica lineal respectiva (Fig. 5).

TABLA IV
TURBIEDAD ENSAYO 1.

Tiempo (min)	h = 144	h = 122	h = 100	h = 78	h = 56	h = 34	h = 12
0,5	16,35	16,38	16,39	16,40	16,41	16,42	16,42
5	15,26	15,71	15,99	16,02	16,39	16,42	16,42
10	14,99	15,61	15,89	15,92	16,38	16,37	16,41
20	13,97	14,71	15,17	15,89	16,22	16,32	16,41
30	12,90	13,91	14,22	15,71	16,10	16,21	16,40
45	10,71	12,93	13,67	15,62	16,02	16,13	16,40
60	9,23	10,98	13,04	14,10	15,80	16,10	16,37
75	8,23	10,53	11,60	12,62	13,02	13,15	14,17
90	8,11	10,28	10,34	12,54	12,59	13,07	13,17
120	8,04	10,15	10,27	12,40	12,57	13,02	13,10

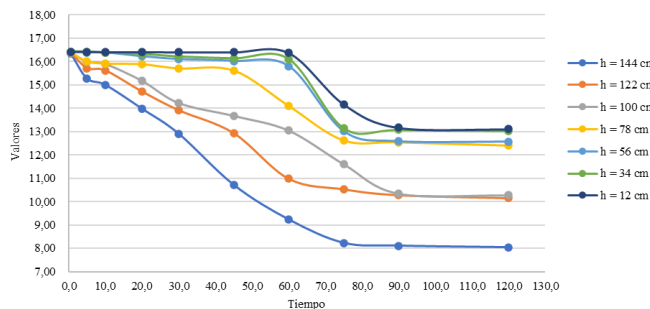


Fig. 5. Turbiedad Ensayo 1.

En la tabla de *porcentajes de remoción*, se realizó un análisis comparativo que refleja, en términos porcentuales, la relación entre la turbiedad inicial general y la turbiedad registrada en cada punto a lo largo del tiempo (Tabla 5). Posteriormente, se elaboró una *tabla de rangos de eficiencia*, en la cual se efectuó un análisis adicional para comparar los porcentajes de remoción en función del transcurso del tiempo (Tabla 6).

TABLA V
PORCENTAJE (%) DE REMOCIÓN ENSAYO 1.

Tiempo (min)	h = 144	h = 122	h = 100	h = 78	h = 56	h = 34	h = 12
0,5	0,43%	0,24%	0,18%	0,12%	0,06%	0,00%	0,00%
5	7,06%	4,32%	2,62%	2,44%	0,18%	0,00%	0,00%
10	8,71%	4,93%	3,23%	3,05%	0,24%	0,30%	0,06%
20	14,92%	10,41%	7,61%	3,23%	1,22%	0,61%	0,06%
30	21,44%	15,29%	13,40%	4,32%	1,95%	1,28%	0,12%
45	34,77%	21,25%	16,75%	4,87%	2,44%	1,77%	0,12%
60	43,79%	33,13%	20,58%	14,13%	3,78%	1,95%	0,30%
75	49,88%	35,87%	29,35%	23,14%	20,71%	19,91%	13,70%
90	50,61%	37,39%	37,03%	23,63%	23,33%	20,40%	19,79%
120	51,04%	38,19%	37,45%	24,48%	23,45%	20,71%	20,22%

TABLA VI
RANGOS DE EFICIENCIA (%) ENSAYO 1.

Tiempo (min)	0,5	5	10	20	30	45	60	75	90	120
h = 144	0,43	7,06	8,71	14,92	21,44	34,77	43,79	49,88	50,61	51,04
h = 122	0,24	4,32	4,93	10,41	15,29	21,25	33,13	35,87	37,39	38,19
h = 100	0,18	2,62	3,23	7,61	13,40	16,75	20,58	29,35	37,03	37,45
h = 78	0,12	2,44	3,05	3,23	4,32	4,87	14,13	23,14	23,63	24,48
h = 56	0,06	0,18	0,24	1,22	1,95	2,44	3,78	20,71	23,33	23,45
h = 34	0,00	0,00	0,30	0,61	1,28	1,95	19,91	20,40	20,71	20,71
h = 12	0,00	0,00	0,06	0,06	0,12	0,12	0,30	13,70	19,79	20,22

A continuación, a través de la *Gráfica de Eficiencia del Prototipo*, se puede observar de manera más clara que en las primeras alturas y los primeros intervalos de tiempo, la

eficiencia es relativamente baja. Sin embargo, a partir del minuto 60 y hasta alcanzar una altura de 144 cm, se evidencia un comportamiento constante, con valores de eficiencia que oscilan entre el 8 % y el 20 %, lo que indica que este es el rango más estable del prototipo. Finalmente, en el último intervalo de tiempo, se aprecia que la torre alcanzó aproximadamente un 50 % de eficiencia (Fig. 6a).

En la *gráfica de rangos de eficiencia*, se aísla el rango donde el prototipo presentó mayor constancia a lo largo del laboratorio, que corresponde a valores de eficiencia entre el 8 % y el 20 % (Fig. 6b).

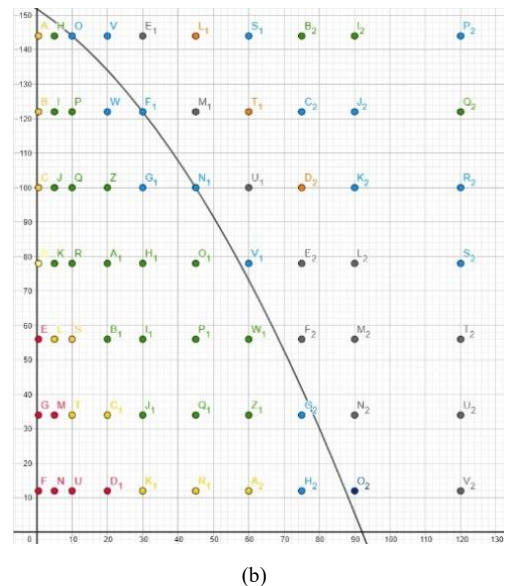
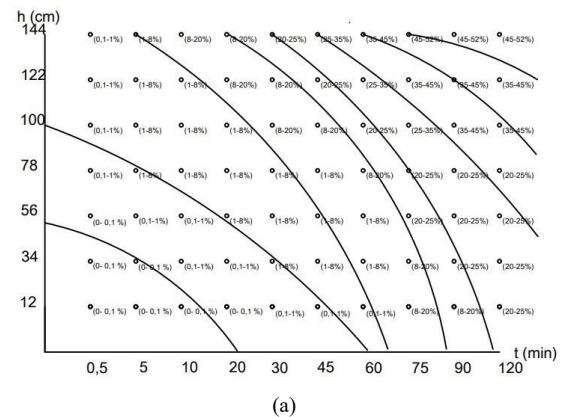


Fig. 6. (a) Eficiencia prototipo Ensayo 1. (b) Rangos de eficiencia Ensayo 1.

2) Ensayo 2

El procedimiento descrito anteriormente se replicó siguiendo las mismas metodologías, con el propósito de reforzar la acción del coagulante y la Bentonita Este enfoque permitió obtener resultados consistentes y comparables con los reportados previamente, confirmando la eficacia y coherencia de lo implementado. Se presenta a continuación:

- Valores de turbiedad (NTU) obtenidos en cada una de las muestras (Tabla 7; Fig. 7).
- Porcentajes de remoción (Tabla 8).
- Rangos de eficiencia (Tabla 9).
- Gráfica de Eficiencia del Prototipo (Fig. 8a).
- Gráfica de rangos de eficiencia (Fig. 8b).

TABLA VII
TURBIEDAD ENSAYO 2.

Tiempo (min)	h = 144	h = 122	h = 100	h = 78	h = 56	h = 34	h = 12
0,5	16,32	16,35	16,38	16,40	16,40	16,41	16,42
5	15,40	15,75	15,95	16,11	16,39	16,40	16,41
10	15,15	15,49	15,93	16,07	16,20	16,37	16,41
20	14,88	15,08	15,67	15,96	16,12	16,28	16,38
30	14,11	14,48	15,45	15,87	16,03	16,24	16,33
45	12,58	13,54	14,10	14,28	15,04	15,48	16,14
60	10,47	11,12	12,87	13,25	13,63	14,41	15,16
75	9,70	10,64	10,94	11,35	12,24	12,85	13,05
90	8,25	9,65	10,26	10,67	11,35	12,36	13,05
120	8,06	9,47	10,14	10,57	11,54	11,88	12,78

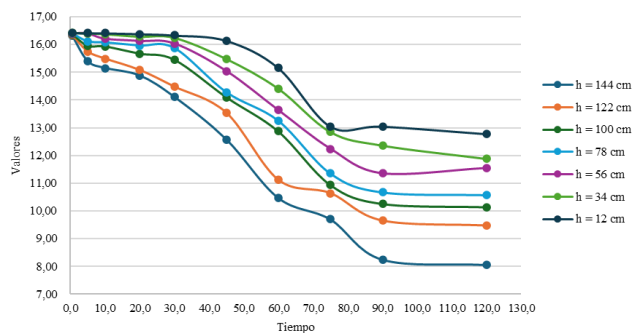


Fig. 7. Turbiedad Ensayo 2.

TABLA VIII
PORCENTAJE (%) DE REMOCIÓN ENSAYO 2.

Tiempo (min)	h = 144	h = 122	h = 100	h = 78	h = 56	h = 34	h = 12
0,5	0,61%	0,43%	0,24%	0,12%	0,12%	0,06%	0,00%
5	6,21%	4,08%	2,86%	1,89%	0,18%	0,12%	0,06%
10	7,73%	5,66%	2,98%	2,13%	1,34%	0,30%	0,06%
20	9,38%	8,16%	4,57%	2,80%	1,83%	0,85%	0,24%
30	14,07%	11,81%	5,91%	3,35%	2,38%	1,10%	0,55%
45	23,39%	17,54%	14,13%	13,03%	8,40%	5,72%	1,71%
60	36,24%	32,28%	21,62%	19,31%	16,99%	12,24%	7,67%
75	40,93%	35,20%	33,37%	30,88%	25,46%	21,74%	20,52%
90	49,76%	41,23%	37,52%	35,02%	30,88%	24,73%	20,52%
120	50,91%	42,33%	38,25%	35,63%	29,72%	27,65%	22,17%

TABLA IX
RANGOS DE EFICIENCIA (%) ENSAYO 2.

Tiempo (min)	0,5	5	10	20	30	45	60	75	90	120
h = 144	0,61	6,21	7,73	9,38	14,07	23,39	36,24	40,93	49,76	50,91
h = 122	0,43	4,08	5,66	8,16	11,81	17,54	32,28	35,20	41,23	42,33
h = 100	0,24	2,86	2,98	4,57	5,91	14,13	21,62	33,37	37,52	38,25
h = 78	0,12	1,89	2,13	2,80	3,35	13,03	19,31	30,88	35,02	35,63
h = 56	0,12	0,18	1,34	1,83	2,38	8,40	16,99	25,46	30,88	29,72
h = 34	0,06	0,12	0,30	0,85	1,10	5,72	12,24	21,74	24,73	27,65
h = 12	0,00	0,06	0,06	0,24	0,55	1,71	7,67	20,52	20,52	22,17

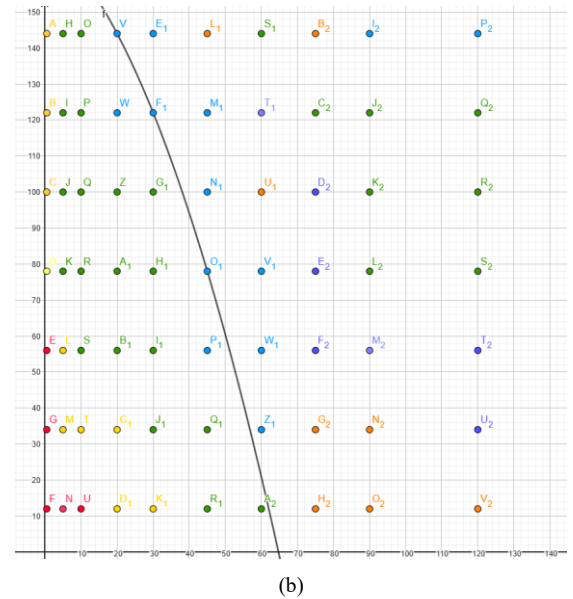
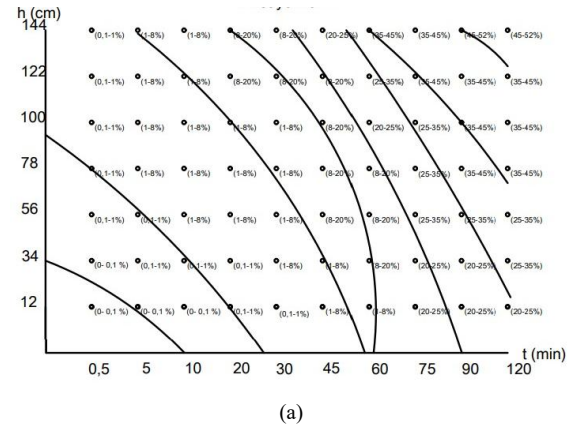


Fig. 8. (a) Eficiencia prototipo Ensayo 2. (b) Rangos de eficiencia Ensayo 2.

Durante la práctica, se observó una clara diferenciación en las zonas de la torre de sedimentación. En la parte superior, se evidenció una mejora en la clarificación del agua, atribuida a la alta velocidad de sedimentación del material. En la zona intermedia, la velocidad de sedimentación disminuyó, lo que resultó en un mayor acumulamiento de material en proceso de sedimentación. Finalmente, en la parte inferior, se acumuló una cantidad significativa de residuos debido a la sedimentación completa de las partículas.

Además, al analizar los datos obtenidos de los dos ensayos previos, se observó una disminución progresiva de la turbidez de la muestra a lo largo del tiempo y en diferentes alturas de la torre de sedimentación. Esto se refleja en las Tablas 3 y 6, donde se muestra claramente que cuanto más cercano es el valor de turbidez a 0, menor es la concentración de partículas en suspensión. Según la normativa vigente, el valor ideal de turbidez debería ser inferior a 15 NTU.

A partir de los valores de turbidez obtenidos en cada altura de la torre de sedimentación, y calculando el porcentaje de remoción en función de la turbidez inicial, la turbidez final y el tiempo transcurrido desde la toma de la muestra, se calculó

el porcentaje de remoción, que se presenta en las Tablas 4 y 7. Para facilitar la interpretación, estos porcentajes se clasificaron en rangos de eficiencia, diferenciados por colorimetría, lo que permite visualizar de manera más clara el comportamiento teórico del prototipo.

La eficiencia de sedimentación alcanzó un valor óptimo entre el 8 % y el 20 %, manteniéndose constante a lo largo de la columna de sedimentación, especialmente después de transcurridos 60 minutos. Sin embargo, se observó un incremento en la eficiencia de sedimentación, alcanzando hasta un 50 % adicional conforme aumentaba el tiempo de sedimentación.

Las ecuaciones (1) y (2) desarrolladas para modelar el proceso de sedimentación están expresadas en función de la altura y el tiempo, lo que nos permite obtener la eficiencia óptima en un punto específico. Al sustituir el tiempo en cada una de las variables (x), se obtiene una altura (y), que corresponde a la salida donde se genera el porcentaje de eficiencia óptima para cada ensayo. Es importante destacar que este comportamiento varía dependiendo del material utilizado y el coagulante empleado en el proceso de coagulación-sedimentación.

$$y = -0,0105x^2 - 0,681x + 151,857 \quad \text{Ensayo 1 (1)}$$

$$y = -0,0293x^2 - 0,735x + 170,42 \quad \text{Ensayo 2 (2)}$$

Al sustituir los valores obtenidos durante los ensayos realizados en la torre de sedimentación en la ecuación correspondiente, se observa lo siguiente: por ejemplo, si se toma el ensayo número 1 y se reemplaza el valor de 10, que representa el tiempo en el que se realizó la medición, el resultado obtenido debería corresponder a la altura en la que se tomó dicha muestra, en este caso, 144 cm. Es importante señalar que los valores de tiempo utilizados en la ecuación son aquellos que presentan un porcentaje de remoción dentro del rango del 8 % al 20 %, ya que la ecuación está diseñada para reflejar el funcionamiento en ese intervalo de eficiencia.

Finalmente, utilizando el modelo existente basado en la ecuación cuadrática y los datos de eficiencia obtenidos, se logró desarrollar una ecuación que describe adecuadamente el comportamiento funcional de la torre de sedimentación para cada uno de los ensayos realizados.

IV. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los datos obtenidos referente a los múltiples ensayos realizados hoy en día empleando el uso de coagulantes convencionales, como lo es el sulfato de aluminio en comparación al utilizado en las pruebas de laboratorio realizadas previamente, se evidencia que este también reacciona de manera óptima en el proceso de sedimentación de las partículas floculantes.

El porcentaje de remoción de partículas floculantes varía en función de diversos factores, incluyendo la cantidad de agua

tratada, la sección de la torre en la que se realiza el proceso de sedimentación y el tiempo disponible para la sedimentación del material.

Al generar los rangos de eficiencia, se facilita un análisis más detallado del comportamiento de la torre de sedimentación, permitiendo identificar los tiempos de mayor y menor eficiencia en función de las variables de altura y tiempo.

Se desarrollaron ecuaciones a partir de las gráficas de eficiencia, las cuales proporcionan estimaciones precisas de los puntos de salida de agua en los que se alcanza un proceso de sedimentación constante en cada uno de los ensayos realizados.

V. RECOMENDACIONES

Es fundamental asegurar una correcta ejecución tanto en la construcción de la torre de sedimentación como en la toma de datos, ya que esto garantizará la obtención de información precisa y permitirá una interpretación adecuada de los resultados.

Tras la realización de los ensayos, es esencial establecer rangos de eficiencia para poder evaluar de manera adecuada el comportamiento del sistema y optimizar su rendimiento.

Las ecuaciones presentadas en este estudio proporcionan resultados óptimos específicamente para el prototipo utilizado. Sin embargo, es importante considerar que las variaciones en la construcción de la torre de sedimentación, los materiales empleados y el tiempo transcurrido durante la toma de las muestras pueden influir en los resultados y deben ser tenidos en cuenta en futuras aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Fernández, A., "El agua: un recurso esencial", Química Viva, vol. 11, núm. 3, diciembre, 2012, pp. 147-170.
- [2] Araujo, G., (2020, agosto 26). "Importancia del Agua para el buen funcionamiento de nuestro organismo", [Online]. Available: https://www.insp.mx/resources/images/stories/INSP/Docs/cts/210131_cts2.pdf
- [3] Camacho, L., (2020, enero 01) "La paradoja de la disponibilidad del agua de mala calidad en el sector rural de Colombia", Revista de Ingeniería Universidad de los Andes, [Online]. Available: <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/view/7489/7889>
- [4] Rodríguez, G., (2013, junio 1). 800 municipios toman agua con riesgos para la salud. EL TIEMPO.
- [5] Pérez, S., (2017). "Calidad del agua y salud pública en Colombia", [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/bdc8784e-fbe3-43d9-95e4-16169f8a7b20/content>
- [6] Martínez, W., (2021), "CONCEPCIONES DE AMBIENTE, AGUA, RÍO BOGOTÁ Y EDUCACIÓN AMBIENTAL COMO EJES DE LA DESCONTAMINACIÓN DEL RÍO BOGOTÁ, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DOCUMENTAL DE LOS PLANES DISTRICTALES DE DESARROLLO ENTRE LOS AÑOS 2008 Y 2024", [Online]. Available: <http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/16778/CONCEPCIONES%20AMBIENTE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [7] CAR, (2020). “ESTADO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ, EN TÉRMINOS DE CALIDAD Y CANTIDAD”, [Online]. Available: <https://www.car.gov.co/uploads/files/60edba2e9b84f.pdf>
- [8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, (2022), “Lineamientos generales para el Manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico”, [Online]. Available: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/07/LINEAMIENTO-MANEJO-DE-SEDIMENTOS_FINAL.pdf
- [9] Torres-Avalos, G., Lozano-González, E., “DISMINUCIÓN DE SÓLIDOS DE AGUAS GRISES MEDIANTE UN PROCESO DE AIREACIÓN”, Ra Ximhai, vol. 13, núm. 3, julio-diciembre, 2017, pp. 393-404.
- [10] SUPISCINA S.A.S, (2021), [Online]. Available: <https://supiscina.com.co/wp-content/uploads/2021/06/Ficha-tecnica-Clarifier.pdf>
- [11] PQP SA, (Junior 2017),” FICHA TÉCNICA. CLARIFICADOR DE AGUA –PISCINAS”, [Online]. Available: https://www.kipclin.com/images/pdf/fichas/KIP-PQP-CLARI00002.pdf?srsltid=AfmBOooCXgdUg22AzjfJY21_AF3QmVhrDOM0QsIClyzzGxZQdpD62zYO
- [12] Secretaría de Economía. (2017). Perfil de Mercado de la Bentonita. Dirección General de Desarrollo Minero. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287791/Perfil_Bentonita_2017.pdf
- [13] Ospino, O.,(2019) “Propiedades del sedimento suspendido en condiciones de flujo estratificado no estacionario – desembocadura del río Magdalena”, [Online]. Available: <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9840#page=1>
- [14] Vega-Guzmán, J.C. y Villacreses-Zambrano, J.A. (2006). “Estudio del Fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio”. [En línea: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3406/1/T-68102%20VEGA%20-%20VILLACRESES.pdf>
- [15] Restrepo-Osorno, H. (2009). Evaluación del proceso de coagulación - floculación de una planta de tratamiento de agua potable.
- [16] Sung Mould y Plastic, “Moldeo Acrílico y Termoformado Acrílico”, [Online]. Available: <https://sungplastic.com/es/acrylic-molding-and-acrylic-thermoforming/>
- [17] Manrique-Prieto, A. y Gómez-Chávez, J. (2016). Diseño y construcción de una torre de sedimentación para la elaboración de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable.
- [18] Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 29(3), 3-14. DOI: 10.18845/tm.v29i3.2884