

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

Sedimentation tower for calculation and analysis of flocculating particles in suspension

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

Fecha de recibido: enero 24 de 2025 – **Fecha de aprobado:** enero 29 de 2025

Fecha de publicación: junio 27 de 2025

Como citar este artículo: A. F. Ballesteros Escobar, L. X. Moreno Portela y F. Santamaria Álzate, "Torre de sedimentación para cálculo y análisis de partículas floculantes en suspensión", *Inventum*, vol. 20, no. 38, pp. 23-35, enero-junio año 2025. DOI: 10.26620/uniminuto.inventum.20.38.2025.06-27.

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO. ISSN:1909-2520 eISSN: 2590-8219

Resumen

La presente investigación desarrolla una ecuación de eficiencia para caracterizar cuantitativamente el comportamiento de torres de sedimentación con partículas floculantes, una tecnología emergente en el tratamiento de aguas residuales. El estudio experimental se realizó mediante una torre de sedimentación en acrílico equipada con siete puntos estratégicos de medición, permitiendo el análisis sistemático de parámetros críticos como turbidez, velocidades de sedimentación y tiempos de retención. Las mediciones se efectuaron en intervalos temporales predeterminados, evaluando diferentes concentraciones de coagulante y bentonita. Las ecuaciones resultantes, expresadas en función de altura y tiempo, proporcionan un modelo matemático para la optimización del proceso de sedimentación. Si bien el sistema no alcanza la potabilización completa del agua, constituye un avance significativo en el desarrollo de tecnologías de tratamiento más eficientes y económicamente viables, facilitando su implementación a escala industrial.

Palabras clave: ecuación cuadratriz, eficiencia de sedimentación, partículas floculantes, sedimentación, turbiedad.

Abstract: The present research develops an efficiency equation to quantitatively characterize the behavior of sedimentation towers with flocculent particles, an emerging technology in wastewater treatment. The experimental study was conducted using an acrylic sedimentation tower equipped with seven strategic measurement points, enabling systematic analysis of critical parameters such as turbidity, sedimentation velocities,

Copyright:



Producto 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: A. F. Ballesteros-Escobar, L. X. Moreno-Portela y F. Santamaria-Álzate, "Torre de sedimentación para cálculo y análisis de partículas floculantes en suspensión", *Inventum*, vol. 20, No. 38, pp. 23-35, enero-junio año 2025. DOI: 10.26620/uniminuto.inventum.20.38.2025-06-27

and retention times. Measurements were taken at predetermined time intervals, evaluating different concentrations of coagulant and bentonite. The resulting equations, expressed as functions of height and time, provide a mathematical model for optimizing the sedimentation process. Although the system does not achieve complete water potabilization, it represents a significant advance in the development of more efficient and economically viable treatment technologies, facilitating their implementation at industrial scale.

Keywords: flocculant particles, quadratic equation, sedimentation, sedimentation efficiency, turbidity.

Resumo: A pesquisa desenvolve uma equação de eficiência para caracterizar quantitativamente o comportamento de torres de sedimentação com partículas floculantes, uma tecnologia emergente no tratamento de águas residuais. O estudo experimental foi realizado mediante uma torre de sedimentação em acrílico equipada com sete pontos estratégicos de medição, permitindo a análise sistemática de parâmetros críticos como turbidez, velocidades de sedimentação e tempos de retenção. As medições foram efetuadas em intervalos temporais predeterminados, avaliando diferentes concentrações de coagulante e bentonita. As equações resultantes, expressas em função de altura e tempo, proporcionam um modelo matemático para a otimização do processo de sedimentação. Embora o sistema não alcance a potabilização completa da água, constitui um avanço significativo no desenvolvimento de tecnologias de tratamento mais eficientes e economicamente viáveis, facilitando sua implementação em escala industrial.

I. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico constituye un elemento fundamental para los sistemas biológicos, el desarrollo socioeconómico y la estabilidad ecosistémica global. Su función es crítica en múltiples ámbitos: el consumo antropogénico, la producción agrícola, la generación energética, los procesos industriales y sistemas de saneamiento básico [1]. En el contexto de la dinámica ecosistémica, el agua actúa como mediador esencial en los ciclos biogeoquímicos y contribuye al mantenimiento de la diversidad biológica en múltiples escalas espaciales y temporales.

La disponibilidad y calidad de los recursos hídricos son factores determinantes para la salud poblacional y los indicadores de desarrollo humano, adquiriendo particular relevancia en el contexto actual del cambio climático antropogénico.

Este fenómeno incrementa la vulnerabilidad de los sistemas hidrológicos y plantea desafíos significativos para la gestión sostenible del recurso, especialmente, considerando las proyecciones de variabilidad climática y el aumento en la demanda hídrica global. En consecuencia, la implementación de estrategias efectivas para la protección y gestión integrada del agua emerge como un imperativo para garantizar la sostenibilidad intergeneracional y la resiliencia de los sistemas socioecológicos [2].

En el contexto colombiano, la contaminación hídrica representa una problemática crítica [3], con particular incidencia en Bogotá, donde diversos factores antropogénicos degradan significativamente los recursos acuíferos. Los principales agentes contaminantes comprenden efluentes industriales, residuos domésticos, descargas agrícolas, actividades mineras, gestión inadecuada de residuos sólidos y uso intensivo de agroquímicos [4], [5]. Esta degradación ambiental afecta notablemente al río Bogotá y sus sistemas asociados de quebradas y humedales urbanos, posicionándolo entre los cuerpos hídricos con mayor impacto contaminante del territorio nacional. Las consecuencias se manifiestan en alteraciones sustanciales de la biodiversidad, la salud pública y el desarrollo económico regional [6], [7].

La contaminación hídrica se caracteriza principalmente por la presencia significativa de material particulado, que incluye sedimentos, residuos industriales y desechos sólidos en los cuerpos de agua [3]. Esta situación demanda el desarrollo de soluciones tecnológicas eficientes y económicamente viables para el tratamiento de aguas residuales. En este contexto, las torres de sedimentación emergen como una tecnología prometedora para la remoción de partículas contaminantes, pues se constituyen como dispositivos especializados que facilitan la separación de fases sólido-líquido, mediante procesos gravitacionales basados en diferenciales de densidad [8], [9].

No obstante, resulta imperativo caracterizar cuantitati-

vamente el comportamiento de las partículas floculantes durante el proceso de sedimentación, con el fin de optimizar parámetros operativos como velocidad de flujo, tiempo de retención y dosificación de coagulantes. Esta caracterización permitirá diseñar sistemas de tratamiento más eficientes y facilitar su escalamiento a nivel industrial, factor crucial para abordar los volúmenes significativos de aguas residuales generados en el contexto urbano y optimizar recursos operativos.

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación se centra en el diseño y desarrollo de una ecuación de eficiencia que permita caracterizar cuantitativamente el comportamiento óptimo de torres de sedimentación con partículas floculantes. Esta formulación matemática constituye una contribución significativa para la optimización de sistemas de tratamiento y el mejoramiento de la calidad del agua en aplicaciones industriales y ambientales.

La metodología implementada se fundamenta inicialmente en una revisión sistemática de la literatura y un análisis crítico del estado del arte en procesos de sedimentación, con énfasis en las técnicas y procedimientos más avanzados para la remoción de partículas en medios acuosos. Este enfoque metodológico establece las bases teóricas y experimentales necesarias para el desarrollo de la ecuación propuesta

El desarrollo experimental comprendió cálculos teóricos y prácticos para la construcción del prototipo, evaluando los materiales y seleccionando una muestra problemática constituida por arcilla tipo bentonita, la cual genera un fenómeno de turbidez natural al dispersarse en agua. Durante los ensayos, se recolectaron y analizaron datos relevantes, incluyendo el porcentaje de turbidez en cada punto de muestreo, las velocidades de sedimentación y los tiempos de retención. Se elaboraron gráficos para caracterizar el comportamiento de la remoción de partículas y determinar el porcentaje óptimo de eliminación en la muestra problemática.

Finalmente, se obtuvieron las ecuaciones expresadas en función de la altura y el tiempo, las cuales permiten modelar el proceso de sedimentación y así, obtener la eficiencia óptima en puntos específicos del sistema, lo que representa un avance significativo en el campo del tratamiento de aguas residuales, facilitando la optimiza-

ción de parámetros operativos y el diseño de sistemas de tratamiento más eficientes. Si bien el alcance del sistema no contempla la potabilización completa del recurso hídrico, su implementación habilitará el aprovechamiento del agua en múltiples aplicaciones estratégicas, incluyendo procesos de saneamiento básico, generación energética y otras actividades industriales que requieran agua con niveles reducidos de material particulado.

II. METODOLOGÍA

La formulación de una ecuación de eficiencia que caracterice con precisión el comportamiento de torres de sedimentación con partículas floculantes exigió un proceso experimental sistemático y controlado. Inicialmente, la comprensión integral de los procesos de sedimentación requirió una exhaustiva revisión bibliográfica para identificar materiales y coagulantes óptimos que permitieran reproducir fielmente este fenómeno en condiciones de laboratorio.

La metodología se estructuró en tres fases secuenciales e interrelacionadas: a) diseño y construcción del prototipo, b) selección y caracterización de materiales, y, c) Experimentación y análisis de datos.

A. Diseño y construcción del prototipo

El diseño y la construcción del prototipo de torre de sedimentación se fundamentaron en especificaciones técnicas precisas, orientadas a garantizar condiciones operativas óptimas para la caracterización del proceso de separación sólido-líquido. Las torres de sedimentación son dispositivos experimentales ampliamente utilizados en investigaciones hidrodinámicas para la simulación controlada de procesos de sedimentación, fenómeno físico basado en la diferencia de densidades entre los componentes de una suspensión [10], [11].

El principio operativo de estos dispositivos se basa en la acción de la fuerza gravitacional sobre partículas suspendidas, lo que induce su sedimentación diferencial en función de características físicas como tamaño, forma y densidad. Este mecanismo permite una separación vertical gradual, donde las partículas sólidas se depositan secuencialmente en el fondo mientras la fase líquida clarificada permanece en la región superior [12]. Desde el punto de vista metodológico, estos

dispositivos facilitan la observación, cuantificación y modelación de parámetros críticos como velocidad de sedimentación, eficiencia de remoción y distribución espaciotemporal de partículas.

Convencionalmente, estos dispositivos se fabrican con materiales transparentes como vidrio o acrílico, permitiendo la observación directa de la dinámica de partículas. La configuración incluye elementos complementarios como puertos de muestreo estratégicamente distribuidos a diferentes alturas, sistemas de dosificación para coagulantes y mecanismos de agitación controlada [13].

Para optimizar el desarrollo del prototipo experimental, se implementaron modificaciones específicas respecto a las configuraciones estándar, tomando como referencia el diseño propuesto por Manrique Prieto y Gómez Chávez [14]. Estas adaptaciones respondieron a consideraciones técnicas fundamentales: I) Resistencia mecánica de los materiales seleccionados, II) optimización cuantitativa de componentes estructurales, III) disponibilidad y accesibilidad de materiales especializados, y, IV) funcionalidad operativa conforme a los parámetros experimentales establecidos (tabla 1).

Parámetros	Características
Altura	172 cm
Ancho	15 cm interno, 18 cm externo.
Número de secciones	4 secciones de acrílico, cada una con una altura de 43 cm
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 cm de la base.

Tabla 1. Especificaciones de la torre de sedimentación para este estudio.

Fuente: elaboración propia.

B. Selección y caracterización de materiales

1) Material particulado (bentonita)

Se seleccionó la bentonita como sustrato de referencia debido a sus propiedades coloidales y su comportamiento hidrodinámico, que simula eficazmente los sedimentos presentes en sistemas acuáticos naturales. Este material arcilloso presenta características granulométricas y de suspensión análogas a los sedimentos típicamente encontrados en cuerpos de agua, lo que permite extrapolar los resultados experimentales a escenarios reales de contaminación [15]. Sus propiedades reológicas y su capacidad de interacción con agentes coagulantes la posicionan como un modelo experimental idóneo para el estudio y caracterización de procesos de sedimentación en torres de clarificación.

Titulación: se determinó la dosificación adecuada de bentonita para alcanzar un parámetro de turbiedad de aproximadamente 15 NTU. Para ello, se realizaron tres (3) pruebas con diferentes concentraciones de Bentonita. Mediante la titulación de las muestras, se identificaron los valores de alcalinidad y acidez que respaldaran la selección de la concentración óptima (figura. 1).

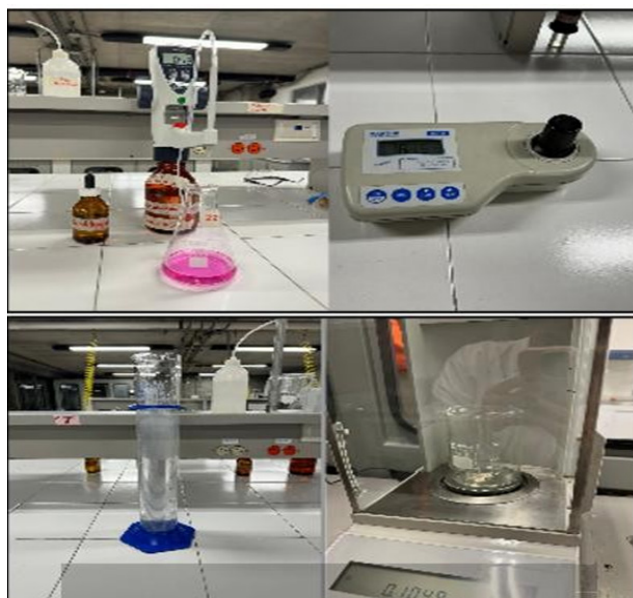


Figura. 1. Proceso de medición de la muestra problema.

Fuente: elaboración propia.

Como resultado de este análisis, se estableció que 0,12 gramos de bentonita representaban la concentración adecuada, ya que la turbiedad resultante era la más cercana al valor de referencia (15 NTU). Adicionalmente, los valores de alcalinidad y acidez se aproximaron a 0,57, lo que indica condiciones químicas apropiadas según los criterios establecidos [16] (tabla 2).

	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	0,52	0,52	16,42

Tabla 2. Pruebas para identificar el gramaje correcto de bentonita.

Fuente: elaboración propia.

Material coagulante (Decantador Clarificador HiClor 1000 cc)

Para el proceso de coagulación-floculación, se seleccionó el Decantador Clarificador HiClor 1000 cc [17] como agente coagulante, tras evaluar sus propiedades fisicoquímicas y su desempeño documentado en aplicaciones similares. Esta selección representa una alternativa innovadora frente al sulfato de aluminio, tradicionalmente empleado en procesos de clarificación de aguas [18]. La elección del HiClorl 1000 cc se fundamentó en criterios específicos como su capacidad floculante, dosificación óptima y comportamiento en diversas condiciones de pH y temperatura, características ampliamente documentadas en la literatura especializada.

Test de jarras: se implementó la prueba de jarras para determinar la dosificación óptima del coagulante. Este procedimiento consiste en evaluar la interacción entre diferentes volúmenes de coagulante en un volumen constante de 1 litro de agua. Después de un tiempo de sedimentación estandarizado (40 minutos), se verificó el comportamiento de las partículas floculantes en combinación con el coagulante, identificando el volumen que proporcionaba mayor sedimentación.

Para este análisis, se evaluaron volúmenes de 10 ml, 20 ml, 30 ml, 40 ml y 50 ml de coagulante, manteniendo constante la concentración de bentonita (0,12 g/L) como material particulado de referencia (figura. 2). Los resultados demostraron que la máxima eficiencia de sedimentación se alcanzó con una dosificación de 40 ml de coagulante.



Figura. 2. Test de jarras.

Fuente: elaboración propia.

3) Cálculo de la cantidad necesaria de material

Con base en los resultados obtenidos en la caracterización de la bentonita y la determinación de la dosis óptima de coagulante, se procedió a calcular la cantidad necesaria de bentonita para la torre de sedimentación mediante una proporción directa. Este cálculo consideró el volumen óptimo de 40 ml de coagulante establecido previamente para maximizar la eficiencia del proceso de sedimentación (tabla 3).

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

Tabla 3. Dosificaciones requeridas para la torre de sedimentación.

Fuente: elaboración propia.

C. Experimentación y análisis de datos.

1) Montaje y operación de la torre de sedimentación

Se implementó un protocolo experimental que comprendió ensayos sistemáticos bajo condiciones estrictamente controladas. Una vez finalizado el montaje del sistema y preparado para su funcionamiento (Figura. 3), se procedió con la fase operativa siguiendo un procedimiento bifásico:

- Fase de dispersión inicial: se activó el flujo de aire a presión elevada durante un minuto para garantizar la completa dispersión del coagulante en el medio acuoso.
- Fase de homogenización: posteriormente, se ajustó el flujo de aire a una presión constante y moderada durante 10 minutos, con el objetivo de lograr la máxima homogeneidad en la suspensión coloidal antes de iniciar los ensayos analíticos.



Figura. 3. Montaje torre de sedimentación.

Fuente: elaboración propia.

Tras completar el proceso de homogenización de la suspensión, se interrumpió el suministro de aire y se inició el muestreo secuencial a intervalos de tiempo predeterminados desde cada una de las siete salidas distribuidas verticalmente en la torre de sedimentación. La cuantificación de la turbidez se realizó mediante un turbidímetro calibrado, instrumento que determina la cantidad de luz dispersada al atravesar una muestra de agua, parámetro directamente proporcional a la concentración de partículas en suspensión.

2) Diseño experimental

Se ejecutaron dos (2) ensayos independientes, considerando las restricciones temporales para la realización de las actividades de laboratorio. Esta decisión metodológica se justifica por el carácter exploratorio de la investigación, donde se priorizó la obtención de datos preliminares para caracterizar el fenómeno es-

tudiado. En la nomenclatura adoptada, el “Ensayo 1” comprende todos los datos recopilados y su correspondiente análisis provenientes de la primera serie de muestreos, mientras que el “Ensayo 2” abarca la información analítica derivada de la segunda serie.

3) Análisis de datos

El procesamiento analítico de los datos experimentales se realizó mediante Microsoft Excel, generando representaciones gráficas y tabulaciones que permitieron caracterizar cuantitativamente el proceso de sedimentación:

- Gráfico de evolución temporal de la turbidez: Se elaboraron gráficos de líneas para visualizar la dinámica de sedimentación de las partículas floculantes. En estas representaciones, el eje horizontal (X) corresponde al tiempo transcurrido, mientras que el eje vertical (Y) representa los valores de turbidez expresados en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Cada serie gráfica corresponde a una altura específica (h) en centímetros, según se detalla en la leyenda.

- Tabla de rangos de eficiencia: se desarrolló un análisis comparativo expresado en términos porcentuales, contrastando la turbidez inicial del sistema con la turbidez registrada en cada punto de muestreo a lo largo del tiempo. Esta cuantificación permitió identificar ocho rangos diferenciados de eficiencia (figura. 4). La segmentación establecida evidencia que el incremento en la eficiencia del sistema no presenta un comportamiento lineal sino exponencial.

	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

Figura. 4. Rangos de eficiencia.

Fuente: elaboración propia.

- Gráfica de eficiencia del prototipo: Utilizando el software AUTOCAD, se generó una representación gráfica optimizada para visualizar con mayor claridad los rangos de eficiencia alcanzados. En este contexto, el término “eficiencia” cuantifica la reducción de turbidez (NTU) del agua durante el proceso de tratamiento. Operacionalmente, la turbidez corresponde a la dispersión lumínica al atravesar una muestra de agua, parámetro que correlaciona directamente con la concentración de partículas en suspensión. Los porcentajes de eficiencia asignados reflejan cuantitativamente la mejora en la calidad del agua en términos de reducción de turbidez, proporcionando un indicador objetivo para evaluar el rendimiento del prototipo.
- Gráfica de rangos de eficiencia: se elaboró un diagrama de dispersión donde los puntos distribuidos en el sistema de coordenadas representan los rangos de eficiencia asociados a las diferentes categorizaciones cromáticas previamente establecidas. La curva de tendencia que atraviesa el gráfico ilustra el comportamiento cinético del sistema, específicamente la dinámica de remoción del material particulado (bentonita) en la torre de sedimentación, destacando las zonas donde la eficiencia de remoción presenta mayor estabilidad.

Esta metodología experimental sistemática proporcionó los fundamentos cuantitativos necesarios para la derivación matemática de la ecuación de eficiencia, estableciendo relaciones funcionales entre los parámetros operativos y el rendimiento del sistema. Los resultados obtenidos validan la aplicabilidad de la ecuación desarrollada para el diseño y optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales a escala industrial.

III. ANÁLISIS Y 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.

Los valores de turbiedad (NTU) registrados en las muestras (tabla 4) exhiben un comportamiento siste-

mático a partir de un valor inicial de 16,42 NTU. El análisis de estos datos en función del tiempo y la altura revela una reducción progresiva de la turbiedad, lo que confirma la efectividad del proceso de sedimentación facilitado por la acción del coagulante. La cinética del proceso de sedimentación presenta tres fases claramente diferenciadas:

- Fase inicial (0,5-10 min): caracterizada por una reducción lenta de la turbiedad, con cambios porcentuales mínimos respecto al valor inicial.
- Fase de aceleración (20-60 min): período durante el cual la velocidad de sedimentación se incrementa significativamente, manifestándose en una pronunciada disminución de los valores de turbiedad.
- Fase de estabilización (75-120 min): etapa final donde la tasa de reducción disminuye progresivamente, aproximándose a valores asintóticos que representan los límites de eficiencia del sistema bajo las condiciones experimentales establecidas.

El análisis espacial de los datos revela una marcada estratificación vertical en la eficiencia del proceso. Las mediciones demuestran una correlación directa entre la altura de la columna y la eficacia de clarificación, con rendimientos significativamente superiores en las zonas elevadas (h=144 cm, h=122 cm) en comparación con los registrados en las zonas inferiores (h=56 cm, h=34 cm, h=12 cm). Esta distribución vertical de la eficiencia se evidencia claramente en la representación gráfica correspondiente (figura. 5).

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	16,61	15,89	16,92	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	16:20
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

Tabla 4. Turbiedad Ensayo 1.

Fuente: elaboración propia.

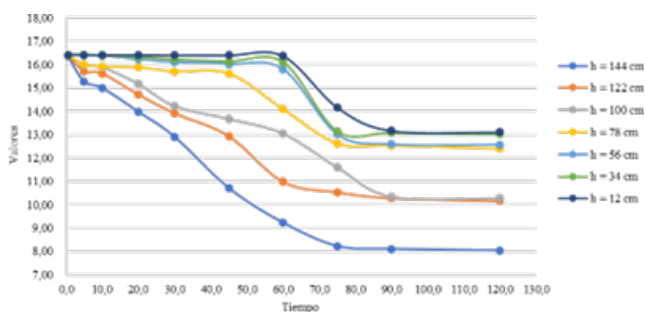


Figura. 5. Turbiedad Ensayo 1.

Fuente: elaboración propia.

Para cuantificar la eficacia del proceso, se realizó un análisis comparativo expresado mediante Porcentajes de remoción (tabla 5). Estos valores representan la relación porcentual entre la turbiedad inicial de referencia (16,42 NTU) y la turbiedad registrada en cada punto espacio-temporal específico, proporcionando una medida directa de la eficiencia del sistema. Complementariamente, se establecieron Rangos de eficiencia categorizados (tabla 6) que permiten evaluar comparativamente el rendimiento del proceso a lo largo del tiempo.

En este sentido, en cuanto al comportamiento temporal, se observa claramente la reducción constante de la turbiedad y el aumento de la eficiencia a lo largo del tiempo. Se identifica una fase inicial (0.5-10 min) con cambios mínimos, una fase intermedia (20-60 min) con aceleración significativa, y una fase de estabilización (75-120 min) que se aproxima a valores máximos. Es evidente que a los 60 y 75 minutos ocurren cambios sustanciales en la dinámica de sedimentación.

Respecto a la dinámica espacial, la mayor eficiencia se registra en las alturas superiores (h=144, h=122) con hasta 51 % de remoción, y menor en las inferiores (h=56, h=34, h=12) con aproximadamente 20 % de remoción. Se observa un salto cuantitativo notable en la eficiencia entre 60 y 75 minutos, especialmente en las alturas intermedias e inferiores.

Se destaca además que un tiempo de 75 minutos es necesario para obtener resultados significativos en todas las alturas, y que, bajo las condiciones experimentales establecidas, el sistema alcanza aproximadamente 51 % de remoción.

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 5. Porcentaje (%) de remoción Ensayo 1.

Fuente: elaboración propia.

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	1,77	1,95	19,91	20,40	20,71
h = 12	0,00	0,00	0,06	0,06	0,12	0,12	0,30	13,70	19,79	20,22

Tabla 6. Rangos de eficiencia (%) Ensayo 1.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, mediante la gráfica de Eficiencia del Prototipo, se puede observar con mayor claridad la diferenciación según la altura, con mejor desempeño en las zonas superiores. Teniendo en cuenta la progresión temporal, el proceso avanza a diferentes velocidades según la altura, siendo más rápido en las zonas superiores. 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 (figura. 6)

En la gráfica de Rangos de eficiencia, se aisló el intervalo donde el prototipo presentó mayor constancia a lo largo del experimento, correspondiente a valores de

eficiencia entre el 8 % y el 20 %. Se confirmaron las tres zonas identificadas previamente (superior, media e inferior) con comportamientos distintivos (figura 7).

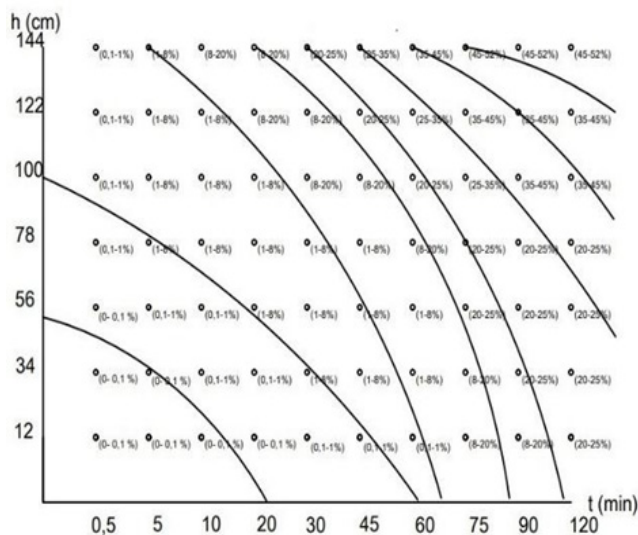


Figura 6. Eficiencia prototipo Ensayo 1

Fuente: elaboración propia.

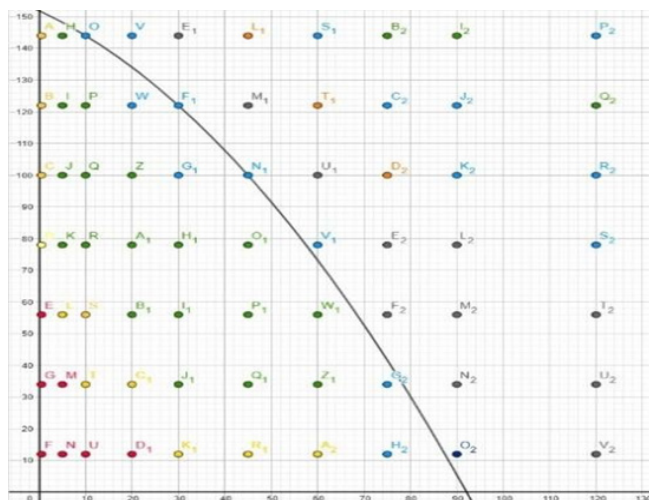


Figura 7 Rangos de eficiencia Ensayo 1.

Fuente: elaboración propia.

Estas visualizaciones proporcionan una comprensión intuitiva de la dinámica del proceso de sedimentación y ofrecen información valiosa para optimizar parámetros operativos como tiempo de retención y diseño de altura en sistemas de sedimentación a escala real.

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 del método implementado. Los resultados se presentan a continuación:

- Valores de turbiedad (NTU) obtenidos en cada una de las muestras (tabla 7; figura. 8).
- Porcentajes de remoción (Tabla 8).
- Rangos de eficiencia (tabla 9).
- Gráfica de Eficiencia del prototipo (figura. 9).
- Gráfica de rangos de eficiencia (figura.

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

Tabla 7. Turbiedad Ensayo 2.

Fuente: elaboración propia.

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 8. Porcentaje (%) de remoción Ensayo 2.

Fuente: elaboración propia.

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

Tabla 9. Rangos de eficiencia (%) Ensayo 2.

Fuente: elaboración propia

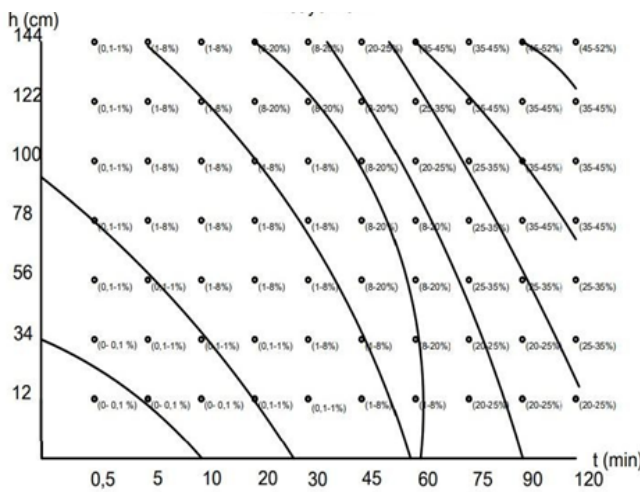


Figura 9. Eficiencia prototipo Ensayo 2.

Fuente: elaboración propia.

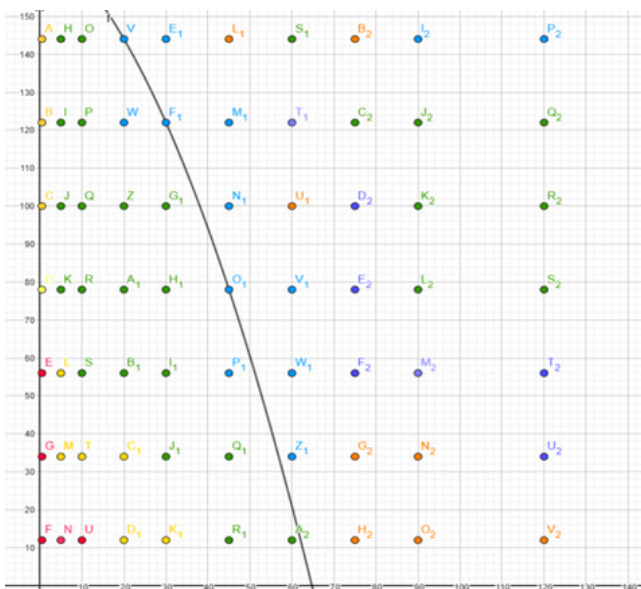


Figura 10. Rangos de eficiencia Ensayo 2.

Fuente: elaboración propia.

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, resultando en mayor acumulación 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.

Al analizar los datos obtenidos de los dos ensayos previos, se observó una disminución progresiva de la turbidez 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 evidencia que valores de turbidez más cercanos a 0 indican menor concentración de partículas en suspensión. Según la normativa vigente, el valor ideal de turbidez debe 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, final y el tiempo transcurrido, se determinaron los porcentajes de remoción presentados en las Tablas 4 y 7. Para facilitar la interpretación, estos porcentajes se clasificaron en rangos de eficiencia, diferenciados mediante colorimetría, permitiendo visualizar más claramente 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, alcanzando hasta un 50 % adicional conforme aumentaba el tiempo de sedimentación.

3) Ecuación de eficiencia

Las ecuaciones (1) y (2) desarrolladas para modelar el proceso de sedimentación están expresadas en función de la altura y el tiempo, permitiendo determinar la eficiencia óptima en un punto específico. Al sustituir el tiempo en la variable independiente (x), se obtiene una altura (y) que corresponde a la posición donde se genera el porcentaje de eficiencia óptima para cada ensayo. Es importante destacar que este comportamiento varía según el material utilizado y el coagulante

empleado en el proceso de coagulación- sedimentación.

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

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

La validación de las ecuaciones se realizó mediante la sustitución de los valores experimentales obtenidos durante los ensayos en la torre de sedimentación. Al reemplazar en la ecuación del Ensayo 1 el valor de tiempo “x = 10 minutos”, se obtuvo una altura “y = 144 cm”, coincidente con la posición de muestreo. Es importante destacar que los valores de tiempo utilizados en estas ecuaciones corresponden específicamente a aquellos que presentan un porcentaje de remoción dentro del rango óptimo del 8 % al 20 %, intervalo para el cual se diseñó y optimizó el modelo matemático.

Mediante un riguroso análisis de regresión de los datos experimentales de eficiencia, se desarrollaron ecuaciones cuadráticas que describen con precisión el comportamiento funcional de la torre de sedimentación para cada condición experimental. Estas expresiones matemáticas constituyen una herramienta predictiva valiosa para caracterizar el proceso de sedimentación bajo diversas condiciones operativas.

La obtención de estas ecuaciones representa un avance significativo con múltiples aplicaciones prácticas. En primer lugar, permiten caracterizar cuantitativamente el comportamiento de las partículas floculantes durante la sedimentación, facilitando la optimización de parámetros operativos críticos como velocidad de flujo, tiempo de retención y dosificación de coagulantes. Adicionalmente, la modelación matemática posibilita el diseño de sistemas de tratamiento más eficientes y su escalamiento a nivel industrial, factor crucial para abordar los volúmenes significativos de aguas residuales generados en el contexto urbano de Bogotá.

IV. CONCLUSIONES

La torre de sedimentación demostró una capacidad significativa para reducir la turbidez del agua, con una

eficiencia de sedimentación que se mantuvo estable entre el 8 % y el 20 % después de 60 minutos de operación, alcanzando incrementos de hasta un 50 % adicional con periodos prolongados de sedimentación.

El análisis de la cinética de sedimentación reveló tres fases distintas: una fase inicial, caracterizada por una reducción gradual de la turbidez (0-10 minutos); una fase intermedia, de aceleración con disminución pronunciada de partículas en suspensión (20-60 minutos); y una fase final, de estabilización, en donde la eficiencia se mantiene relativamente constante (75- 120 minutos).

Se documentó un gradiente vertical de eficiencia, con valores superiores en las zonas más elevadas de la torre, debido al proceso progresivo de clarificación del agua a medida que las partículas floculantes sedimentan hacia la parte inferior del sistema. El tiempo de retención, la velocidad de flujo y la dosificación de coagulantes fueron identificados como parámetros críticos para la optimización del rendimiento del sistema.

El comportamiento del proceso fue modelado mediante ecuaciones cuadráticas que relacionan la altura y el tiempo de sedimentación, proporcionando una herramienta predictiva para determinar la eficiencia óptima en puntos específicos dentro del sistema. Si bien el tratamiento no logra la potabilización completa del agua, el sistema representa una solución tecnológicamente viable y económicamente eficiente para la remoción de partículas en el tratamiento de aguas residuales, con potencial significativo para su implementación y escalamiento a nivel industrial.

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] A. Fernández, “El agua: un recurso esencial”, *Química Viva*, vol. 11, n° 3, pp. 147-170, 2012. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>

[2] G. T. Araujo Pulido, “Importancia del agua para el buen funcionamiento de nuestro organismo”, *Viva Salud*, pp. 22-25, enero-febrero, 2020. Disponible: https://www.insp.mx/resources/images/stories/INSP/Docs/cts/210131_cts2.pdf

[3] L. A. Camacho Botero, “La paradoja de la disponibilidad de agua de mala calidad en el sector rural de Colombia”, *Revista de Ingeniería*, n° 49, pp. 38-51, 2020. Doi: <https://doi.org/10.16924/rev.ing.49.6>

[4] G. Rodríguez, “800 municipios toman agua con riesgos para la salud”, *El Tiempo*, 1 junio 2013.

[5] S. Pérez Carrillo, *Calidad del agua y salud pública en Colombia*. Disponible en: <https://n9.cl/bg1c1x>

[6] W. Martínez, “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 distritales de desarrollo entre los años 2008 y 2024”, trabajo de especialización, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, 2021. Disponible en: <https://n9.cl/bhucme>

[7] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], *Estado del recurso hídrico en la cuenca del río Bogotá, en términos de calidad y cantidad*, Bogotá: CAR, 2020. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/60edba2e9b84f.pdf>

[8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente], *Lineamientos generales para el manejo de*

sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico, Bogotá: Minambiente, 2022. Disponible en: <https://n9.cl/7qpr7>

[9] G. A. Torres-Avalos y E. A. Lozano-González, “Disminución de sólidos de aguas grises mediante un proceso de aireación”, *Ra Ximhai*, vol. 13, n° 3, pp. 393-404, julio-diciembre, 2017. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46154070023.pdf>

[10] O. G. Ospino Olivares, “Propiedades del sedimento suspendido en condiciones de flujo estratificado no estacionario – desembocadura del río Magdalena”, tesis de maestría, Universidad del Norte, Barranquilla, 2019. Disponible: <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9840#page=1>

[11] J. C. Vega-Guzmán y J. A. Villacreses-Zambrano, “Estudio del fenómeno de sedimentación en el tratamiento del agua en tres casos de estudio”, Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2006. Disponible en: <https://n9.cl/r6tnl3>

[12] H. A. Restrepo-Osorno, “Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable”, trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2561>

[13] Sung Mould y Plastic, “Moldeo acrílico y termoformado acrílico”. Disponible: <https://sungplastic.com/es/acrylic-molding-and-acrylic-thermoforming/>

[14] I. A. Manrique-Prieto y J. M. Gómez-Chávez, *Diseño y construcción de una torre de sedimentación para la elaboración de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable* trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10983/13900>

[15] Dirección General de Desarrollo Minero, *Perfil de mercado de la Bentonita*, México: Secretaría de Economía, diciembre 2017.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287791/Perfil_Bentonita_2017.pdf

[16] E. Pérez-López, “Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Cos-

ta Rica”, Tecnología en Marcha, vol. 29, nº 3, pp. 3-14, 2016. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v29n3/0379-3982-tem-29-03-3.pdf>

[17] SuPiscina S.A.S, “Ficha técnica Clarifier HiClor”, 2021. Disponible em <https://supiscina.com.co/wp-content/uploads/2021/06/Ficha-tecnica-Clarifier.pdf>

[18] Productos Químicos Panamericanos S.A. [PQP SA], “Ficha técnica. Clarificador de agua PQP–piscinas”, junio 2017. Disponible en: <https://n9.cl/2faru>