

**Evaluación y Dimensionamiento de Unidades de Sedimentación
Convencional para Cinco Diferentes Aguas Superficiales Utilizando el
Tamaño de Floccs como Parámetro**

HEINER ADRIAN GONZALEZ GUTIERREZ

CÓDIGO: 2203547



UNIVERSIDAD SANTO TÓMAS

INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA

2022

**Evaluación y Dimensionamiento de Unidades de Sedimentación Convencional
para Cinco Diferentes Aguas Superficiales Utilizado el Tamaño de Blocs como
Parámetro**

HEINER ADRIAN GONZALEZ GUTIERREZ

CÓDIGO: 2203547

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Ambiental**

Director

JUAN PABLO GONZÁLEZ GALVIS, PhD.

Codirector

CAMILO ANDRÉS ROJAS CRUZ, MSC.



**UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA**
VIGILADA MINECACIÓN - SNIES 1732

UNIVERSIDAD SANTO TÓMAS

INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA

2022

DEDICATORIA

En primera medida doy gracias a Dios por darme la fuerza y sabiduría para poder culminar la carrera de ingeniería Ambiental, a mis padres Luis Gonzalez y Mercedes Gamba por el apoyo incondicional durante todo el proceso, a mi hermano por el acompañamiento, a mi abuelita Clara Inés por el cariño y comprensión, a mi tía Ana María por estar pendiente de mi bienestar y por el apoyo, a mi tío Pablo Gonzalez quien me guio durante todo el proceso universitario y el acompañamiento durante esta investigación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por el apoyo económico y acompañamiento durante el tiempo que duró la carrera, por el amor y comprensión, así mismo deseo expresar agradecimiento al director de esta tesis, ingeniero Camilo Andrés Rojas, por la dedicación y recomendaciones durante el trabajo, también agradecer al codirector Ph.D. Juan Pablo González, por la dedicación, el respeto y acompañamiento en la realización del presente trabajo, así mismo agradecer a todos los docentes de la facultad de ingeniería ambiental por el conocimiento dado durante la carrera y finalmente a la universidad Santo Tomás por admitirme y poder desarrollarme como un profesional.

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado No. 1

Jurado No. 2

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVO GENERAL	15
1.2 Objetivos Específicos	15
3. REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
3.1 Coagulación y Floculación	16
3.2 Sedimentación.....	17
3.2.1 Velocidad de sedimentación.....	18
3.2.1.1 Fuerzas actuantes sobre partículas de flocs	19
3.2.2 Carga Hidráulica en Sedimentación	20
3.2.3 Número de Reynolds	20
3.2.4 Numero de Froude	22
3.3 Tamaño de partículas de flocs y su impacto en sistemas de sedimentación y filtración convencional.	22
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
4.1 Fase 1	26
4.2 Fase 2	26
4.3 Fase 3	26
4.4 Fase 4	26
4.5 Fase 5	27
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
5.1 Diámetro de las Partículas de Flocs	28
5.2 Fuerzas actuantes sobre partículas de flocs	29
5.3 Velocidad de sedimentación	31
5.4 Área de las Partículas de Flocs.....	32
5.5 Volumen de las Partículas de Flocs	34
5.6 Ejemplo de Calculo Unidades de Sedimentación con Velocidades de Sedimentación Asumidas de Libros de Diseño.....	35
5.7 Ejemplo de Calculo Unidades de Sedimentación con Velocidad basada en el Diámetro Medio de Partículas de Flocs (Método II).....	39
5.8 Análisis de Correlación	48
5.8.1 Coeficiente de correlación.	48
5.8.2 Correlación entre perímetro y área de flocs	49
5.8.3 Correlación entre diámetro de floc y circularidad.....	50

5.8.4 Correlación entre diámetro de floc y solidez.....	52
6. IMPACTOS	57
6.1 Impacto Social	57
6.2 Impacto humanístico	57
6.2.1 Económico.....	57
6.2.1 Regional.....	57
7. CONCLUSIONES	58
8. RECOMENDACIONES	60
Bibliografía.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de entrada para ejecutar el método I de diseño de sedimentadores de flujo horizontal.	35
Tabla 2. Datos de entrada para ejecutar el método II de diseño de sedimentadores de flujo horizontal.	39
Tabla 3. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Soracá, Boyacá.....	43
Tabla 4. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Ventaquemada, Boyacá.	44
Tabla 5. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Tunja, Boyacá.....	45
Tabla 6. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Boyacá-Boyacá, Boyacá.....	46
Tabla 7. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Turmequé, Boyacá.....	47
Tabla 8. Análisis de varianza para la correlación perímetros de flocs vs área Soracá-Boyacá	50
Tabla 9. Análisis de varianza para la correlación diámetro de flocs vs circularidad Soracá-Boyacá	51
Tabla 10. Análisis de varianza para la correlación diámetro de flocs vs solidez Soracá-Boyacá	53
Tabla 11. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Tunja	53
Tabla 12. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Ventaquemada	54
Tabla 13. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Turmequé	55
Tabla 14. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Boyacá-Boyacá.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fuerzas actuantes sobre partículas de flocs en un proceso de sedimentación	19
Figura 2. Representación flujo laminar y flujo turbulento	21
Figura 3. Diámetro medio de la partícula encontrada en cinco diferentes aguas superficiales en Boyacá.....	28
Figura 4. Fuerzas actuantes en sedimentación para diferentes diámetros medios de partículas de flocs.....	30
Figura 5. Velocidad de sedimentación calculada usando diámetro medio de flocs para cinco diferentes aguas.....	31
Figura 6. Área de flocs calculada a partir del diámetro medio para cinco diferentes aguas.....	33
Figura 7. Volumen de la partícula de flocs encontrados en cinco diferentes aguas superficiales en Boyacá.....	34
Figura 8. Regresión lineal perímetro de flocs versus área de flocs Soracá	49
Figura 9. Regresión lineal diámetro de flocs versus circularidad Soracá.....	51
Figura 10. Regresión lineal solidez versus diámetro medio de floc Soracá.....	52

GLOSARIO

AGUA CRUDA: Es el nombre que recibe el agua que no ha recibido ningún tipo de tratamiento y que generalmente se encuentra en las fuentes naturales.

AGUA POTABLE: Es aquella que es apta para el consumo sin llegar a producir efectos adversos en la salud de los individuos, por lo general debe cumplir con los requisitos físicos, químicos y microbiológicos estipulados por la ley para ser aceptada como tal.

COAGULACIÓN: Es el proceso que neutraliza los sólidos suspendidos cargados en el agua. Como las partículas naturales son típicamente negativas, los coagulantes o productos químicos cargados positivamente se agregan al proceso para neutralizar la carga.

EFLUENTE: Aguas con presencia de desechos sólidos o líquidos que se generan en industrias y en el uso doméstico.

FILTRACIÓN: Es un proceso de separación sólido-líquido que se utiliza en los sistemas de tratamiento de agua para disminuir la concentración de sólidos suspendidos (partículas) que se encuentran en ella.

FLOCULACIÓN: Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

FLOTACIÓN DE AIRE DISUELTO: Es un proceso de clarificación de efluentes para la separación de sólidos, grasas y aceites.

IMPACTO SOCIAL: Son los cambios que experimentan las personas, grupos o comunidades como consecuencia del desarrollo de una actividad, proyecto, programa o política concreta y que afectan a las condiciones humanas en el largo plazo.

IMPACTO SOCIOHUMANÍSTICO: Son aquellos que tienen en cuenta la situación económica y regional de una comunidad.

LODOS: Los lodos consisten en una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales.

SEDIMENTACIÓN: Es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin.

TRATAMIENTO DE AGUA: Es un proceso con operaciones de distintos tipos (físico, químico o biológico) cuyo objetivo es la eliminación y reducción de la contaminación o de las características no deseables de las aguas.

RESUMEN

El dimensionamiento de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP) se realiza en función del caudal que surtirá a una determinada población. Una PTAP convencional cuenta con unidades de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. La sedimentación convencional también conocida como clarificación, es el proceso unitario en el cual se produce una separación física de los flocs generados en los procesos de coagulación y floculación. Los procesos de clarificación requieren de parámetros de diseño como la velocidad de sedimentación de partículas de flocs (V_m), la cual involucra, la densidad del agua, la densidad de las partículas, un coeficiente de arrastre, la aceleración de la gravedad y el diámetro medio de partículas de flocs (d_p). El presente trabajo de investigación tuvo como principal objetivo, evaluar y dimensionar unidades de sedimentación convencional para cinco diferentes aguas superficiales usando dos diferentes métodos de cálculo: Método I (usando un diseño teórico, asumiendo una carga hidráulica superficial inicial) y Método II (usando el tamaño medio de flocs, para calcular la carga hidráulica superficial). El tamaño medio de flocs empleados en esta investigación, fueron medidos en una investigación previa usando una técnica de análisis de imágenes y un teléfono celular (González-Galvis et al. 2022). Con esta técnica se encontraron tamaños medios de flocs en un rango de (68-277 μ m). Con los resultados obtenidos en la presente investigación, mostraron que las aguas más adecuadas para ser tratadas con sedimentación convencional son: 1) Soracá (Turbiedad inicial 5.95 UNT); 2) Ventaquemada (Turbiedad inicial 2.27 UNT) y 3) Tunja (Turbiedad inicial 3.61 UNT). Para las otras aguas probadas en esta investigación, (Boyacá -Boyacá, turbiedad inicial de 1.67 UNT y Turmequé, turbiedad inicial 0.53 UNT), se recomienda que sean tratadas vía filtración directa, es decir mediante coagulación, floculación y filtración, dado a su muy baja turbiedad. La investigación también arroja que el método de diseño I tiende a subdimensionar el área del sedimentador en comparación con el método de diseño II. Asimismo, el método I reduce el tiempo hidráulico de retención para algunas aguas, pero en general el número de Reynolds cumple para todos los sedimentadores calculados usando tanto el método I como el método II con valores menores a 20.000. Sin embargo, el número de Froude no cumplió para ninguno de los dos métodos utilizados en ninguna de las aguas usadas ya que los valores obtenidos fueron más grandes que 10^{-5} .

ABSTRACT

A drinking water treatment plant (WTP) design is based on the flowrate to be treated. A conventional WTP has coagulation, flocculation, sedimentation and filtration units. Conventional sedimentation, also known as clarification process, is a physical separation of flocs particles generated in the coagulation and flocculation steps. To be dimensioned the clarification units required design parameters such as the velocity sedimentation of floc particles (V_m), which include the water density, the density of the particles, a drag coefficient, the acceleration of the gravity and the mean particle diameter of flocs (d_p). The main objective of this research was to assess and design conventional sedimentation units for five different surface waters using two different methods: Method I (taking a hydraulic surface charge) and method II (using a mean flocs size for calculating the hydraulic surface charge). The mean floc size of five different waters used in this research was taken from the results reported by (González-Galvis et al. 2022) in which a flocs size imagen analysis technique and a cell phone camera was used. With this technique a mean floc sizes between (68-277 μ m) was found. The results obtained in this research showed that the waters that should be treated with sedimentation were: 1) Soracá (initial turbidity of 5.95 NTU); 2) Ventaquemada (initial turbidity of 2.27 NTU); and 3) Tunja (initial turbidity of 3.61 NTU). For the other two waters tested in this research it is recommended to be treated using direct filtration, or in other words (coagulation, flocculation, and filtration) due to their very low raw water turbidity (1.67 and 0.53 NTU, respectively). In addition, the results showed that the method I trend to undersize the sedimentation tank area in comparison with the method II. In the same way, the method I reduces the hydraulic retention time for some waters, but for all the waters treated the Reynold number was lower than 20.000, regardless of the design method used. However, the Froude number was not acceptable for any of the two methods used and for all the waters assessed in this research because the values obtained were higher than 10^{-5} .

1. INTRODUCCIÓN

Con el cambio climático actual, se esperan lluvias de mayor intensidad y periodos de sequía mucho más intensos, lo cual tendrá un impacto negativo sobre la calidad del agua en las fuentes superficiales, debido a un mayor aporte de sólidos, turbiedad, materia orgánica natural (MON) y algas (Gonzalez-Galvis et al., 2022a); (Fibras y normas de Colombia, 2019). Los sistemas actuales de tratamiento de agua potable en Boyacá y en general en Colombia son sistemas antiguos constituidos por filtración en múltiples etapas (FIME) (Cabrejo & Buitrago, 2008; Meneses, 2021). Estos sistemas se ven gravemente afectados por los impactos del cambio climático nombrados anteriormente, por lo cual deben ser optimizados adicionando unidades de coagulación, floculación más filtración (C/F/FT) o coagulación, floculación, sedimentación y filtración (C/F/S/FT), para garantizar una calidad adecuada del agua cumpliendo con lo establecido en la resolución 2115 de 2007. Los libros de diseño de plantas de tratamiento de agua potable (PTAPs), se basan en tablas de diseño que contienen parámetros sugeridos como por ejemplo la carga hidráulica y el tiempo hidráulico de retención entre otros (Villamizar, 2020; Lozano y Lozano, 2015). Sin embargo, la literatura no especifica el grado de confiabilidad de estos parámetros, para el diseño de unidades de sedimentación horizontal, los cuales son independientes de la turbiedad inicial del agua, la dosis optima de coagulante y el tamaño de flocs que se genera en una unidad de floculación. Por esta razón, la presente investigación comparo dos diferentes métodos de diseño de sedimentadores convencionales de flujo horizontal: Método I (usando un diseño teórico, asumiendo una carga hidráulica superficial inicial) y Método II (usando el tamaño medio de flocs para calcular la carga hidráulica superficial). El tamaño del floc, está relacionado directamente

con la turbiedad inicial del agua y la dosis óptima de coagulante (Gonzalez-Galvis et al., 2022b). Los resultados de la presente investigación mostraron que, el método de diseño I tiende a sub-dimensionar el área del sedimentador en comparación con el método de diseño II. Además, el método I reduce el tiempo hidráulico de retención para algunas de las aguas bajo estudio en comparación con el método II. En general, los resultados mostraron que el número de Reynolds cumple para todos los sedimentadores calculados usando tanto el método I como el método II. Sin embargo, el número de Froude no cumplió para ninguna de las aguas tratadas independientemente del método de diseño utilizado, ya que los valores obtenidos fueron más grandes que 10^{-5} .

2. OBJETIVO GENERAL

Comparar el diseño de unidades de sedimentación convencional para cinco diferentes aguas superficiales (Boyacá-Boyacá, Soracá, Turmequé, Tunja y Ventaquemada) de baja turbiedad y alcalinidad en Boyacá usando el método de Cálculo Unidades de Sedimentación con Velocidades de Sedimentación Asumidas de Libros de Diseño.diferentes y el método de Cálculo Unidades de Sedimentación con Velocidad basada en el Diámetro Medio de Partículas de Floccs .

1.2 Objetivos Específicos

- ❖ Comparar las dimensiones de tanques de sedimentación convencional para cinco diferentes aguas superficiales, asumiendo cargas hidráulicas superficiales versus cargas hidráulicas superficiales calculadas usando diámetro medio de floccs.
- ❖ Comparar los números de Reynolds y de Froude para el diseño de unidades de sedimentación para cinco diferentes aguas superficiales, asumiendo cargas hidráulicas superficiales versus cargas hidráulicas superficiales calculadas usando diámetro medio de floccs.
- ❖ Establecer una posible correlación entre algunas propiedades físicas de los floccs (ej. diámetro medio, área, perímetro y circularidad) y su posible impacto en su estructura y velocidad de sedimentación dentro de un tanque de sedimentación convencional.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En el presente capítulo, se exponen los principales procesos de tratamiento usados para tratar un agua cruda y llevarla a su potabilización, es así como se describirán los principales aspectos de los procesos de coagulación, floculación y clarificación (sedimentación convencional).

3.1 Coagulación y Floculación

El proceso de coagulación-floculación consiste en añadir al agua determinados aditivos químicos con el objetivo de desestabilizar la carga eléctrica de las partículas en el agua ya que estas por naturaleza traen una carga eléctrica negativa lo que provoca su repulsión. Por tal motivo, la adición de un coagulante permite la disminución de esta carga eléctrica negativa medida a través del potencial zeta con lo cual, favorece la formación de partículas más grandes llamadas flocs las cuales se removerán finalmente en procesos de clarificación como la sedimentación convencional. Una apropiada formación de flocs (ej. tamaño de partículas, medido como diámetro medio), puede beneficiar la velocidad de sedimentación reduciendo considerablemente el tiempo de retención hidráulico en esta unidad que normalmente puede estar entre 40 y 120 minutos (Trujillo, et al.,2014; Rodríguez, et al., 2007). Además, el proceso de coagulación-floculación es un método útil para la separación de partículas muy finas de naturaleza coloidal que presenta gran estabilidad en el agua, estos procesos requieren del establecimiento de una dosis optima de coagulante determinada a través de un ensayo de jarras en el laboratorio (Trujillo, et al.,2014).

Para romper la estabilidad de las partículas coloidales y poderlas separar del agua es necesario utilizar tres operaciones básicas las cuales son: coagulación, floculación, y

clarificación, la cual se puede hacer mediante unidades de sedimentación convencional, flotación por aire disuelto o sedimentación lastrada.

La floculación es el proceso unitario mediante el cual, se provee una mezcla lenta que incrementa el chance de colisión entre partículas de carga opuesta, permitiendo la unión entre estas, formando partículas más grandes llamadas flóculos o flocs, los flocs ya formados, aumentan su volumen y peso de forma que se pueden decantar en el siguiente proceso de clarificación (Trujillo, et al.,2014).

3.2 Sedimentación

La sedimentación es un proceso natural de decantación de partículas con mayor densidad que el agua gracias a la gravedad, que se realiza en tanques de sección rectangular, donde las partículas se desplazan horizontalmente y luego ganan velocidad vertical para sedimentar en el fondo del tanque. (Laino-Guanes et al., 2015).

El objetivo principal de los procesos de coagulación y floculación como antecesores de la sedimentación, es el de aumentar el tamaño de las partículas, de tal manera que estas puedan sedimentarse en un periodo razonable de tiempo (30 a 60 minutos) (MHW, 2012). Existen diferentes parámetros para calcular unidades de sedimentación convencional rectangular como, por ejemplo, la velocidad de sedimentación de las partículas de flocs, el número de Reynolds y el número de Froude. Sin embargo, uno de los más importantes es la velocidad de sedimentación de partículas de flocs (V_m) (Droste and Gehr, 2019). Existen tres tipos de sedimentación: 1) Sedimentación de partículas discretas; 2) sedimentación de partículas floculentas, o después de coagulación y floculación; 3) sedimentación obstaculizada, la cual se da en clarificadores de aguas residuales; y 4) sedimentación por compresión, la cual se da en

procesos de deshidratación de lodos. En los libros de diseño de plantas de tratamiento y por convención, estas categorías de sedimentación han sido llamadas como sedimentación Tipo I, Tipo II, Tipo III y Tipo IV, respectivamente (MHW, 2012).

La sedimentación tipo I ocurre en presedimentadores para la remoción de arenas, previo a los procesos de coagulación en agua potable, cuando se asientan las partículas de arena en un filtro después de un retro-lavado y en rejillas de cribado a la entrada de las plantas de tratamiento de agua residual. La sedimentación tipo II, es la que se presenta enseguida de los procesos de coagulación y floculación al adicionar coagulantes a base de aluminio o hierro. Este tipo de sedimentación es el más frecuente en unidades de sedimentación convencional. En este tipo de sedimentación, las partículas de flocs siguen rutas de sedimentación diferenciales debido a la diferencia entre tamaños que estas pueden presentar en una muestra de agua (Xiao, et. al. 2010), y es en este tipo de sedimentación sobre la cual se enfocará la presente investigación, por lo tanto, la sedimentación tipo I, III y IV no se evaluarán en la presente investigación.

3.2.1 Velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación de una partícula de floc en un tanque sedimentador sigue la ley de Stokes, la cual define esta velocidad bajo el postulado de que las partículas de flocs se asemejan a una esfera y caen al fondo de un sedimentador con flujo laminar, por lo tanto, la velocidad de sedimentación es directamente proporcional a la gravedad, la densidad del fluido, la densidad de la partícula y el diámetro de la partícula; e inversamente proporcional a la viscosidad dinámica del agua (MHW, 2012).

La velocidad de sedimentación se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{Q}{Pr * W * Nt} \quad (\text{Eq. 1})$$

En donde

Q= Caudal

Pr= Profundidad

W= Ancho del sedimentador

Nt= Número de Tanques

3.2.1.1 Fuerzas actuantes sobre partículas de flocs

En los procesos de sedimentación existen tres principales fuerzas actuantes sobre las partículas de flocs: 1) Fuerza de gravedad (F_g); 2) Fuerza de flotación (F_b); y 3) Fuerza de arrastre (F_d). La figura 1, representa las tres fuerzas actuantes sobre partículas de flocs en un proceso de sedimentación (MHW, 2012).

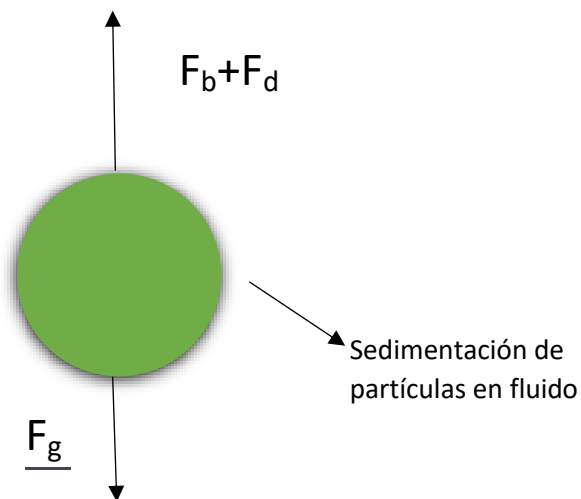


Figura 1. Fuerzas actuantes sobre partículas de flocs en un proceso de sedimentación

Fuente: Davis, 2010

Evaluar las fuerzas actuantes en una partícula de floc puede determinar, si un agua es susceptible a ser tratada mediante procesos de coagulación, floculación, y sedimentación o por el contrario si esta agua es susceptible de ser tratada con procesos

de coagulación, floculación, y flotación por aire disuelto. En esta investigación, se calcularon las diferentes fuerzas actuantes en una partícula de floc para cinco diferentes aguas superficiales en función del diámetro medio de floc. Estas gráficas se muestran en el capítulo 5, análisis de resultados.

3.2.2 Carga Hidráulica en Sedimentación

La carga hidráulica en una unidad de sedimentación está definida como la relación entre el caudal a tratar en la planta de tratamiento y el área de la unidad de sedimentación y esta se puede calcular mediante la ecuación 2. (Davis, 2010).

$$CH = \frac{Q}{A} \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde:

CH = Carga Hidráulica en ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)

Q = Caudal de diseño (m^3/d)

A = Área del sedimentador (m^2)

Por tal razón cargas hidráulicas altas requerirán una gran área en las unidades de sedimentación. Esta relación también establece la velocidad a la que pasa el caudal tratado en las unidades de sedimentación, por lo que las unidades simplificadas de este parámetro son (m/d). El rango de carga hidráulica recomendado, para el diseño de unidades rectangulares de flujo horizontal de sedimentación esta entre ($40\text{-}70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) (Davis, 2010).

3.2.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para el estudio de este, la importancia del número de Reynolds radica en la diferenciación de los coeficientes de niveles en un fluido (Jaramillo Diaz & Cárdenas Bañol 2015).

A continuación, se mostrarán brevemente los tipos de régimen por el cual se puede diferenciar los tipos de fluidos, cuando un fluido fluye a una velocidad baja y en líneas paralelas se conoce como flujo laminar; sin embargo, cuando el fluido aumenta la velocidad se le conoce como velocidad crítica, el flujo turbulento se caracteriza cuando el fluido se esparce y adquiere un movimiento de torbellino lo cual se forman corrientes cruzadas, como se muestra en la figura 2 (Jaramillo Diaz & Cárdenas Bañol 2015).

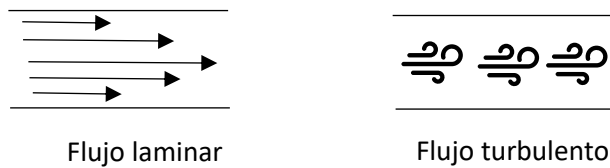


Figura 2. Representación flujo laminar y flujo turbulento

Fuente: Jaramillo Diaz & Cárdenas Bañol 2015

La ecuación del número de Reynolds es la siguiente:

$$Re = \frac{Rh * vs * pw}{\eta} \quad (\text{Eq. 3})$$

En donde:

Rh= Radio Hidráulico m

Pw= Densidad del agua kg/m³

Vs= Velocidad de sedimentación m/s

η= Viscosidad Cinemática m²/s

Para sedimentación, el número de Reynolds es recomendado con un valor menor a 20.000, ya que un numero de Reynolds mayor indica un alto grado de turbulencia en la zona de sedimentación, lo que puede producir un rompimiento de los flocs e interferir con su sedimentación, necesitando un tiempo más prolongado para su sedimentación (Davis, 2019).

3.2.4 Numero de Froude

El número de Froude es un parámetro de diseño de sedimentadores de flujo horizontal. Este se puede calcular conociendo la velocidad horizontal del fluido en el tanque, la gravedad y el radio hidráulico del tanque de sedimentación. La literatura recomienda que, para sedimentadores de flujo horizontal, el número de Froude sea mayor a 10^{-5} , ya que un número de Froude menor indica que el flujo en la zona de sedimentación no es dominante de flujo horizontal y por lo tanto, un retro-mezclado puede ocurrir, lo cual puede re-suspender las partículas de flocs que ya se han sedimentado en el fondo del tanque (Davis, 2019). El número de Froude se puede calcular usando la ecuación 4.

$$Fr = \frac{(Vf)^2}{g * Rh} \quad (\text{Eq. 4})$$

En donde

Vf = Velocidad de sedimentación

g= Gravedad

Rh= Radio Hidráulico

3.3 Tamaño de partículas de flocs y su impacto en sistemas de sedimentación y filtración convencional.

En un estudio conducido por (Jiao et. al., 2017), se estudió la influencia de los mecanismos de formación de flocs sobre el rendimiento del sistema de filtración para la remoción de partículas y turbiedad. El estudio fue llevado a cabo a nivel de laboratorio. La investigación comparó dos diferentes aguas, las cuales fueron coaguladas usando sulfato de aluminio. El estudio encontró que, la dosis óptima de coagulante que mejora las condiciones de filtrabilidad es mayor a la dosis óptima requerida para obtener la mejor

remoción de turbiedad para un pH neutro. El estudio también identificó que el mejor mecanismo que favorece la formación de flocs, en cuanto a crecimiento, velocidad de formación y tamaño, fue neutralización de cargas, en comparación con la floculación de barrido, en términos de remoción de carbono orgánico disuelto (COD) y filtrabilidad. Adicionalmente, ambas aguas mostraron una mejora en el ensayo de filtrabilidad en cuanto a remoción de turbiedad, cuando el agua cruda contiene una turbiedad alta. El estudio también concluye que una variada distribución de tamaño de flocs, formados bajo el mecanismo de neutralización de cargas favorece los procesos de filtración. Por el contrario, los flocs generados bajo el mecanismo de coagulación de barrido, favorecen los procesos de sedimentación gracias a la obtención de flocs más grandes, lo cual incrementa la eficiencia de los procesos de filtración. Sin embargo, el estudio no analizó la velocidad de sedimentación de flocs para las dos aguas bajo estudio y, por lo tanto, no se pudo establecer una conclusión sobre cuál de las dos aguas es más susceptible a ser tratada con procesos de sedimentación. Por esta razón, la investigación propuesta en este documento puede complementar y aportar a la literatura el impacto real que tiene el tamaño de flocs formados tratando aguas de baja turbiedad sobre procesos de sedimentación convencional.

En un estudio conducido por (Lou et al., 2012), se llevó a cabo la comparación de tres coagulantes, cloruro férrico (FeCl_3), cloruro férrico de poli-aluminio (CFPA) y sus combinaciones (FeCl_3 /CFPA). El estudio se llevó a cabo usando un ensayo de jarras convencional, para el tratamiento de un agua de baja temperatura ($<10^\circ\text{C}$) y baja turbiedad (1.5 – 8 UNT), tratando un agua superficial típica del norte de China recolectada a la entrada de una planta de tratamiento de agua potable. Los resultados del estudio

mostraron que la combinación de los dos coagulantes (FeCl_3 /CFPA), tuvo un rendimiento superior en comparación con el uso individual de cada uno en términos de remoción de turbiedad, materia orgánica natural (MON), cuantificada como (UV-254) y carbono orgánico disuelto (COD), con una dosis óptima de coagulante en el ensayo de jarras de 20 mg/L. El análisis de flocs formados con la combinación de coagulantes usando microfotografías tomadas con un escáner electrónico, mostro que los flocs tienen una estructura más compacta que los flocs formados con cada coagulante por separado, lo cual incrementa la sedimentabilidad de los flocs floculados. Sin embargo, el estudio no midió la circularidad de los flocs la cual pudo dar una correlación positiva entre la forma del floc y el grado de compactación de este a nivel estructural. Por esta razón, en la presente investigación, se hará un análisis entre la circularidad de los flocs, la velocidad de sedimentación calculada y su impacto en una unidad de sedimentación convencional, para cinco diferentes aguas superficiales con diferentes valores de turbiedad inicial y dosis óptimas de coagulante.

(Zou et al., 2011), condujo un estudio para comparar dos diferentes procesos de clarificación sedimentación convencional (SED) y flotación por aire disuelto (FAD), tratando un agua de reservorio de baja turbiedad, baja temperatura y alto contenido de materia orgánica natural (MON) en China. El experimento fue llevado a cabo usando una prueba de jarras convencional y una columna de flotación de vidrio. Los resultados mostraron que las FAD fue más efectiva que la SED, para la remoción de turbiedad y carbono orgánico total (COT). Sin embargo, el estudio no realizó una caracterización del tamaño de flocs formados y su impacto en ambos sistemas de clarificación. Por lo tanto, en esta investigación se podrá proveer una posible conclusión sobre la susceptibilidad de

tratar aguas de baja turbiedad con SED, en función del análisis del tamaño medio de floc, área y perímetro para cinco diferentes aguas superficiales en Boyacá.

En un estudio conducido por (Hajian et al., 2014), se llevó a cabo la comparación de dos sistemas de clarificación: 1) Flotación por aire disuelto (FAD); y 2) Sedimentación convencional (SED). Los experimentos se llevaron a cabo usando agua sintética, es decir, agua potable mezclada con caolín para obtener diferentes valores de turbiedad (20, 30, 50 y 90 UNT), respectivamente. El estudio encontró que, en promedio, la FAD fue superior a la SED en remoción de turbiedad, con porcentajes de 11 y 15%, respectivamente. El estudio también encontró que la FAD requirió menos dosis de coagulante que SED, en cuanto a la remoción de turbiedad. Sin embargo, el estudio no evaluó la incidencia de tamaño de flocs en el rendimiento de la FAD y la SED. Esto pudo generar una conclusión importante ya que los tiempos de floculación fueron diferentes en los ensayos de jarras (11 minutos para FAD a 30 rpm) y (35 minutos para SED a 30 rpm), lo cual pudo tener una diferencia marcada en la formación y tamaño de flocs. Sin embargo, el tiempo de clarificación fue el mismo para los dos procesos 30 minutos. A pesar de ser agua de turbiedad intermedia y alta (20 – 90 UNT), parece ser que el tamaño del floc no fue lo suficientemente grande para que la SED fuera superior a la FAD. Por esta razón, en la presente investigación se calcularán y analizarán velocidades de sedimentación para cinco diferentes aguas superficiales, lo cual permitirá aportar a la literatura sobre la susceptibilidad de tratar aguas de baja turbiedad (0.5 – 5.6 UNT) usando SED, o si por el contrario estos sistemas de tratamiento deberían incorporar FAD en un futuro cercano, para mejorar la calidad del agua cumpliendo incluso con estándares internacionales.

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La presente monografía de investigación se desarrolló en cinco diferentes fases:

4.1 Fase 1. Se realizó un análisis y depuración de los datos de las características físicas de flocs (ej. diámetro medio, área, perímetro y circularidad) encontrados para cinco diferentes aguas recolectadas a la entrada de las plantas de tratamiento de agua potable de los siguientes municipios: 1) Turmequé; 2) Boyacá-Boyacá; 3) Ventaquemada; 4) Soracá; y 5) Tunja, Boyacá. La caracterización de los flocs se llevó a cabo usando una metodología de bajo costo, cuyos resultados fueron producto de un proyecto de investigación Multicampus de la Universidad Santo Tomás Tunja y una Tesis de Maestría en Ingeniería Civil Área de Hidro ambiental.

4.2 Fase 2. En esta fase se programaron dos diferentes hojas de Excel, con las ecuaciones de diseño de unidades de sedimentación convencional para hacer una comparación de las dimensiones de tanques de sedimentación convencional para las cinco aguas mencionadas en la fase 1, calculando velocidades de flujo horizontal asumiendo cargas hidráulicas superficiales (Método I de diseño) versus cargas hidráulicas calculadas en base al tamaño medio de flocs (Método II de diseño).

4.3 Fase 3. En esta fase se llevó a cabo una comparación para el cumplimiento de parámetros de diseño como lo es el número de Reynolds y el número de Froude para el diseño de unidades de sedimentación convencional para las cinco diferentes aguas mencionadas en la fase 1, usando el método I y el método II de diseño.

4.4 Fase 4. En esta fase se realizó un análisis usando una regresión lineal para establecer una posible correlación entre algunas propiedades físicas de los flocs (ej. diámetro medio,

área, perímetro y circularidad) y su posible impacto en su estructura y velocidad de sedimentación en una unidad de sedimentación convencional.

4.5 Fase 5. En esta fase se llevó a cabo, la elaboración de una guía ilustrativa para el diseño, operación y mantenimiento de unidades de sedimentación convencional, tomando en cuenta la producción de lodos generada en base a la turbiedad inicial y la dosis óptima de coagulante usada, dejando recomendaciones útiles a los operadores y personal administrativo de cada una de las plantas de agua potable tomadas para este estudio.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la presente sección se mostrarán los resultados obtenidos durante la presentación, comenzando con las gráficas de fuerzas, velocidad de sedimentación, área, diámetro y volumen de flocs, y describiendo el paso a paso del cálculo de unidades de sedimentación por el método I y el método II, plantados en la presente investigación, y finalmente se presenta un análisis de correlación de entre diferentes parámetros físicos de flocs como diámetro vs circularidad, área vs perímetro y solidez vs diámetro.

5.1 Diámetro de las Partículas de Flocs

El diámetro de las partículas de flocs son formadas en el proceso de coagulación-floculación, lo cual permite determinar el área, volumen y la velocidad de sedimentación de las partículas (Restrepo, 2009).

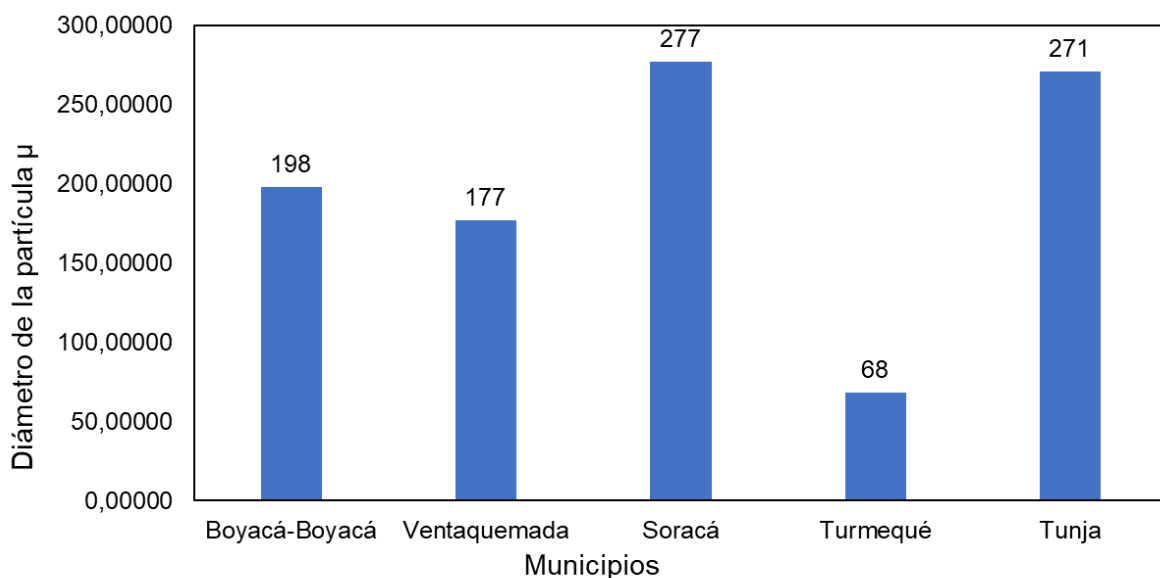


Figura 3. Diámetro medio de la partícula encontrada en cinco diferentes aguas superficiales en Boyacá.

Fuente: Autor

La figura 3, muestra el diámetro de las partículas de flocs, reportadas en un estudio publicado por (Gonzalez-Galvis et al., 2022). De acuerdo con los resultados reportados, el municipio con mayor diámetro medio de flocs que fueron formados en el ensayo de jarras fue Soracá con (277 μm). Tunja obtuvo un tamaño medio de flocs de 271 μm . Para el municipio de Turmequé, el diámetro medio de flocs correspondió al más pequeño con (68 μm). Para los municipios de Boyacá-Boyacá y Ventaquemada se reportó un tamaño medio de flocs de (198 μm y 177 μm), respectivamente, la diferencia de tamaños radica en la turbulencia.

5.2 Fuerzas actuantes sobre partículas de flocs

En la presente investigación, se calcularon las fuerzas actuantes sobre partículas de flocs, para cinco diferentes aguas de baja turbiedad y alcalinidad. Las muestras de agua fueron tomadas a la entrada de las plantas de tratamiento en los municipios de Boyacá-Boyacá, Ventaquemada, Soracá, Turmequé y Tunja, Boyacá. El valor del diámetro medio de las partículas de flocs para estas cinco aguas fueron tomadas de un estudio publicado por (Gonzalez-Galvis et al., 2022). Estos resultados se muestran en la figura 4, estos valores salen con la relación de los parámetros los cuales fueron densidad de la partícula, densidad del agua y fuerza de la gravedad.

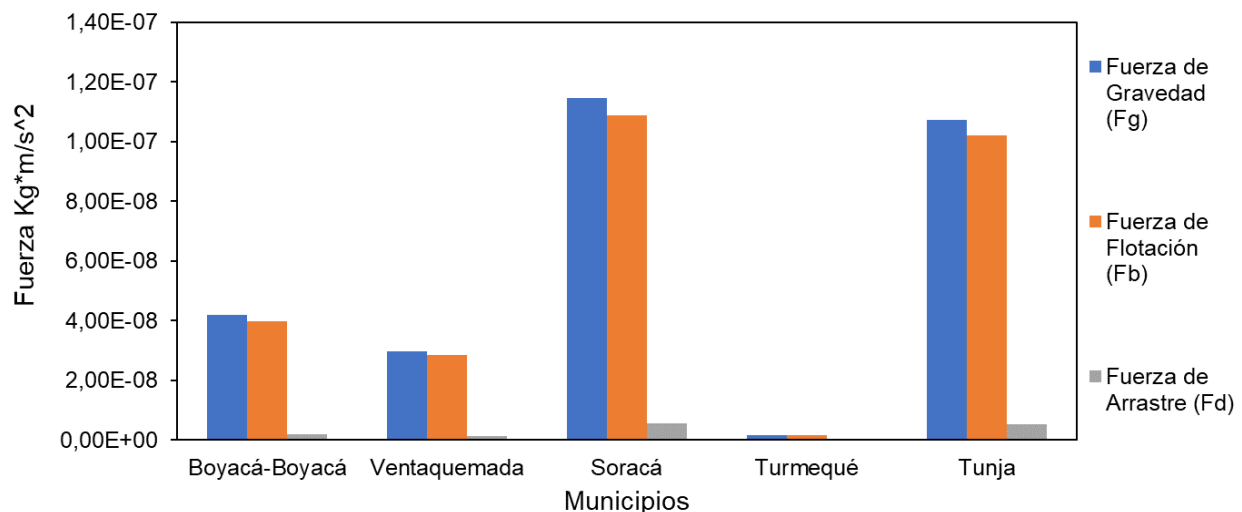


Figura 4. Fuerzas actuantes en sedimentación para diferentes diámetros medios de partículas de flocs.

Fuente: Autor

Como se puede observar en la figura 4, la fuerza de gravedad es mayor en las aguas de Soracá y Tunja. Estas fuerzas corresponden a un diámetro medio de flocs de (277 μ m y 271 μ m), respectivamente. Esto nos podría dar una primera aproximación para afirmar que las aguas de Soracá y Tunja son las más susceptibles de tratar con procesos de sedimentación. Sin embargo, las aguas de Ventaquemada y Boyacá-Boyacá, podrían requerir procesos de clarificación y se podría recomendar la flotación por aire disuelto, dado que estas aguas pueden presentar picos de turbiedad mayores a 2.0 UNT en invierno, con lo cual no sería suficiente su tratamiento con filtración en múltiples etapas como se hace actualmente en estos municipios. El agua de Turmequé es la que presenta el valor de fuerzas más bajo, dado su baja turbiedad inicial ($0,53 \pm 0.02$ UNT), y una dosis de coagulante de (40 mg L^{-1}), lo cual produjo un tamaño medio de floc de (181 μ m). Esta agua no es necesario tratarla con procesos de clarificación dado a sus condiciones de baja turbiedad inicial, la cual estaría cumpliendo con los valores límites de la resolución 2115 de 2007 para turbiedad con un valor de (2.0 UNT), por lo cual un tratamiento con filtración en múltiples etapas (FIME) será suficiente para remover partículas de sólidos que puedan ser arrastrados hacia la planta de tratamiento. Sin embargo, para los propósitos de comparación y de acuerdo con los objetivos de la presente investigación, esta agua se incorporó en los cálculos de sedimentación.

5.3 Velocidad de sedimentación

Dado que la velocidad de sedimentación es un parámetro importante para el diseño de unidades de sedimentación convencional, se presenta a continuación en la figura 5, la velocidad de sedimentación calculada con la ecuación (Eq. 1) usando el diámetro de partículas de flocs encontrado para las aguas de Boyacá-Boyacá, Ventaquemada, Soracá, Turmequé y Tunja, Boyacá, cuyo valor de diámetro medio de partículas de flocs se tomaron del estudio publicado por (Gonzalez-Galvis et al., 2022)

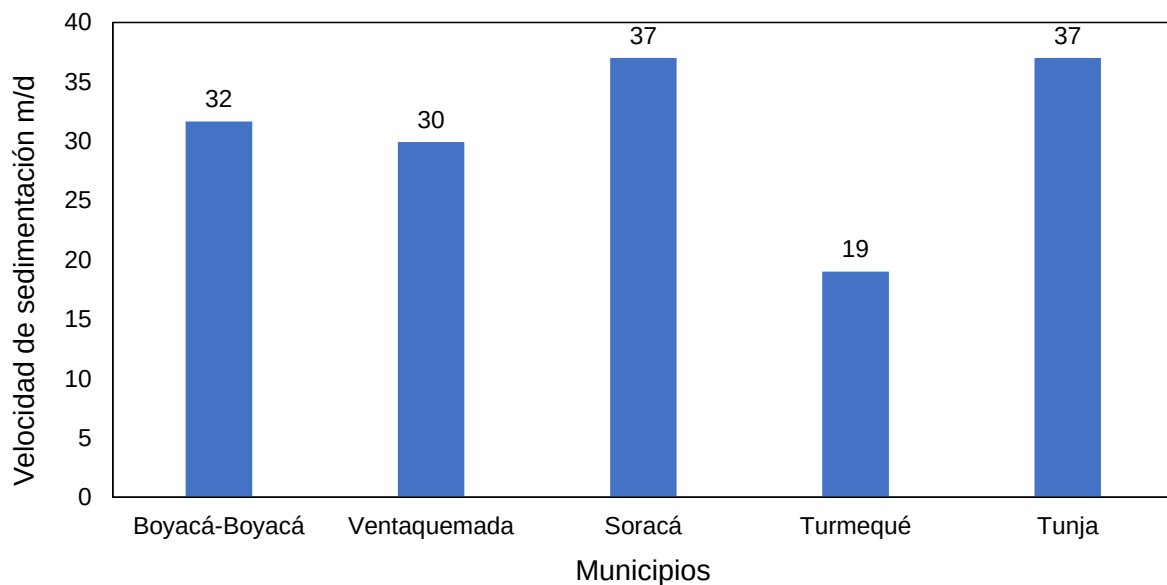


Figura 5. Velocidad de sedimentación calculada usando diámetro medio de flocs para cinco diferentes aguas

Fuente: Autor

Como se muestra en la figura 5, las partículas de flocs con mayor velocidad de sedimentación (37 m/d), corresponden a las aguas de Soracá y Tunja, Boyacá, respectivamente. Esta velocidad de sedimentación corresponde a diámetros medios de partículas de flocs de (277 μ m y 271 μ m), para Soracá y Tunja, respectivamente. Adicionalmente, la turbiedad inicial de cada agua corresponde a 5.95 UNT y 2.0 UNT, y

una dosis óptima de coagulante de 20 y 24 mg/L como Al_2O_3 , respectivamente. De acuerdo con la literatura, la velocidad mínima de sedimentación encontrada en partículas de flocs coaguladas con sulfato de aluminio es de 48 m/d (MHW, 2012). De acuerdo con los resultados encontrados para las velocidades de sedimentación, para las aguas de Soracá y Tunja, esta velocidad es inferior a la reportada en libros de diseño de unidades de sedimentación, por esta razón asumir una velocidad mínima de 48 m/d, podría impactar negativamente el diseño de las unidades de sedimentación. Actualmente, la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Tunja es la única que cuenta con unidades de sedimentación convencional. La PTAP de Soracá, actualmente cuenta con unidades de filtración en múltiples etapas (FIME). Las partículas de flocs encontradas en las aguas de Boyacá-Boyacá y Ventaquemada, Boyacá tuvieron velocidades de sedimentación similares, con valores de 32 y 30 m/d respectivamente. Finalmente, las partículas de flocs con menor velocidad de sedimentación fueron las correspondientes al agua tomada a la entrada de la PTAP de Turmequé, Boyacá, con un valor de 19 m/d. Dado a las bajas velocidades de sedimentación, encontradas en estas cinco aguas analizadas, las bajas temperaturas incidieron a ralentizar la velocidad de sedimentación ya que a más baja temperatura la viscosidad aumenta, para la presente investigación calculará unidades de sedimentación convencional con los valores aquí reportados y comparará el diseño conducido con velocidades de sedimentación asumidas y/o recomendadas en libros de diseño de PTAPs.

5.4 Área de las partículas de flocs

El área es un concepto importante para dar información sobre la medida de la extensión de la superficie de las partículas de flocs de cada municipio, dado que las

partículas de flocs se forman en el proceso de floculación. La figura 6 muestra las áreas de flocs para las cinco diferentes aguas bajo estudio en esta investigación.

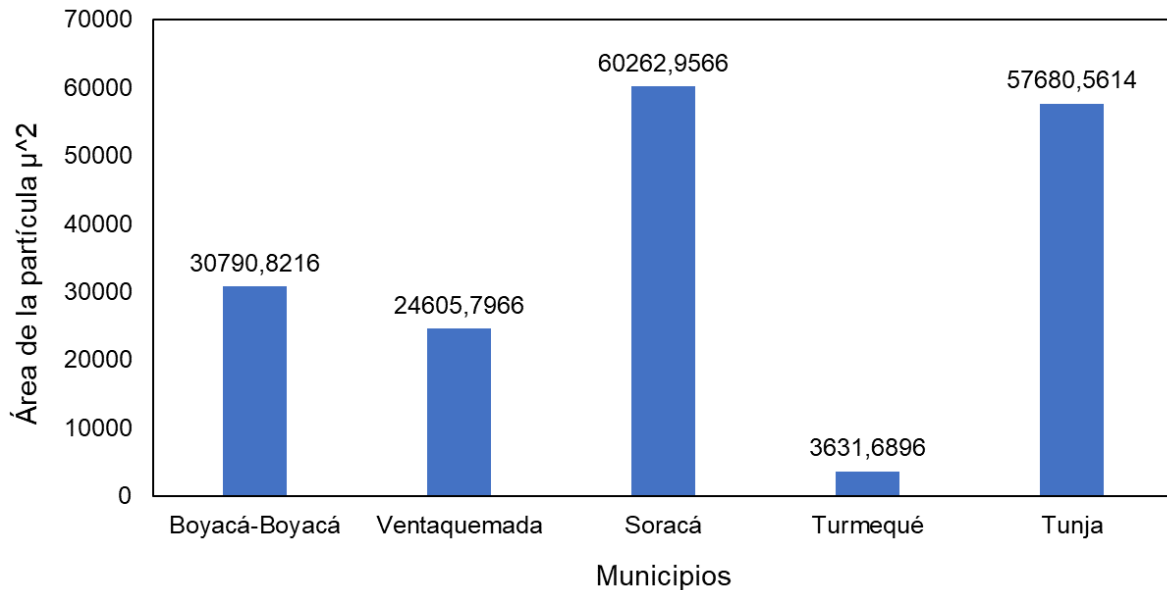


Figura 6. Área de flocs calculada a partir del diámetro medio para cinco diferentes aguas

Fuente: Autor

En la figura 6, se puede observar que en el municipio de Soracá las partículas de flocs tienen un área de ($60262,95 \mu m^2$) siendo el de mayor área en comparación con los demás municipios, esta área corresponde a un diámetro medio de floc de ($277 \mu m$). Para el municipio de Turmequé el área encontrada fue de ($3631,68 \mu m^2$) siendo el valor más bajo de todos los municipios, esto es debido a que el diámetro medio de floc encontrado también corresponde al más bajo de todas las cinco aguas ($68 \mu m$). Para el municipio de Tunja se encontró un área promedio de flocs de ($57680,56 \mu m^2$) siendo el segundo más grande después de Soracá. Para los municipios de Boyacá-Boyacá y Ventaquemada, se encontró un área media de flocs de ($30790,82 \mu m^2$ y $24605,79 \mu m^2$), respectivamente.

5.5 Volumen de las Partículas de Floccs

El volumen de una partícula de floccs es un parámetro importante calculado a partir del diámetro, este parámetro es significativo para poder hallar el valor de la fuerza de gravedad y la fuerza de flotación. La figura 7 muestra el volumen medio de floccs calculado para las cinco diferentes aguas bajo estudio.

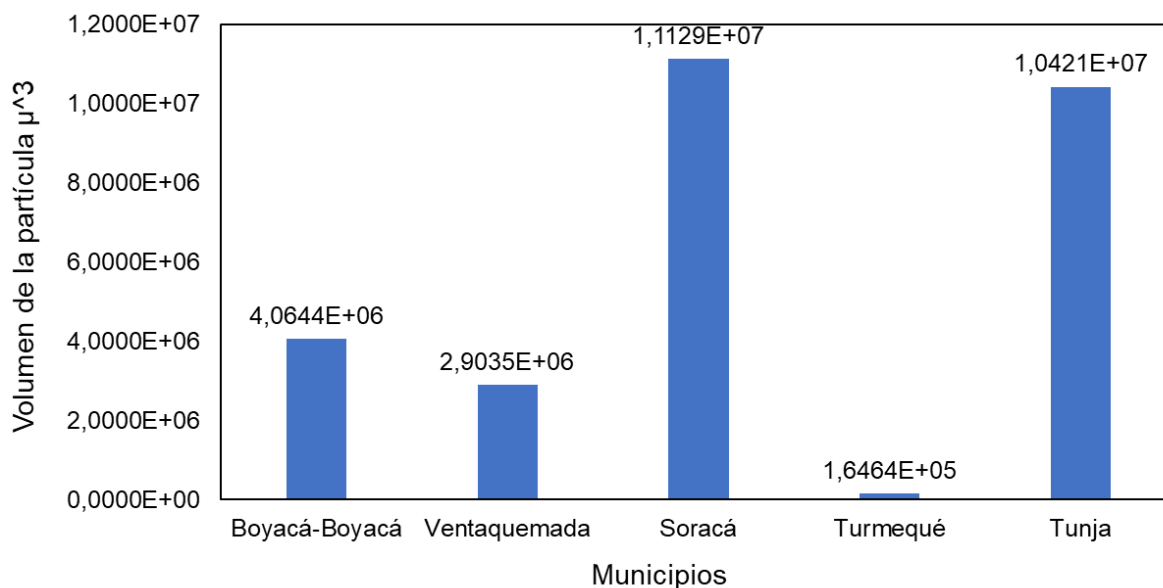


Figura 7. Volumen de la partícula de floccs encontrados en cinco diferentes aguas superficiales en Boyacá.

Fuente: Autor

Como se muestra en la figura 7, los municipios de Soracá y Tunja obtuvieron un volumen medio de partículas de floccs de ($1,1129E+07 \mu m^3$ y $1,0421E+07 \mu m^3$), respectivamente; siendo los municipios con mayor volumen de partículas de floccs. Para los municipios de Boyacá-Boyacá y Ventaquemada, se encontró un volumen medio de

partículas de flocs de $(4,0644\text{E}+06 \mu\text{m}^3$ y $2,9035\text{E}+06 \mu\text{m}^3)$, respectivamente. El municipio con el menor volumen de partículas de flocs fue Turmequé con un valor de $(1,6464\text{E}+05 \mu\text{m}^3)$.

5.6 Ejemplo de Calculo Unidades de Sedimentación con Velocidades de Sedimentación Asumidas de Libros de Diseño.

En la presente sección se muestra el procedimiento para calcular las unidades de sedimentación usando una carga hidráulica asumida o método de diseño I para la ciudad de Tunja. En la tabla 1 se muestran los datos asumidos y el caudal que trata actualmente la PTAP Veolia aguas de Tunja.

Tabla 1. Datos de entrada para ejecutar el método I de diseño de sedimentadores de flujo horizontal.

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad del sedimentador	2,0	m
Carga Hidráulica (CH)	40	$\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}^2$
Número de Tanques (n)	4,0	UN
Temperatura del agua	12,0	°C
Viscosidad cinemática	0,0012360000	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Densidad del Agua (kg/m^3)	999,5	kg/m^3
Caudal (Q)	230	L/s
Gravedad (g)	9,8	m/s^2

Fuente: Autor

Para calcular el caudal por sedimentador se pasó el caudal de litros por segundo a metro cubico por día de la siguiente manera:

$$Q = 230 \frac{\text{L}}{\text{s}} * \frac{1\text{m}^3}{1000 \text{ L}} * \frac{86400 \text{ s}}{1\text{d}} = 19872 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Realizado lo anterior y asumiendo 4 tanques sedimentadores, se procedió a calcular el caudal por sedimentación de la siguiente manera:

$$Q(Sed) = \frac{19872 \frac{m^3}{d}}{4} = 4968 \frac{m^3}{d}$$

El siguiente paso es calcular el área de cada sedimentador, para el cálculo del área se tuvo en cuenta, el caudal por sedimentador y la carga hidráulica asumida.

$$A(Sed) = \frac{4968 \frac{m^3}{d}}{40 \frac{m^3}{d * m^2}} = 124,2 m^2$$

Una vez calculada el área de cada sedimentador, se calculó el valor del ancho del sedimentador, tomando una relación largo/ancho (L/W) de 4:1, de la siguiente manera:

$$W = \sqrt{\frac{124,2 m^2}{4}} = 5,6 m$$

También se calculó la longitud del sedimentador, en donde se tuvo en cuenta los valores del área y ancho del sedimentador.

$$L = \frac{124,2 m^2}{5,6 m} = 22,3 m$$

Calculado lo anterior se procedió a calcular la relación largo/ancho y largo/profundidad, para determinar si cumple o no cumple, el procedimiento se realizó de la siguiente manera:

Para la relación largo ancho

$$L = \frac{22,3 m}{5,6 m} = 4$$

Para la relación longitud profundo

$$L = \frac{22,3 m}{2 m} = 11$$

Siendo el dos el valor de la profundidad de tanque asumida.

Después se calculó el tiempo de retención, pero en primer lugar se pasó el caudal de litro por segundo a metro cúbico por segundo de la siguiente manera:

$$Q = 230 \frac{L}{s} * \frac{1m^3}{1000L} = 0,23 \frac{m^3}{s}$$

El cálculo del tiempo hidráulico de retención es el siguiente:

$$t = \frac{(5,6m * 22,3m * 2m) * 4}{(0,23 \frac{m^3}{s} * \frac{3600s}{1h})} = 1,2 h$$

En donde se tuvo en cuenta el ancho, la longitud, la profundidad, el número de tanques, el caudal y la cantidad de segundos que tiene una hora.

El siguiente paso es calcular la velocidad de sedimentación utilizando la siguiente ecuación:

$$Vs = \frac{4968 \frac{m^3}{d}}{(2m * 5,6m * 4)} = 111,45m/d$$

Se cambiaron las unidades de velocidad de sedimentación de metro por día a metro por segundo para observar si cumplía los parámetros.

$$Vs = 111,45 \frac{m}{d} * \frac{1 d}{86400 s} = 0,0013 \frac{m}{s}$$

Para observar si los parámetros cumplían se realizó la conversión de metros por segundo a metros por minuto.

$$Vs = 0,0013 \frac{m}{s} * \frac{60 s}{1min} = 0,077 \frac{m}{min}$$

En donde se tuvo en cuenta el caudal por sedimentador, el ancho del sedimentador y el número de tanques.

Se calculó el valor del radio hidráulico para posteriormente calcular el número de Reynolds.

$$Rh = \frac{(5,6m * 2m)}{(5,6m + 2 * 2m)} = 1,16m$$

Para el cálculo del radio hidráulico se tuvo en cuenta el ancho del sedimentador y la profundidad.

A continuación, se muestra cómo se calculó el número de Reynolds utilizando la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{(1,16m * 0,0013 \frac{m}{s} * 999,5 \frac{Kg}{m^3})}{0,0012360000 \frac{m^2}{s}} = 1214$$

En donde se tuvo en cuenta el radio hidráulico, velocidad de sedimentación, densidad del agua y la viscosidad cinemática.

Finalmente se calculó el número de Froude de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{(0,0013 \frac{m}{s})^2}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1,16m} = 1.45 \times 10^{-7}$$

En donde se tuvo en cuenta la velocidad de sedimentación, la gravedad y el radio hidráulico.

5.7 Ejemplo de Calculo Unidades de Sedimentación con Velocidad basada en el Diámetro Medio de Partículas de Flocc (Método II)

En la presente sección se muestra el procedimiento para calcular las unidades de sedimentación usando una carga hidráulica calculada en base al tamaño medio de flocc o método de diseño II para la ciudad de Tunja.

En la tabla 2 se muestran los datos de entrada los cuales son los siguientes:

Tabla 2. Datos de entrada para ejecutar el método II de diseño de sedimentadores de flujo horizontal.

Parámetro	Valor	Unidad
Profundidad	2,0	m
Número de Tanques (n)	3,0	UN
Temperatura del agua	12,0	°C
Densidad del Agua (kg/m)	999,5	kg/m ³
Viscosidad dinámica	0,00123500	
Densidad de flocc	1050	kg/m ³
Viscosidad cinemática	0,0012360000	
Gravedad (g)	9,8	m/s ²
Diámetro de la Partícula (dp)	271	µm
Caudal (Q)	230	L/s

Fuente: Autor

Para calcular el caudal por sedimentador se pasó el caudal de litros por segundo a metro cubico por día de la siguiente manera:

$$Q = 230 \frac{L}{s} * \frac{1m^3}{1000 L} * \frac{86400 s}{1d} = 19872 \frac{m^3}{d}$$

Realizado lo anterior se procedió a calcular el caudal por sedimentación de la siguiente manera, asumiendo 4 tanques de sedimentación:

$$Q(Sed) = \frac{19872 \frac{m^3}{d}}{4} = 4968 \frac{m^3}{d}$$

Se realizó la conversión de unidades en el diámetro de la partícula de flocs de micrómetros a metros de la siguiente manera:

$$dp = 271 \mu m * \frac{1m}{1000000 \mu m} = 2,71 * 10^{-0.4} m$$

El siguiente paso es realizar el cálculo de velocidad de sedimentación teniendo en cuenta la gravedad, densidad del agua, densidad de flocs y viscosidad cinemática de la siguiente manera:

$$V_s = \frac{9,8 \frac{m}{s^2} * \left(1050 \frac{Kg}{m^3} * 999,5 \frac{Kg}{m^3} \right) * (2,71 * 10^{-0.4} m)}{18 * 0,00123500 \frac{m^2}{s}} = 0,00165 \frac{m}{s}$$

Para el cálculo del área de cada sedimentador se debe tener en cuenta el caudal por sedimentador y la velocidad de sedimentación en metro por día, por lo tanto, se realizó una conversión de unidades en la velocidad de sedimentación.

$$V_s = 0,00165 \frac{m}{s} * \frac{1s}{86400 \text{ min}} = 141 \frac{m}{d}$$

Teniendo lo anterior se calcula el área de cada sedimentador de la siguiente manera:

$$A(Sed) = \frac{19872 \frac{m^3}{d}}{141 \frac{m}{d}} = 140,7 m^2$$

A continuación, se calcula el ancho del sedimentador teniendo en cuenta el valor del área de cada sedimentador de la siguiente manera:

$$W = \sqrt{\frac{140,7 \text{ m}^2}{4}} = 5,93\text{m}$$

Con el valor el ancho del sedimentador se calculó la longitud de la siguiente manera:

$$L = \frac{140,7 \text{ m}^2}{5,93 \text{ m}} = 23,7 \text{ m}$$

Calculado lo anterior se procedió a calcular la relación para determinar si cumplía o no cumplía, el procedimiento se realizó de la siguiente manera:

Para la relación largo ancho

$$L = \frac{23,7 \text{ m}}{5,93 \text{ m}} = 4$$

Para la relación longitud profundo

$$L = \frac{23,7 \text{ m}}{2 \text{ m}} = 12$$

Siendo el dos el valor de la profundidad.

El siguiente paso es calcular tiempo de retención el cual depende de los siguientes parámetros: Ancho del sedimentador, longitud del sedimentador, profundidad, número de tanques, caudal y la cantidad de segundos que tiene una hora.

$$t = \frac{(5,93\text{m} * 23,7\text{m} * 2\text{m}) * 3}{(0,23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{3600\text{s}}{1\text{h}})} = 1,02 \text{ h}$$

El siguiente paso es calcular la velocidad de sedimentación utilizando la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{6624 \frac{m^3}{d}}{(2m * 5,93m * 3)} = 186,16m/d$$

Se cambio las unidades de velocidad de sedimentación de metro por día a metro por segundo para observar si cumplía los parámetros.

$$V_s = 186,16 \frac{m}{d} * \frac{1 d}{86400 s} = 0,0022 \frac{m}{s}$$

Para observar si los parámetros cumplían se realizó la conversión de metros por segundo a metros por minuto.

$$V_s = 0,0022 \frac{m}{s} * \frac{60 s}{1min} = 0,129 \frac{m}{min}$$

En donde se tuvo en cuenta el caudal por sedimentador, el ancho del sedimentador y el número de tanques.

Se calculó el valor del radio hidráulico para posteriormente calcular el número de Reynolds.

$$Rh = \frac{(5,93m * 2m)}{(5,93m + 2 * 2m)} = 1,19m$$

Para el cálculo del radio hidráulico se tuvo en cuenta el ancho del sedimentador y la profundidad.

A continuación, se muestra cómo se calculó el número de Reynolds utilizando la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{(999,5 \frac{Kg}{m^3} * 0,0022 \frac{m}{s} * 1,19)}{0,0012360000 \frac{m^2}{s}} = 2081$$

En donde se tuvo en cuenta el radio hidráulico, velocidad de sedimentación, densidad del agua y la viscosidad cinemática.

Finalmente se calculó el número de Froude de la siguiente manera:

$$Fr = \frac{(0,0022 \frac{m}{s})^2}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1,19m} = 3.96 \times 10^{-7}$$

En donde se tuvo en cuenta la velocidad de sedimentación, la gravedad y el radio hidráulico.

Los resultados de diseño de las unidades de sedimentación horizontal, para las cinco diferentes aguas y comparando el método de cálculo I y el método de cálculo II, se resumen en las tablas 3 a la 7.

En la tabla 3 Se muestra los resultados que se obtuvieron por los dos métodos para el municipio de Soracá.

Tabla 3. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Soracá, Boyacá.

Municipio y Parámetros	Parámetro de referencia	Método I Carga Hidráulica Asumida	Cumplimiento Parámetro de Diseño	Método II Tamaño de flocs	Cumplimiento Parámetro de Diseño
Soracá		40 m ³ /m ² *d			
Área (m ²)	NA	3.65 m ²	-	2.0 m ²	-
Longitud (m)	NA	3.8 m	-	2.8 m	-
Ancho (m)	NA	1.0 m	-	0.7 m	-
Tiempo hidráulico de	1.5 – 4.0 horas	0.9 h	No cumple	0.65	No cumple

retención (minutos)					
Relación Largo-Ancho	4:1	4:1	Cumple	4:1	Cumple
Relación Largo-Profundo	15:1	3:1	No cumple	3:1	No cumple
Velocidad de Sedimentación	0.3 – 1.1 m/min	0.035	No cumple	0.0016	No cumple
Número de Reynolds	<20.000	173	cumple	16.91	Cumple
Número de Froude	>10 ⁻⁵	9,79 x 10 ⁻⁸	No cumple	8,65 x 10 ⁻¹¹	No cumple

Fuente: Autor

En la tabla 3 se muestran los resultados calculados de las unidades de sedimentación en donde el área dio mayor en el método II que en el método I, el tiempo de retención hidráulico es un poco bajo en los dos métodos. El número de Froude no cumple para los dos métodos; sin embargo, el número de Reynolds cumple las condiciones en ambos métodos.

Tabla 4. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Ventaquemada, Boyacá.

Municipio y Parámetros	Parámetro de referencia	Método I Carga Hidráulica Asumida	Cumplimiento Parámetro de Diseño	Método II Tamaño de flocs	Cumplimiento Parámetro de Diseño
Ventaquemada		40 m ³ /m ² *d			
Área (m ²)	NA	7.47 m ²	-	19.8 m ²	-
Longitud (m)	NA	5.5 m	-	8.9 m	-
Ancho (m)	NA	1.4 m	-	2.2 m	-
Tiempo hidráulico de retención (minutos)	1.5 – 4.0 horas	1.2 h	No cumple	2.4	Cumple
Relación Largo-Ancho	4:1	4:1	Cumple	4:1	Cumple
Relación Largo-Profundo	15:1	3:1	No cumple	4:1	No cumple

Velocidad de Sedimentación	0.3 – 1.1 m/min	0.019	No cumple	0.020	No cumple
Número de Reynolds	<20.000	130	cumple	199.73	Cumple
Número de Froude	>10 ⁻⁵	2,0058 x 10 ⁻⁸	No cumple	1,70 x 10 ⁻⁸	No cumple

Fuente: Autor

La tabla 4 muestra los resultados para el cálculo de las unidades de sedimentación en donde se puede observar que el área calculada por el método I es de 7,47m² y el área calculada por el método II es de 19,8m² lo cual quiere decir que por el método II el área es mayor, el tiempo hidráulico de retención el método I no cumple sin embargo en el método II si cumple ya que el valor del tiempo de retención es de 2,4 horas y está dentro del rango recomendado en los libros de diseño de PTAPs, en el número de Reynolds cumple en los dos métodos; sin embargo, en el número de Froude no cumple por ninguno de los 2 métodos.

Tabla 5. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Tunja, Boyacá.

Municipio y Parámetros	Parámetro de referencia	Método I Carga Hidráulica Asumida	Cumplimiento Parámetro de Diseño	Método II Tamaño de flocs	Cumplimiento Parámetro de Diseño
Tunja		40 m ³ /m ² *d			
Área (m ²)	NA	124 m ²	-	140 m ²	-
Longitud (m)	NA	22 m	-	23.7 m	-
Ancho (m)	NA	5.6 m	-	5.9 m	-
Tiempo hidráulico de retención (minutos)	1.5 – 4.0 horas	1.2 h	No cumple	1.02	No cumple
Relación Largo-Ancho	4:1	4:1	Cumple	4:1	Cumple
Relación Largo-Profundo	15:1	11:1	No cumple	12:1	No cumple

Velocidad de Sedimentación	0.3 – 1.1 m/min	0.077	No cumple	0.129	No cumple
Número de Reynolds	<20.000	1214	cumple	2081.08	Cumple
Número de Froude	>10 ⁻⁵	1.45 x 10 ⁻⁷	No cumple	3.96 x 10 ⁻⁷	No cumple

Fuente: Autor

Como se puede observar en la tabla 5 el área es mayor por el método II que por el método I. El tiempo de retención no cumple las condiciones en ninguno de los 2 métodos, el número de Reynolds cumple en ambos métodos; sin embargo, en el número de Froude no cumple en ninguno de los dos métodos.

Tabla 6. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Boyacá-Boyacá, Boyacá.

Municipio y Parámetros	Parámetro de referencia	Método I Carga Hidráulica Asumida	Cumplimiento Parámetro de Diseño	Método II Tamaño de flocs	Cumplimiento Parámetro de Diseño
Boyacá-Boyacá		40 m ³ /m ² *d			
Área (m ²)	NA	0.54 m ²	-	1.2 m ²	-
Longitud (m)	NA	1.5 m	-	2.16 m	-
Ancho (m)	NA	0.4 m	-	0.54 m	-
Tiempo hidráulico de retención (minutos)	1.5 – 4.0 horas	1.2 h	No cumple	1.9	Cumple
Relación Largo-Ancho	4:1	4:1	Cumple	4:1	Cumple
Relación Largo-Profundo	15:1	1:1	No cumple	1:1	No cumple
Velocidad de Sedimentación	0.3 – 1.1 m/min	0.005	No cumple	0.006	No cumple
Número de Reynolds	<20.000	12	cumple	20.18	Cumple
Número de Froude	>10 ⁻⁵	4.42 x 10 ⁻⁹	No cumple	4.71 x 10 ⁻⁹	No cumple

Fuente: Autor

En la tabla 6 se puede observar que en el método I el área es menor que en el método II, el tiempo hidráulico de retención cumple solamente en el método II, el número de Reynolds cumple en ambos métodos; sin embargo, en el número de Froude no cumple en ninguno de los dos métodos.

Tabla 7. Resumen de cálculo sedimentador de flujo horizontal municipio de Turmequé, Boyacá.

Municipio y Parámetros	Parámetro de referencia	Método I Carga Hidráulica Asumida	Cumplimiento Parámetro de Diseño	Método II Tamaño de flocs	Cumplimiento Parámetro de Diseño
Turmequé		40 m ³ /m ² *d			
Área (m ²)	NA	5.6 m ²	-	102 m ²	-
Longitud (m)	NA	4.8 m	-	20.2 m	-
Ancho (m)	NA	1.2 m	-	5.0 m	-
Tiempo hidráulico de retención (minutos)	1.5 – 4.0 horas	1.2 h	No cumple	16	No cumple
Relación Largo-Ancho	4:1	4:1	Cumple	4:1	Cumple
Relación Largo-Profundo	15:1	2:1	No cumple	10:1	No cumple
Velocidad de Sedimentación	0.3 – 1.1 m/min	0.017	No cumple	0.0069	No cumple
Número de Reynolds	<20.000	102	cumple	104.25	Cumple
Número de Froude	>10 ⁻⁵	1.68 x 10 ⁻⁸	No cumple	1.22 x 10 ⁻⁹	No cumple

Fuente: Autor

Como se muestra en la en la tabla 7 el área calculada por el método II es mayor que el área calculada por el método I, así mismo se puede observar que el tiempo hidráulico de retención no cumple en ninguno de los 2 métodos, al igual que el número de Froude tampoco cumple en ninguno de los 2 métodos; sin embargo, en el número de Reynolds si cumple las condiciones por ambos métodos.

5.8 Análisis de Correlación

La Regresión lineal fue usada en esta investigación para determinar la correlación entre diferentes propiedades físicas de los flocs medidos en cinco diferentes aguas superficiales en Boyacá. La correlación lineal permite investigar la posible relación entre dos variables involucradas, una variable independiente (x), también conocida como variable predictora y una variable dependiente (y), también conocida como variable predicha (Brown, & Berthouex, 2002). En el presente trabajo, se investigó la correlación entre diámetro del flocs, área, perímetro y circularidad.

5.8.1 Coeficiente de correlación.

Una forma de determinar qué tan fuerte es una correlación entre una variable (x) y una variable (y) y si esta es positiva, o negativa, es a través del coeficiente de correlación (r), el cual tiene un rango de valor entre -1 y +1; en donde -1 significa una correlación fuerte negativa y +1 significa que las variables poseen una fuerte correlación positiva. El coeficiente de correlación se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum(x_i - \hat{x})(y_i - \hat{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \hat{x})^2 \sum(y_i - \hat{y})^2}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Donde:

x_i = Valores de diámetro de flocs (μm)

y_i = Valores de área de flocs (μm^2)

$\hat{x}$ = Promedio diámetro de flocs (μm)

$\hat{y}$ = Promedio área de flocs (μm^2)

5.8.2 Correlación entre perímetro y área de flocs

En este caso, calculando el coeficiente de correlación (r) para analizar las variables de diámetro de flocs versus área de flocs encontrados en el agua de Soracá, Boyacá, se encontró un $r = 0.96$. esto quiere decir que existe una correlación fuerte positiva entre estas dos variables. Es decir, a mayor perímetro mayor área de flocs obtenida. Con esto es posible entonces concluir que flocs con perímetros grandes describirán áreas grandes y por lo tanto serán susceptibles a sedimentarse fácilmente.

Otra forma de comprobar la correlación entre una variable (x) y una variable (y), es a través del **coeficiente de determinación (R)**. En este caso, usando un método grafico se pudo determinar el R , para las variables perímetro de flocs vs área encontrados en el agua de Soracá-Boyacá (Figura 8).

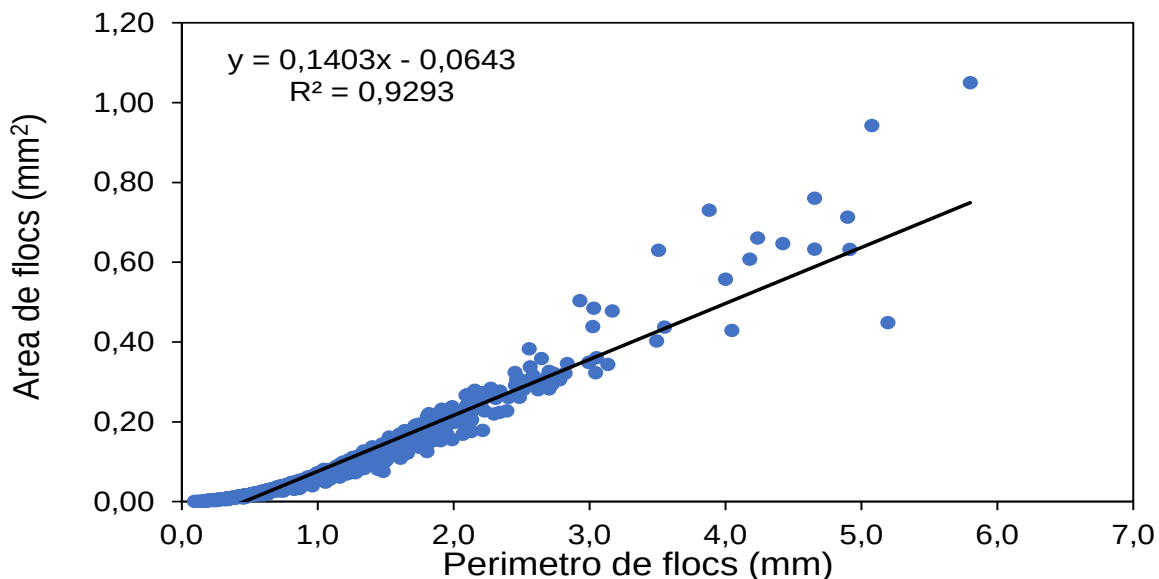


Figura 8. Regresión lineal perímetro de flocs versus área de flocs Soracá

Fuente: Autor

Como se puede observar en la gráfica 6, existe una correlación fuerte positiva entre el perímetro del floc y su área, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.93$. Los valores para el cálculo del R^2 , se pueden determinar conduciendo un análisis de varianza (ANOVA) tabla 8). Este valor de R^2 , es calculado dividiendo el residual de la suma de cuadrados (celda en amarillo) entre el error puro de la suma de cuadrados (celda en verde), $(11,53927116 \div 12,41691906) = 0,929318384317108$.

Tabla 8. Análisis de varianza para la correlación perímetros de flocs vs área Soracá-Boyacá

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	11,53927116	11,53927116	16027,35166	0
Residuos	1219	0,877647901	0,000719974		
Total	1220	12,41691906			

Fuente: Autor

5.8.3 Correlación entre diámetro de floc y circularidad

Analizando la correlación entre diámetro de floc y circularidad, se encontró en esta investigación que el coeficiente de correlación ($r = -0.67$). Esto quiere decir que existe una correlación moderada negativa entre el diámetro del floc y la circularidad; por lo tanto, diámetros grandes ($180 \mu\text{m}$) de flocs tienden a tomar valores de circularidad por debajo de 0.5 y diámetros pequeños de flocs ($\leq 80 \mu\text{m}$) tienden a tomar valores de circularidad mayores a 0.6.

El **coeficiente de determinación (R^2)**, para la correlación entre diámetro de floc y circularidad se muestra en la Figura 9.

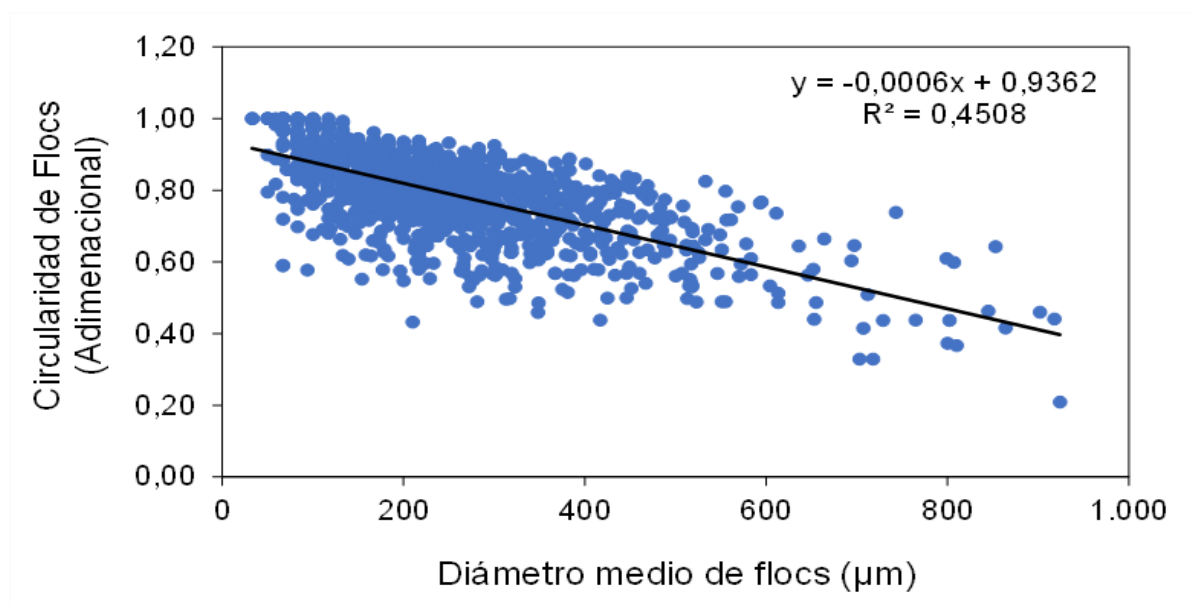


Figura 9. Regresión lineal diámetro de flocs versus circularidad Soracá

Fuente: Autor

Como se observa en la figura 9, existe una correlación baja entre el diámetro del floc y la circularidad con $R^2 = 0.45$. En este caso los valores para el cálculo del R^2 , se determinaron a través de un análisis de varianza (ANOVA), el cual se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Análisis de varianza para la correlación diámetro de flocs vs circularidad Soracá-Boyacá

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	8,049650768	8,049650768	1017,25063	8,2414E-163
Residuos	1219	9,646122598	0,007913144		
Total	1220	17,69577337			

Fuente: Autor

5.8.4 Correlación entre diámetro de floc y solidez

El coeficiente de correlación entre diámetro y solidez es de ($r = -0,26$) lo que quiere decir que existe una correlación negativa baja es decir a mayor diámetro mayor solidez de la partícula de floc.

El **coeficiente de determinación (R^2)**, para la correlación entre diámetro de floc y solidez se muestra en la figura 10.

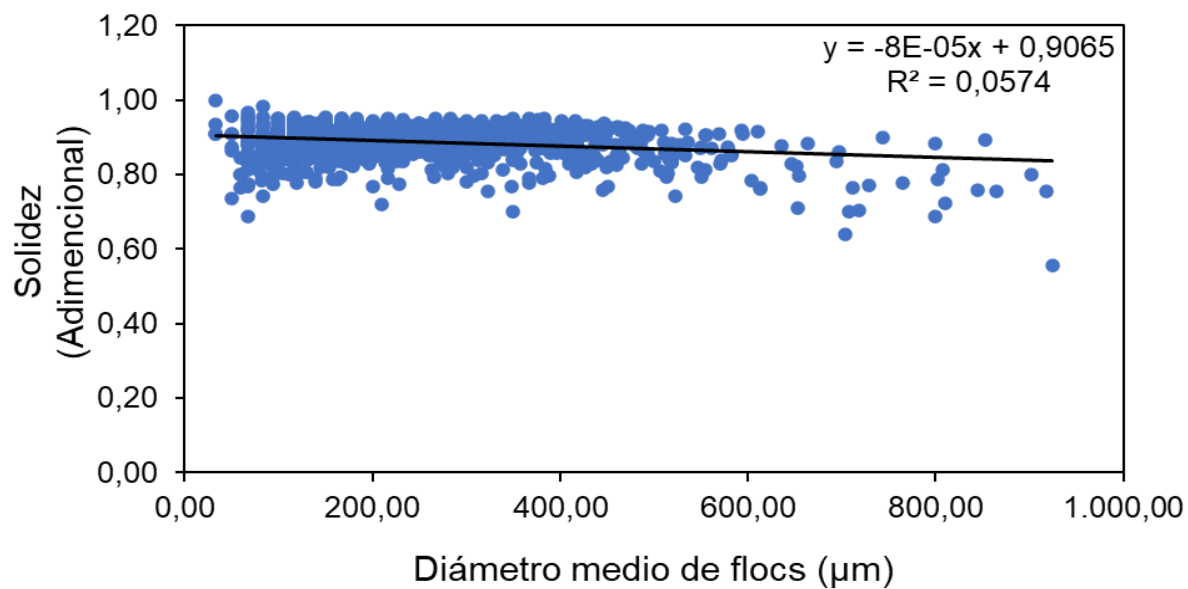


Figura 10. Regresión lineal solidez versus diámetro medio de floc Soracá

Fuente: Autor

Como se muestra en la tabla 10 la correlación del R^2 es de 0,057 lo que quiere decir es que la correlación es muy baja entre el diámetro de floc y solidez.

Tabla 10. Análisis de varianza para la correlación diámetro de flocs vs solidez Soracá-Boyacá

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	0,159540848	0,159540848	89,6983372	1,38587E-20
Residuos	1219	2,168159404	0,001778638		
Total	1220	2,327700252			

Fuente: Autor

En la tabla 11 se puede observar coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Tunja.

Tabla 11. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Tunja

Parámetro	Coeficiente de correlación (r)	Coeficiente de determinación (R^2)	Correlación (r)	Determinación (R^2)
Diámetro vs Circularidad	-0,54	0,29	Negativa Moderada	Baja
Área vs Perímetro	0,91	0,83	Alta	Alta
Solidez vs Diámetro	-0,053	0,0028	Negativa Baja	Baja

Fuente: Autor

Como se puede evidenciar en la Tabla 11 del municipio de Tunja, existe una correlación baja en el diámetro vs circularidad de flocs, así mismo se ve la misma correlación en la solidez vs diámetro de flocs existiendo una correlación alta en el área vs el perímetro. Con respecto al coeficiente de determinación (R^2) se encontró que en el diámetro vs circularidad de flocs y solidez vs diámetro de flocs la correlación es baja, en cambio el área vs perímetro es alta.

En la tabla 12 se puede observar coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Ventaquemada.

Tabla 12. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Ventaquemada

Parámetro	Coeficiente de correlación (r)	Coeficiente de determinación (R^2)	Correlación (r)	Determinación (R^2)
Diámetro vs Circularidad	-0,47	0,21	Negativa Baja	Baja
área vs perímetro	0,96	0,92	Alta	Alta
Solidez vs Diámetro	0,21	0,046	Baja	Baja

Fuente: Autor

La tabla 12 muestra que el coeficiente de correlación (r) es negativa baja para el diámetro vs circularidad de floc y baja para la solidez vs diámetro del floc, en cambio para el área vs parámetro se observa una correlación alta. Para el coeficiente de determinación (R^2) se observa que para el diámetro vs circularidad y solidez vs diámetro es baja y para el área vs diámetro es alta.

En la tabla 13 se puede observar coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Turmequé.

Tabla 13. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Turmequé

Parámetro	Coeficiente de correlación (r)	Coeficiente de determinación (R^2)	Correlación (r)	Determinación (R^2)
Diámetro vs Circularidad	-0,34	0,012	Negativa Baja	Baja
área vs perímetro	0,96	0,93	Alta	Alta
Solidez vs Diámetro	0,21	0,045	Baja	Baja

Fuente: Autor

Como se puede observar en la tabla 13 el coeficiente de correlación para el diámetro vs circularidad es negativa baja, a su vez para el área vs perímetro es alta y para la solidez vs diámetro es baja. Para el coeficiente de determinación (R^2) se puede encontrar una correlación baja en los parámetros de diámetro vs circularidad y solidez vs diámetro, en cambio el área vs perímetro se encuentra una correlación alta.

En la tabla 14 se puede observar coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Boyacá-Boyacá.

Tabla 14. Coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) del municipio de Boyacá-Boyacá.

Parámetro	Coeficiente de correlación (r)	Coeficiente de determinación (R^2)	Correlación (r)	Determinación (R^2)
Diámetro vs Circularidad	-0,48	0,23	Negativa Baja	Baja
área vs perímetro	0,95	0,92	Alta	Alta
Solidez vs Diámetro	0,11	0,013	Baja	Baja

Fuente: Autor

En la tabla 14 se muestra la correlación que existe entre el diámetro vs circularidad lo cual es una correlación negativa baja, sin embargo, para el coeficiente de determinación es bajo, para el área vs el perímetro la correlación y determinación es alta para los dos coeficientes, en el parámetro de solidez vs diámetro tanto el coeficiente de correlación y de determinación es baja.

6. IMPACTOS

6.1 Impacto Social

El presente proyecto de investigación tiene una pertinencia social alta, ya que contribuirá a mejorar los actuales sistemas de potabilización de agua, para cinco diferentes municipios de Boyacá, incluyendo la ciudad de Tunja. Esto permitirá no solamente optimizar el diseño de unidades de sedimentación convencional a nivel local sino también a nivel regional, nacional e internacional. La presente investigación dejara un pequeño aporte a la literatura del diseño de plantas de tratamiento al comparar dos métodos de diseño de sedimentadores convencionales de flujo horizontal nunca reportado en libros y/o artículos de investigación para diseño de plantas de tratamiento de agua potable.

6.2 Impacto humanístico

6.2.1 Económico

Reducción de gastos para la población porque ya no comprarán agua potable comercial y podrán adquirir este servicio de manera económica y de mejor calidad.

6.2.1 Regional

Actualización de las estructuras de sedimentaciones actualmente usadas, y proyectar nuevas unidades, equipadas con una mejor capacidad de retirar partículas contaminantes que se mantienen en el agua, como partículas productoras de turbiedad, materia orgánica natural, la cual actúa como precursora de subproductos de la desinfección como lo son los trihalometanos y los ácidos halo acéticos.

7. CONCLUSIONES

Con la presente investigación se observó que en el método II no cumplió el rango del tiempo de retención lo cual puede aumentar la turbiedad del agua y a su vez bajar la calidad de la sedimentación.

El presente trabajo de investigación tuvo como principal objetivo evaluar y dimensionar unidades de sedimentación convencional para cinco diferentes aguas superficiales usando dos diferentes métodos de cálculo: Método I (usando un diseño teórico, asumiendo una carga hidráulica superficial inicial) y Método II (usando el tamaño medio de flocs, para calcular la carga hidráulica). Las principales conclusiones de esta investigación fueron las siguientes:

De acuerdo con el dimensionamiento de las unidades de sedimentación, y al cumplimiento de parámetros de diseño como el número de Reynolds, las aguas más adecuadas para ser tratadas con sedimentación convencional fueron: 1) Soracá (Turbiedad inicial 5.95 UNT); 2) Ventaquemada (Turbiedad inicial 2.27 UNT) y 3) Tunja (Turbiedad inicial 3.61 UNT).

Las otras aguas bajo estudio en la presente investigación mostraron no ser susceptibles a tratar con sedimentación convencional, (Boyacá-Boyacá, turbiedad inicial de 1.67 UNT y Turmequé, turbiedad inicial 0.53 UNT), por lo tanto, para estas aguas, se recomienda que sean tratadas vía filtración directa, es decir mediante coagulación, floculación y filtración, dado a su muy baja turbiedad inicial.

La presente investigación demostró que el método I tiende a sub-dimensionar el área del sedimentador en comparación con el método II. Asimismo, el método I reduce el tiempo hidráulico de retención para algunas aguas. Por lo tanto, se recomienda en lo posible

ejecutar el diseño de unidades de sedimentación de flujo horizontal convencional usando el método II, es decir, usando el diámetro medio de flocs para calcular la carga hidráulica superficial.

En general el número de Reynolds como parámetro esencial de diseño, cumple para todos los sedimentadores calculados usando tanto el método I como el método II con valores menores a 20.000.

El número de Froude no cumplió para ninguno de los dos métodos utilizados en ninguna de las aguas usadas en esta investigación, ya que los valores obtenidos fueron más grandes que 10^{-5} . Esto pudo ser debido en gran medida al bajo caudal que tratan las plantas de Soracá y Turmequé. Se recomienda entonces, introducir módulos para dividir los tanques en su interior para de esta manera dar cumplimiento al número de Froude.

El análisis de correlación conducido en esta investigación mostró que para todas las aguas existe una correlación alta entre el área del floc y su perímetro, esto puede decir que la dosis óptima de coagulantes permite flocs bien formados y compactos. Además, parámetros como diámetro y circularidad presentaron una correlación baja negativa, lo que implicaría que el diámetro del flocs no interfiere en la circularidad que este adopte. Finalmente, se encontró una correlación baja entre la solidez de los flocs y el diámetro, por lo tanto, se puede afirmar que la solidez no depende del tamaño del flocs sino, probablemente, de la turbiedad inicial del agua y de la dosis optima de coagulante.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda diseñar las unidades de sedimentación convencional usando el método II, es decir conociendo el diámetro medio de flocs, lo cual permite tomar en cuenta en el diseño la turbiedad inicial del agua y la dosis optima de coagulante, ya que estos parámetros son responsables del tamaño de los flocs.

Se recomienda modelar con varias cargas hidráulicas para elegir la más adecuada en términos del cumplimiento del número de Reynolds, numero Froude y el tiempo hidráulico de retención, cuando se adopte el método I para el diseño de sedimentadores convencionales de flujo horizontal, ya que una carga hidráulica errónea podría impactar negativamente el dimensionamiento del tanque sedimentador, así como el tiempo hidráulico de retención.

Se recomienda, proveer una adecuada capacitación al personal (operarios) de las diferentes plantas de tratamiento cuando se implementen unidades de sedimentación como complemento a los sistemas de filtración, ya que es importante hacer un buen mantenimiento de estas unidades en referencia a la remoción de lodos y lavado de la misma, además de monitorear permanentemente los valores de turbiedad a la salida de las unidades de sedimentación.

Bibliografía

Basto Villamizar, E. y. (2020). análisis de los parámetros de calidad de agua utilizada en los procesos de la empresa gloria Colombia, según los parámetros establecidos en la resolución 2115 del 2007.

Brown, L. C. & Berthouex, P. M. (2002). Statistics for Environmental Engineers (1a ed.). CRC Press.

Cabrejo, M. H., & Buitrago, J. P. (2018). Evaluación hidráulica de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Toguí Boyacá.

Davis, M. L. (2010). Water and wastewater engineering: design principles and practice. McGraw-Hill Education.

Droste, R. & Gehr, R. (2019) Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment (2nd Ed.). John Wiley & Sons, New Jersey, NY.

Fibras y normas de Colombia, (2019). Plantas de tratamiento de agua potable–PTAP: Funcionamiento y tipos.

González-Galvis, J. P. y Narbaitz, R. M. (2022). Sistema de flotación por aire disuelto a escala de banco de grandes lotes para simular la eliminación de turbidez a gran escala. Tecnología ambiental, 43(12), 1791-1804.

González-Galvis, J.P., Jaramillo, A. M. & Martínez, A. F., (2022). Low-cost methodology for the characterization of floc size in low turbidity and low alkalinity waters using image analysis. Water Practice and Technology, 17 (4), 887.

Jaramillo Diaz, J. D., & Cardenas Bañol, H. A. (2015). Número de Reynolds.

Jiao, R., Fabris, R., Chow, C. W., Drikas, M., van Leeuwen, J., Wang, D., & Xu, Z. (2017). Influence of coagulation mechanisms and floc formation on filterability. Journal of Environmental Sciences, 57, 338-345.

Laino-Guanes, R. M., Bello-Mendoza, R., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Jiménez-Otárola, F., & Musálem-Castillejos, K. (2015). Concentración de metales en

agua y sedimentos de la cuenca alta del río Grijalva, frontera México-Guatemala. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 61-74.

Lou, I., Gong, S., Huang, X., & Liu, Y. (2012). Coagulation optimization for low temperature and low turbidity source water using combined coagulants: a case study. *Desalination and water treatment*, 46(1-3), 107-114.

Lozano Rivas. W. y Lozano Bravo.G. (2015). *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*. Editorial Universidad Piloto de Colombia.

MWH. (2012) *Water Treatment: Principles and Design* (2nd Ed.). John Wiley & Sons, New Jersey, NY.

Restrepo Osorno, H. A. (2009). Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. *Ingeniería Química*.

Rodríguez, J. P., Lugo, I. P., Rojas, A. V., & Malaver, C. (2007). Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. *Umbral científico*, (11), 8-16.

Torres Meneses, Y. L. (2021). Optimización de la planta de tratamiento de agua potable-PTAP del municipio de Firavitoba, Boyacá.

Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17-34.

Xiao, F., Yi, P., Pan, X.R., Zhang, B.J. & Lee, C. (2010) Comparative study of the effects of experimental variables on growth rates of aluminum and iron hydroxide flocs during coagulation and their structural characteristics. *Desalination* 250, 902–907.

Zou, J., Zhu, J. T., Pan, C., & Ma, J. (2011). Estudio comparativo del proceso de flotación y sedimentación por aire disuelto para el tratamiento de agua de embalse con baja temperatura, baja turbidez y alta materia orgánica natural. En *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 71, pp. 2767-2771). Trans Tech Publicaciones Ltd.

Anexos