

Aplicación de Frecuencias de Ondas Sonoras para Precipitar los Sólidos

Suspendidos y Disueltos en el Agua Natural a Escala Piloto

Rabbi Hurtado Delgado

PhD Carolina Aristizábal Ciro

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Tecnología en Saneamiento Ambiental

Septiembre 2021

Dedicatoria

Solo quienes a mi lado han permanecido, con su perenne amor e inquebrantable paciencia; saben de los continuos esfuerzos por materializar este trabajo de grado.... Con mucho cariño dedicado a mi esposa, e hijos (as)

Agradecimientos

Por tu constante acompañamiento, por la generosidad de tu conocimiento, por tu voz amiga que invita a perseverar, por tu búsqueda inquieta para con mis propósitos, por tu sonrisa sincera llena de expectativas y confiada en el fructuoso final, por concederme el honor de ser mi asesora... Mil gracias profe Carolina Aristizábal.

Resumen

La turbiedad es quizás el parámetro de normativo cumplimiento que más fácilmente puede identificar el usuario final de agua potable, su remoción en los procesos convencionales de tratamiento se realiza mediante procesos de coagulación–floculación–sedimentación. El uso de compuestos de aluminio como coagulante puede generar una concentración residual de este compuesto en el agua tratada, lo que ha sido asociado con problemas en la salud humana y ecosistemas acuáticos. Con el fin de proponer alternativas de tratamiento, en este trabajo de investigación se evaluó, a escala prototipo, la aplicación de ondas sonoras para precipitar los sólidos suspendidos disueltos en el agua natural de la cuenca La Valeria. Mediante un diseño de experimentos se definió un tiempo de exposición de 106 min y frecuencia de 183.2 Hz, como el mejor tratamiento, en el rango evaluado, alcanzándose una remoción alrededor del 66%. Estas condiciones fueron reproducidas y comparadas con la obtenida en los procesos convencionales llevados a cabo en la PTAP –EPM, ubicada en el municipio de Caldas Antioquia, cuya captación se toma de la misma cuenca. Es

evidente que esta es una tecnología prometedora para la remoción de turbiedad en aguas naturales.

Tabla de Contenido

Planteamiento del problema	11
Justificación.....	14
Objetivos	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
Marco conceptual	18
Calidad y tratamiento convencional de agua potable	18
Ondas sonoras	21
Tratamiento de agua con ondas sonoras	23
Metodología	26
Agua de estudio y caracterización.....	26
Diseño y construcción planta prototipo a escala piloto	28
Diseño del prototipo	30
Generador de frecuencias de ondas sonoras.....	31
Diseño experimental.....	34
Selección de factores y niveles.....	34

Muestreo de agua natural	37
Diseño de experimentos	39
Comparación de resultados.....	41
Resultados	42
Agua de estudio y caracterización	42
Diseño y construcción planta prototipo	53
Diseño experimental	56
Selección de factores y niveles.....	56
Muestreo de agua natural	64
Diseño de experimentos	66
Comparación de resultados	77

Conclusiones	81
Recomendaciones	83
Referencias Bibliográficas	85_91
Anexos	92
Anexo A	92_96
Anexo B	97_108
Anexo C	109_113

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros máximos aceptables de calidad del agua potable _____	18
Tabla 2. Ensayos preliminares _____	35
Tabla 3. Esquema de muestreo_____	38
Tabla 4. Diseño experimental _____	40
Tablas 5 a 12. Caracterización agua natural y de distribución del 05 al 08 de Octubre de 2020_____	44-51
Tabla 13. Ensayos preliminares_____	59- 60
Tabla 14. Diseño experimental final _____	63
Tabla 15. Datos de turbiedad para muestra compuesta_____	64
Tabla 16. Ensayos realizados de acuerdo al diseño experimental_____	67_68
Tabla 17. Análisis de Varianza para % Remoción de la Turbiedad_____	69
Tabla 18. Combinación de niveles de factores _____	75
Tabla 19. Ensayos finales valores de entrada _____	78
Tabla 20. Ensayos finales valores de salida _____	79

Lista de Figuras

Figura 1. Planta de tratamiento convencional	20
Figura 2. Ubicación cuenca la Valeria	27
Figura 3. Tanques de sedimentación PTAP Calda	29
Figura 4. Pantalla de app frequency generator	33
Figura 5. Plano prototipo	55
Figura 6. Foto planta prototipo.....	56
Figura 7. Efectos principales en la remoción de turbiedad	72
Figura 8. Interacción tiempo frecuencia en la remoción de turbiedad.....	74
Figura 9. Regresión lineal para calcular el tiempo exacto de exposición.....	77

Planteamiento del Problema

En los procesos convencionales de tratamiento de agua potable, uno de los parámetros que presenta mayor relevancia es la turbiedad y su consecuente eliminación, Salamanca. (2017), puesto que además de ser un parámetro de normativo cumplimiento, Valor máximo permisible para Colombia 2 UNT– según la Resolución Número 2115 (2007), su presencia en el agua tratada puede ser fácilmente identificada por el usuario final.

Para la remoción de turbiedad, sólidos suspendidos y sólidos disueltos, en las plantas de tratamiento actuales, y específicamente en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Caldas EPM, se utiliza un sistema de coagulación–floculación–sedimentación donde se requiere la aplicación de policloruro de aluminio (PAC) como coagulante y de una poliacrilamida catiónica como ayudante de floculación, previo al paso del agua por el proceso de filtración; donde la tarea de remoción de las restantes partículas suspendidas y disueltas debe completarse.

El uso de policloruro de aluminio como coagulante, ha demostrado ser efectivo en los procesos de coagulación floculación, Salamanca (2017),

permitiendo que en la planta de potabilización se cumpla con los requerimientos técnicos y de calidad del agua, sin embargo, persiste una concentración residual de este compuesto que debe controlarse. La aplicación de compuestos de aluminio al agua natural, indica por consiguiente que la presencia de este elemento en el agua de distribución será mayor a la concentración hallada en el agua cruda, Tomperi et al. (2013). El límite de aluminio aceptable en agua potable varía según el país, entre 0.03 a 0.2 mg/L Vázquez & Montoya. (2004) y para Colombia, el valor máximo permitido del residual de aluminio derivado de su uso como coagulante en el tratamiento de agua para consumo humano es de 0,2 mg/L, MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE. (2007)

El aluminio residual en aguas potables ingresa al cuerpo humano a través del tracto gastrointestinal. Se han reportado síntomas menores por la ingesta como náuseas, vómito, diarrea, úlceras y dolor artrítico, Tomperi et al.(2013), sin embargo, la exposición crónica a este compuesto en su forma tóxica (Al^{3+} , $Al(OH)_2^+$ $Al(OH)^{2+}$) también ha sido asociada con diversos problemas de salud, específicamente la acumulación de aluminio en el cerebro se ha relacionado con

problemas neurodegenerativos, incluyendo el alzhéimer, el Parkinson, encefalopatía, esclerosis lateral amiotrófica, entre otros, Sieliechi et al.(2010). Adicionalmente Christopher Exley, evidenció que una cantidad de apenas 0.2 mg/L de aluminio, era suficiente para matar alevines en los acuarios, y con dosis no letales de este elemento, los salmones perdían su sentido de orientación y no podían enrutarse a las aguas donde habían nacido y a donde regresan cada año a desovar,Exley et al. (1997)

Este trabajo de investigación propone la evaluación de frecuencias de ondas sonoras para desestabilizar y precipitar los sólidos suspendidos y sólidos disueltos en el agua natural a escala piloto, con el fin de buscar alternativas que permitan disminuir el uso de compuestos químicos en los procesos de coagulación-floculación y de esta manera mitigar los posibles efectos de la presencia de este compuesto en aguas potables y naturales sobre los seres humanos y los ecosistemas acuáticos.

Justificación

La producción de agua potable adecuada y segura para el consumo, es una prioridad mundial para salvaguardar la salud y el bien estar de los seres humanos, Aristizabal-Ciro et al. (2017). La turbiedad es quizás el parámetro de normativo cumplimiento, que más fácilmente puede identificar el usuario final de agua potable, su remoción en las plantas convencionales de tratamiento se realiza mediante procesos de coagulación-floculación-sedimentación, procesos que en la actualidad permiten el cumplimiento de la normativa vigente, sin embargo, el uso de policloruro de aluminio como coagulante, ha generado la presencia de aluminio residual en el agua de distribución que puede llegar al usuario final. Algunos estudios han evidenciado que la ingesta de este compuesto de manera crónica puede afectar el sistema neurológico ocasionado enfermedades degenerativas, incluyendo el alzhéimer, el Parkinson, encefalopatía, esclerosis lateral amiotrófica, entre otros, Sieliechi et al. (2010) adicionalmente, se ha reportado afectaciones en algunas especies acuáticas, Exley et al. (1997). Con el fin de disminuir el uso de compuestos de aluminio como coagulante, es necesario evaluar la aplicación de tratamientos

alternativos que permitan mitigar el uso y por consiguiente el efecto de la presencia de estos compuestos en los ecosistemas acuáticos y en el agua para consumo humano.

El uso de ondas acústicas en el tratamiento de agua potable es una alternativa en auge que toma fuerza, toda vez que se ha podido evidenciar y registrar, la reducción de contaminantes en cuerpos de agua expuestos a diferentes frecuencias y potencias (W), Tang Yun-Lin, Gao Nai-Yun. (2007). Específicamente, el uso de frecuencias ultrasónicas de 28KHz y 60W con 1h de exposición han arrojado altas remociones en la turbiedad (Doosti et al., 2012). Por otra parte, la aplicación de frecuencias perceptibles al oído humano podría representar una alternativa viable para la desestabilización y precipitación de los sólidos suspendidos y sólidos disueltos en el agua, Akiyama et al. (2020). El principio de la técnica consiste en una potente difusión de la onda sonora en el agua, que causa la separación de las moléculas; formando micro burbujas o cavidades, (Cavitación acústica) las cuales explotan liberando gran cantidad de energía, incrementando la temperatura y presión, causando reacciones químicas, y generando la energía de activación y fragmentación de las

moléculas (Rotura de enlaces),Doosti et al. (2012). Este trabajo propone evaluar la remoción de turbiedad aplicando diferentes frecuencias de ondas sonoras y tiempos de exposición como tratamiento alternativo al uso de coagulantes de aluminio.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la Aplicación de ondas sonoras para desestabilizar y precipitar los sólidos suspendidos y sólidos disueltos en agua natural a escala piloto

Objetivos específicos

Diseñar y construir una maqueta a escala piloto que simule el proceso de coagulación–floculación–sedimentación llevado a cabo PTAP Caldas EPM.

Determinar los factores y niveles a estudiar mediante un diseño de experimentos adecuado para evaluar la eficiencia del tratamiento a diferentes valores de frecuencia de ondas sonoras y tiempos de tratamiento, teniendo como variable respuesta la remoción de turbiedad.

Establecer las condiciones de operación que arrojan los mejores resultados en cuanto eficiencia de remoción de turbiedad en el intervalo evaluado.

Comparar los resultados obtenidos para el agua clarificada de la planta prototipo para diferentes parámetros fisicoquímicos (turbiedad, color, pH) con los reportados en la PTAP Caldas EPM mediante el tratamiento convencional.

Marco Conceptual

Calidad y Tratamiento Convencional de Agua Potable

El agua potable, es aquella que reúne los requisitos o características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas, señaladas o reguladas en la normatividad ambiental vigente. Para el caso de Colombia, son el decreto 1575 y la resolución 2115 de 2007 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), los documentos oficiales que nos indican los parámetros y límites permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano, sin causar daños o alteraciones negativas a la salud.

Tabla 1.

Parámetros Máximos Aceptables de Calidad del Agua Potable

Características Físicas	Valor Máximo Aceptable
Color Aparente	15 UPC (Unidades de Platino Cobalto)
Olor y Sabor	Aceptable o no Aceptable
Turbiedad	2UNT (Unidades nefelométricas de turbiedad)
Cloro Residual	0.3 a 2 mg/L
PH	6.5 a 9
Aluminio	0.2 mg/L
Alcalinidad Total	200 mg/L

Dureza Total	300 mg/L
Cloruros	250 mg/L

Fuente: Resolución 2115 (2007)

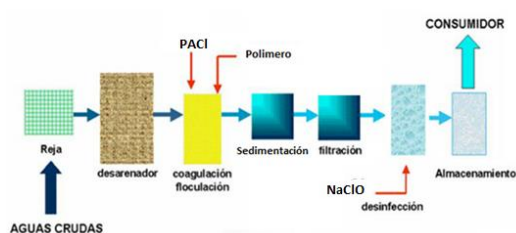
Dentro de los tratamientos aplicados al agua natural, en procura de hacerla apta para el consumo humano; se encuentra el tratamiento convencional, efectuado por plantas o estructuras físicas; diseñadas de tal manera que, combinadas sus etapas o procesos, logran la eliminación de todos los contaminantes presentes en el agua cruda, que de no ser tratada pondrían en riesgo la salud. Cada etapa del proceso cumple un objetivo específico de acuerdo a las características del agua natural y del contaminante que se pretende remover (Figura 1). Las plantas convencionales normalmente, tienen la capacidad de eliminar turbiedad, dureza, color, olor, microorganismos, y demás características que dependerán de la naturaleza de la fuente captada para los fines de potabilización, Salamanca. (2017)

El proceso de potabilización inicia con la mezcla rápida o cámara de agitación y turbulencia (Proceso previo al exterior de la planta, se encuentra la abducción), donde ocurre la adsorción química por aplicación del coagulante, ayudante de floculación y en algunos casos adición de carbón activado para

eliminar olor y sabor en el agua Una vez iniciada la coagulación, el agua pasa a los floculadores, donde las partículas coaguladas y desestabilizadas químicamente, se unen formando un Flock lo suficientemente grande y pesado para que se precipiten en el sedimentador; en esta etapa la mayoría de las partículas se precipitan, y el agua clarificada pasa a los filtros para remoción de otros compuestos suspendidos, finalmente el agua es desinfectada (Generalmente con cloro gaseoso o hipoclorito de sodio) y conducida al tanque de distribución. (Figura 1).

Figura 1.

Planta de tratamiento convencional



Fuente: Empresas Públicas de Medellín (2021)

La coagulación–floculación juega un rol muy importante, directa e indirectamente, en el control de turbiedad, patógenos, materia orgánica natural (MON), precursores de productos de desinfección, algunos iones y metales en la

producción de agua potable, Li et al. (2016), Luo et al. (2020), Zhang et al. (2020), son procesos que suelen ir ligados en el tratamiento convencional utilizados para separar los compuestos suspendidos y disueltos presentes en el agua natural. El nivel de turbidez en el agua no solo afecta la estética de la misma, sino que va directamente relacionada con la salud del consumidor final; ya que puede indicar presencia de materia orgánica y microorganismos, Garfí et al. (2016). La dosis precisa del coagulante (Generalmente sales de hierro, de aluminio, y polímeros orgánicos) y del ayudante de floculación (Generalmente Poliacrilamida catiónica y sílice activada), depende de la calidad del agua a tratar; determinada esta con el ensayo o test de jarras, Mazloomi et al. (2019) Salamanca. (2017).

Ondas Sonoras

El sonido es una sensación producida en el oído por determinadas oscilaciones de la presión exterior. La sucesión de compresiones y enrarecimientos que provoca la onda acústica al desplazarse por el medio hace que la presión existente fluctúe en torno a su valor de equilibrio; estas variaciones de presión actúan sobre la membrana del oído y provocan en el

tímpano vibraciones forzadas de idéntica frecuencia, originando la sensación de sonido, Fernández Laforga. (2000). Un oído humano normal sólo puede convertir en sensación sonora variaciones de presión que oscilen con una frecuencia entre 16 y 20.000 Hz, Doosti et al. (2012). Mientras que, el ultrasonido se define como una forma de energía que viaja en ondas de sonido iguales o mayorea a 20000 Hz, Tang Yun-Lin, Gao Nai-Yun. (2007).

El proceso de generación de tales ondas sonoras tiene su origen, por lo general, en un objeto en vibración que arrastra las partículas de aire en contacto con el mismo, produciendo de forma alternativa depresiones y sobrepresiones que se van extendiendo a las capas de aire contiguas, dando como resultado una onda de presión que se propaga de manera ondulatoria desde el objeto en vibración. Las ondas sonoras se caracterizan por la amplitud de los cambios de presión, por su frecuencia, por la velocidad de propagación y variación en el tiempo. En todo caso, el sonido es una forma de energía mecánica y puede ser medido en unidades físicas relacionadas con la energía, García Sanz & Garrido. (2003).

Tratamiento de Aguas con Ondas Sonoras

El tratamiento con ondas sonoras es una alternativa en auge que toma fuerza, toda vez que se ha podido evidenciar y registrar, la reducción de contaminantes en cuerpos de agua expuestos a diferentes frecuencias. El principio de la técnica consiste en una potente difusión de la onda sonora en el agua, que causa la separación de las moléculas; formando micro burbujas o cavidades, (Cavitación acústica) las cuales explotan liberando gran cantidad de energía, incrementando la temperatura y presión, causando reacciones químicas, y generando la energía de activación y fragmentación de las moléculas (Rotura de enlaces), Balachandran et al. (2016). Se diferencia dos tipos de cavitaciones acústicas, la transitoria y la estable, Fetyan & Salem Attia. (2020). El ultrasonido origina radicales, en especial el oxhidrilo, un oxidante muy fuerte que escapa de las burbujas y reacciona con los contaminantes presentes en el agua, Doosti et al. (2012), Brennen. (2013), Nie et al. (2021).

El ultrasonido es un tratamiento nuevo, limpio y eficiente para la degradación de compuestos orgánicos tóxicos, especialmente aquellos de difícil remoción con tratamientos convencionales. Tiene la ventaja de altas eficiencias

de remoción, cortos tiempos de reacción, instalaciones simples y poca generación de residuos. En particular se tienen grandes avances en el tratamiento de micro contaminantes, lodos, productos de desinfección, entre otros, Wang et al. (2019). Adicionalmente se ha comprobado que la aplicación del ultrasonido en una embalse de regadío causa la precipitación y sedimentación de las algas que proliferan en ese ecosistema, Sánchez Carmona et al. (2016), resultados también muy positivos se obtuvieron al comprobar la disminución de turbiedad con la aplicación de mayor voltaje a un filtro de partículas ultrasónico, Kambayashi et al. (2013). La degradación sonocatalítica del EDTA (Ácido etilendiaminotetraacético) en soluciones acuosas, conseguida con el tratamiento denominado sonohidrotermal; es otra muestra de las ventajas del emergente tratamiento derivado del sonido y el ultrasonido, El Hakim et al. (2021)

Diversos antecedentes, prueban que el tratamiento con ondas de ultrasonido puede convertir compuestos orgánicos contaminantes, en compuestos inermes como el CO_2 y H_2O , o en compuestos menos peligros que los originales, Wang et al. (2019), inclusive el tratamiento con ondas de

ultrasonido se ha llevado al componente aire; donde se pudo evidenciar la eliminación de material particulado como PM 2.5, D. Zhou et al. (2015). Se ha reportado que frecuencias de 25KHz o 40Hz con 5 minutos resulta favorable para la remoción de turbiedad, Z. Zhou et al. (2014), mientras que 28Hz y 1 h de tratamiento arrojan 75% de remoción de este parámetro, Doosti et al. (2012). Por otra parte, la aplicación de frecuencias perceptibles al oído humano podría representar una alternativa viable para la desestabilización y precipitación de los sólidos suspendidos y sólidos disueltos en el agua, Akiyama et al. (2020).

Metodología

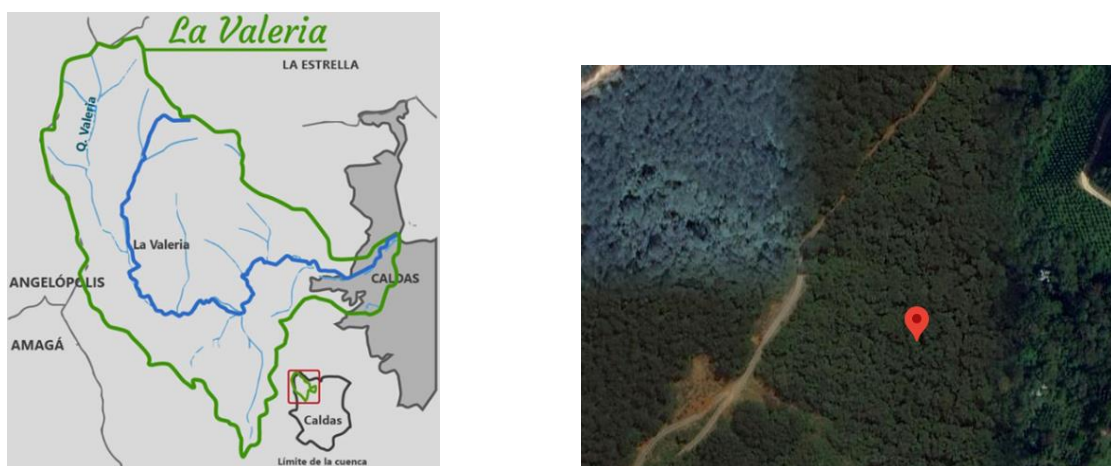
Agua de Estudio y Caracterización

El agua de la cuenca La Valeria es la principal fuente de abastecimiento de agua del municipio de Caldas Antioquia, con un caudal en época de estiaje de 200 L/s. Su nacimiento se encuentra localizado a 5km aproximadamente de la cabecera municipal, por la vía que conduce a la vereda La Valería, cota 2400 msnm. Área de la cuenca 10.45 km², tiene una captación localizada a 2.5km de la plaza principal. Es una bocatoma de fondo en azud de concreto ciclópeo, su capacidad es de 180L/s. El cribado tiene 8m de largo y 0.55m de ancho. El

desarenador tiene 19.2m de largo, 0.66m de ancho, por 1.9m de profundidad, con capacidad de 100L/s, Empresas Públicas De Medellín. (2019)

Figura 2.

Ubicación Cuenca la Valeria



Fuente: Google Maps. (2021)

La PTAP Caldas cuenta con dispositivos electrónicos para la medición en línea y verificación en mesa de los diferentes parámetros físico-químicos a los que se deben hacer seguimiento, para garantizar la calidad del agua y su posterior distribución a los usuarios.

Como parte del sistema de gestión de calidad de EPM, se encuentran documentados todos los instructivos utilizados para la correcta realización de

los análisis físico-químicos, los cuales fueron aplicados en el desarrollo de esta investigación dando confiabilidad a los resultados obtenidos.

Las características de los equipos utilizados en la medición de pH, color y turbiedad, así como los instructivos de análisis se encuentran detallados en el Anexo A.

Diseño y Construcción de Planta Prototipo

La planta de potabilización Caldas EPM, cuenta con dos unidades de sedimentación de 500m^3 cada una; este volumen corresponde a una unidad de sedimentación más un floculador. Previo a los dos sedimentadores en paralelo, se encuentran tres floculadores en línea; cuyo volumen es de 150 m^3 ; por tanto, el volumen total a considerar en el tiempo de retención hidráulica hasta la salida del agua clarificada o sedimentada es de 650m^3 . El caudal promedio de agua natural que ingresa a la planta, es de 125L/s o $450\text{ m}^3/\text{h}$

Figura 3.

Tanques de Sedimentación



Fuente: Empresas Públicas de Medellín, PTAP Caldas (2021)

Conocidos los valores de volumen y caudal de agua natural a potabilizar, se calcula el tiempo de retención hidráulica (TRH) hasta la salida de los sedimentadores o la producción de agua clarificada:

$$THR = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)}}{\text{Caudal (m}^3\text{/h)}} = \frac{650\text{m}^3}{450\text{m}^3\text{/h}} = 1.44\text{h} = 86.4 \text{ minutos}$$

En el diseño de la planta prototipo debe conservar el tiempo de retención hidráulica de 1.44 horas hasta la salida de agua natural clarificada, para ello, se guardó una proporción de 1:25000 tanto para el caudal de entrada como para el volumen de agua retenido. La proporción 1:25000 permitió dar un manejo a escala, adecuado a las condiciones locativas del laboratorio de análisis fisicoquímicos de la PTAP Caldas; donde se realizó el montaje.

Diseño del Prototipo

Definida la escala de trabajo, se realizan los cálculos para la construcción del prototipo con dos unidades o contenedores rectangulares en línea, buscando semejar el proceso de sedimentación efectuada en la PTAP Caldas

EPM; con la diferencia que solo uno de ellos hace las veces de sedimentador, y el otro es utilizado para el abastecimiento de agua natural.

Teniendo como punto de partida un TRH de 1.44 h, se determina el caudal de aforo (Q_{AF}) y el volumen de trabajo experimental. El caudal promedio a la entrada de la planta de 125L/s y una escala definida de 1:25000 se tiene:

$$Q_{AF} = \frac{125L}{s} \times \frac{1000mL}{1L} = \frac{125000mL}{25000} = \frac{5mL}{s}$$

Se realizaron las conversiones respectivas para calcular el volumen de trabajo:

$$1.44h \times 3600 \frac{s}{h} = 5184 s \times 5 \frac{ml}{s} = 25920ml$$

Lo que equivale a un volumen total de trabajo de aproximadamente 26 litros.

Generador de frecuencias de ondas sonoras.

Para generar las ondas sonoras a las que será sometida el agua a tratar se utilizó un dispositivo móvil (Celular Samsung Galaxy A6+) al cual se le instaló la APP Frequency generator (Figura 4), esta aplicación móvil permite realizar “barridos” por diferentes frecuencias de ondas sonoras, así como definir la frecuencia deseada y programar el tiempo de exposición con diferentes

intensidades en la propagación de las ondas de 1Hz hasta 22000Hz. Se enlazó (Por bluetooth) al dispositivo móvil, un parlante impermeabilizado que se ubicó al interior del segundo contenedor, dando como resultado mayor intensidad en la propagación de la onda sonora.

La APP Frequency generator permite generar onda de sonido sinusoidal, cuadrada, de diente de sierra o triangular en una frecuencia de onda sonora precisa, entre 1Hz y 22000 Hz, pasando por todos los tonos de gama alta (Agudos) y todos los tonos de gama baja (Graves) perceptibles al oído humano. La configuración de escalas deslizantes; lineal o logarímicamente, junto con la precisión de dos decimales en la búsqueda o barrido de la frecuencia deseada, permite mayor control a la hora de reproducir la frecuencia de onda sonora.

Play Store. (2021)

Para amplificar y propagar el sonido de la onda sonora seleccionada, se utilizó una cabina de sonido o parlante recargable con extra bajo incluido, conexión por bluetooth, batería interna de litio, Entrada de carga, entrada auxiliar, slot para memorias SD de hasta 32 GB, socket audio de 3.5mm Jack stereo, fuente de alimentación USB/DC/5V/500mah/AC110V/60HZ-

220V/50HZ y una potencia de de salida (RMS, Root medium square) de 20Watt

AML COMERCIALIZADORA. (2020)

Figura 4.

Pantalla de APP Frequency Generator - Parlante Amplificador



Fuente: El Autor (2021)

Diseño Experimental

Selección de Factores y Niveles

Se seleccionaron 2 variables para la evaluación de la aplicación de ondas sonoras para desestabilizar y precipitar los sólidos suspendidos y sólidos disueltos en agua natural a escala piloto: la frecuencia (Hz) y el tiempo de exposición (min), y en cada caso se ensayan 3 niveles, nivel bajo (-1), nivel medio o central (0) y nivel alto (1) teniendo como variable respuesta el porcentaje de remoción de turbiedad (% R).

Para determinar niveles de trabajo se realizaron algunos ensayos preliminares exploratorios, que permitieron acotar el rango de experimentación. Se evaluaron frecuencias en el rango de 8 Hz a 22 mil Hz y tiempos de exposición entre 30 y 120 minutos tal como se especifica en la

Tabla 2

Tabla 2.

Ensayos Preliminares (Valores de entrada)

Ensayo	Fecha	Hora	Frecuencia (Hz)	Caudal (mL/s)	Tiempo de exposición (Min)	Turbiedad	pH	Color
1	07/08/20	10:40	963	5	60	10.7	7.58	86
2	07/08/20	14:05	8.31	7	60	10.7	7.58	86
3	07/08/20	14:05	8.31	7	30	10.7	7.58	86
4	14/08/20	4:00	432	5	60	25.6	7.6	291
5	15/08/20	2:35	8.31	6	30	56.6	7.31	381
6	15/08/20	2:35	8.31	6	90	56.6	7.31	381
7	17/08/20	15:00	432	5	60	455	7.56	354
8	18/08/20	3:30	10000	5	60	203	7.14	1241
9	18/08/20	3:30	10000	5	120	203	7.14	1241
10	19/08/20	2:50	206.28	5	90	24.5	7.20	209
11	19/08/20	2:50	206.28	5	120	24.5	7.20	209
12	23/08/20	9:55	206.28	5	30	203	7.14	1241
13	02/09/20	9:00	22000	5	90	64.3	7.22	315

Ensayo	Fecha	Hora	Frecuencia (Hz)	Caudal (mL/s)	Tiempo de exposición (Min)	Turbiedad	pH	Color
14	04/09/20	4:00	65.6	5	90	15.8	7.18	72
15	09/09/20	3:30	104	5	90	37	7.27	165
16	14/09/20	20:00	43	5	90	12.6	7.12	98
17	15/09/20	2:45	138	5	90	9.57	7.19	70

Fuente: Empresas Públicas de Medellín (2020)

Muestreo agua natural

Para llevar a cabo la experimentación, se realiza un muestreo 6 x 72; es decir, se toman muestras puntuales cada 6 horas del agua de abastecimiento a la planta (agua natural) durante 72 horas, con la finalidad de obtener una muestra compuesta representativa del proceso, teniendo en cuenta que el caudal de entrada a la planta es aproximadamente constante, el volumen de las alícuotas fue igual en cada toma.

En total se tomaron 12 muestras, alícuotas de 4,5 litros, para un total de 54 litros, las cuales fueron repartidos en dos contenedores con capacidad de 35 litros cada uno, los volúmenes de los recipientes se completaban con el agua de estudio una y otra vez, hasta homogenizar completamente y verificar en el turbidímetro una diferencia no superior a 10 UNT entre los volúmenes almacenados. El esquema de muestreo es resumido en la Tabla 3.

Tabla 3.

Esquema de Muestreo

Alícuota	Fecha	Hora
1	05/10/2020	10:00
2	05/10/2020	16:00
3	05/10/2020	22:00
4	06/10/2020	04:00
5	06/10/2020	10:00
6	06/10/2020	16:00
7	06/10/2020	22:00
8	07/10/2020	04:00
9	07/10/2020	10:00
10	07/10/2020	16:00
11	07/10/2020	22:00
12	08/10/2020	04:00

Fuente: El Autor (2020)

Antes de cada experimentación se hace la homogeneización de la muestra para asegurar poca variabilidad en los parámetros de entrada.

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una excelente opción para analizar si dos o más variables independientes y sus posibles interacciones ejercen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta. Además, permite reducir al mínimo el número de experimentos necesarios, lo que optimiza el proceso, Aristizabal–Ciro et al. (2017)

Se utilizó un diseño experimental multivariado, el cual permite identificar factores y/o interacciones que son significativas en el proceso, Martínez–Zapata et al. (2013). El diseño consiste en un diseño factorial 3^2 con superficie de respuesta (RSM) para un total de 14 experimentos. Esta metodología se utiliza para refinar los modelos después de haber determinado los factores importantes utilizando diseños de cribado o diseños factoriales, especialmente

cuando se pretende encontrar un máximo o mínimo de la variable respuesta,

Kuehl. (2001)

El orden de los tratamientos fue aleatorizado con el fin de aportar protección contra el efecto de variables ocultas (Tabla 4)

Tabla 4.

Diseño Experimental

Tratamiento	Factor A Frecuencia (Hz)	Factor B Tiempo (min)
1	-1	1
2	0	0
3	0	1
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	-1	0
8	1	0
9	-1	-1
10	0	-1
11	1	-1
12	0	0
13	0	0
14	0	0

Fuente: Stargraphics Centurion XVIII version 18.1.13 (2020)

Tanto el diseño, como los datos obtenidos fueron procesados utilizando el software estadístico comercial *Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13*.

Comparación de Resultados

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en la experimentación, de acuerdo con el diseño de experimentos (Tabla 4), se determinarán los parámetros que arrojen la mayor remoción de turbiedad, en el rango estudiado.

En la última etapa del trabajo, se realizará por triplicado el ensayo que, de acuerdo con el análisis estadístico, en el rango evaluado, maximiza la remoción de turbiedad, y se hará la comparación con los datos arrojados por el tratamiento convencional llevado a cabo en la PTAP Caldas con condiciones similares de entrada.

Resultados

Agua de Estudio y Caracterización

El agua natural tratada en la PTAP Caldas, ofrece algunas condiciones físico-químicas estables siempre y cuando las condiciones climáticas también se conserven estables. En el transcurso del tiempo seco (verano) la turbiedad y color de entrada no sobrepasan las 10 UNT, y las 10 UPC respectivamente, y el PH oscila entre 7 y 8.5 sin verse afectado por los cambios de turbiedad registrados. Cuando las condiciones climáticas son cambiantes, o predomina la temporada de invierno; la turbiedad y el color pueden sobrepasar las 2000 unidades de UNT y UPC respectivamente, fluctuando constantemente en valores intermedios persistentes, derivados de las fuertes lluvias y deslizamientos que tienen lugar en la cuenca la Valeria.

Se recopiló la información de las características fisicoquímicas del agua natural de entrada a la planta correspondientes a los días del 5 al 8 de octubre de 2020, espacio en el que se tomaron las alícuotas para la conformación de la muestra compuesta que se usó como entrada a la planta prototipo a escala para llevar a cabo la experimentación. En las tablas 5 a 12 se presentan los datos

promedio, máximos y mínimos en las fechas especificadas. Los datos completos se encuentran alojados en el Anexo B.

Tabla 5.

Caracterización Agua Natural 05 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT) – [AT1740]	Color (U.C)	pH – [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Organicas Oxidables (mg/l)	Conductividad (μS/cm) – [CT740]
Promedio	156,72	1.115,50	7,35	48	44	13,29	72
Valor Máximo	936,89	4.200,00	7,51	52	46	15,60	77
Valor Mínimo	48,43	270,00	7,08	44	41	12,10	60

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 6.

Caracterización Agua Distribución 05 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
Promedio	0,11	2,00	7,36	46	42	3,93	1,16	0,045
ValorMáximo	0,14	2,00	7,40	49	45	4,60	1,22	0,050
ValorMínimo	0,09	2,00	7,31	42	39	3,00	0,98	0,040

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 7.

Caracterización Agua Natural 06 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT) – [AT1740]	Color (U.C)	pH – [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Conductividad (μS/cm) – [CT740]
Promedio	54,76	490,38	7,40	47	43	11,69	75
Valor Máximo	113,51	1.100,00	7,55	48	44	12,40	78
Valor Mínimo	29,83	210,00	7,30	46	42	10,98	72

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 8.

Caracterización Agua Distribución 06 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
Promedio	0,11	2,00	7,39	46	44	4,51	1,08	0,037
ValorMáximo	0,12	2,00	7,41	47	45	4,80	1,26	0,038
ValorMínimo	0,09	2,00	7,34	45	44	4,22	0,94	0,036

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 9.

Caracterización Agua Natural 07 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT) – [AT1740]	Color (U.C)	pH – [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Conductividad (μS/cm) – [CT740]
Promedio	39,60	283,25	7,39	48	42	9,38	75
Valor Máximo	141,55	852,00	7,50	48	45	10,95	77
Valor Mínimo	25,68	152,00	7,30	48	39	7,82	74

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 10.

Caracterización Agua Distribución 07 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
Promedio	0,09	2,00	7,43	45	39	3,98	0,91	0,035
ValorMáximo	0,11	2,00	7,47	47	43	4,52	0,94	0,036
ValorMínimo	0,07	2,00	7,39	44	36	3,44	0,85	0,034

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 11.

Caracterización Agua Natural 08 de Octubre de 2020

	Turbiedad (UNT) – [ATI740]	Color (U.C)	pH – [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Conductividad (μS/cm) – [CT740]
Promedio	27,17	217,46	7,39	44	40	12,00	76
Valor Máximo	54,59	450,00	7,55	44	40	12,00	79
Valor Mínimo	19,58	140,00	7,28	44	40	12,00	75

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

Tabla 12.

Caracterización Agua Distribución 08 de Octubre de 2020

	Turbiedad	Color	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sustancias Orgánicas Oxidables (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
Promedio	0,10	2,00	7,40	39	39	2,90	0,88	0,050
Vr Máximo	0,27	2,00	7,44	39	39	2,90	0,98	0,050
Vr Mínimo	0,07	2,00	7,36	39	39	2,90	0,82	0,050

Fuente: Empresas Públicas de Medellín. (2020)

El laboratorio de análisis fisicoquímico de la PTAP Caldas, facilitó la toma de muestras y el almacenamiento de las mismas, en condiciones tal que no se reflejó mayor variación en los valores de turbiedad registrados para cada ensayo (Valores comprendidos entre 26,7 y 35,3 NTU) una vez compuesta la muestra y constatado cada vez que se homogenizó el volumen de agua en cada ensayo o corrido. Si bien el agua de estudio puede ofrecer algunas características fisicoquímicas muy constantes (Como el PH), los cambios derivados de las cambiantes condiciones climáticas, son fácilmente registrados y controlados gracias a los dispositivos de medición en línea y a los equipos de lectura directa o equipos de mesa; que, para efectos de los ensayos, permitieron la trazabilidad a todos los valores de entrada y salida de las variables analizadas.

Diseño y Construcción Planta Prototipo

Los procesos de coagulación, floculación y sedimentación que tienen lugar en la PTAP Caldas, se pudieron reproducir a escala piloto, analizando el comportamiento de las diferentes variables fisicoquímicas en todas las fases

experimentales, e igualando el caudal de entrada (5mL/s), volumen de agua natural en el sedimentador y tiempo de retención hidráulica (1.44h) para el agua clarificada de la PTAP Caldas en una escala de 1:25000.

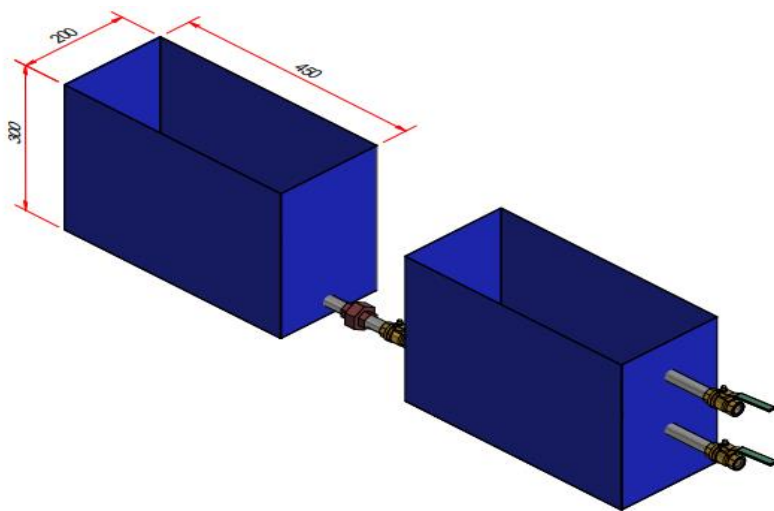
Teniendo en cuenta lo anterior, las dimensiones propuestas para los contenedores serán: 45cm x 30 cm x 20 cm=27000 cm³o 27 Litros (Figura 5).

Un litro más de capacidad facilita el abastecimiento continuo de agua natural

que se debe hacer al primer contenedor (Hace las veces de entrada de agua natural)

Figura 5.

Plano Prototipo



Fuente: Rabbi Hurtado (2020)

Los contenedores fueron fabricados en acero Hot Rolled (HR) un tipo de material con aleación que permite soldar uniones en el mismo material y acoplar las válvulas herméticamente. Se emplearon tres válvulas tipo globo de

1/2 pulgada, una de ellas se empleó como unión entre los contenedores y reguladora del caudal, las otras 2 se instalaron en el segundo contenedor (El que hace las veces de sedimentador) en la parte media y superior del mismo, como toma muestras en los diferentes tiempos de exposición de la frecuencia de onda sonora (Figura 6)

Figura 6.

Foto Planta Prototipo



Fuente: El autor (2020)



Fuente: El Autor (2020)

Diseño Experimental

Selección de Factores y Niveles

Tras realizar diferentes “barridos” de prueba; explorando variadas frecuencias, caudales y tiempos de exposición, con el fin de determinar los niveles de trabajo, se evidenció un porcentaje de remoción de turbiedad superior al 13% en todos los casos; y se acotaron los rangos experimentales para las variables de estudio, centrando la atención en frecuencias (Hz) inferiores a los 1000 Hz, caudales iguales o cercanos a la entrada de agua natural a la PTAP Caldas (A razón de 1:25000) y tiempos de exposición aproximados al tiempo de retención hidráulica para el agua clarificada de la PTAP Caldas; donde los porcentajes de remoción de turbiedad superaban el 31%, tal como se ilustra en la tabla 13.

Tabla 13.

Resultados Ensayos Preliminares

Ensayo	Fecha	Hora	Frecuencia (Hz)	Caudal(mL/s)	Tiempo de Exposición (Min)	Turbiedad, PH y Color de Entrada			Turbiedad, PH y Color Clarificada PTAP			Turbiedad, PH y Color a la Salida de la maqueta			Porcentaje de Remoción de Turbiedad
1	07/08/20	10:40	963	5	60	10.7	7.58	86	2.47	7.29	41	5.92	7.57	78	44.7
2	07/08/20	14:05	8.31	7	60	10.7	7.58	86	2.47	7.29	41	8.24	7.9	90	23
3	07/08/20	14:05	8.31	7	30	10.7	7.58	86	2.47	7.29	41	9.24	7.44	93	13.9
4	14/08/20	4:00	432	5	60	25.6	7.6	291	5.11	7.52	142	12.7	7.56	197	50.4
5	15/08/20	2:35	8.31	6	30	56.6	7.31	381	3.94	7.21	31	34.5	7.38	284	39,04
6	15/08/20	2:35	8.31	6	90	56.6	7.31	381	3.94	7.21	31	38.7	7.52	295	31.6
7	17/08/20	15:00	432	5	60	455	7.56	354	3.58	7.41	28	19.3	7.64	162	95.7
8	18/08/20	3:30	10000	5	60	203	7.14	1241	4.06	7.39	19	119	7.56	714	41.4
9	18/08/20	3:30	10000	5	120	203	7.14	1241	4.06	7.39	19	93.5	7.62	504	53.9
10	19/08/20	2:50	206.28	5	90	24.5	7.20	209	3.7	6.75	17	8.79	7.97	74	64.1
11	19/08/20	2:50	206.28	5	120	24.5	7.20	209	3.7	6.75	17	11.2	7.97	89	54.3
12	23/08/20	9:55	206.28	5	30	203	714	1241	4.77	7.43	21	16.8	7.98	639	91.7

Ensayo	Fecha	Hora	Frecuencia (Hz)	Caudal(mL/s)	Tiempo de Exposición (Min)	Turbiedad, PH y Color de Entrada			Turbiedad, PH y Color Clarificada PTAP			Turbiedad, PH y Color a la Salida de la maqueta			Porcentaje de Remoción de Turbiedad
13	02/09/20	9:00	22000	5	90	64.3	7.22	315	4.72	7.33	17	28.5	7.86	233	55.7
14	04/09/20	4:00	65.6	5	90	15.8	7.18	72	1.94	7.42	11	7.14	7.79	66	54.8
15	09/09/20	3:30	104	5	90	37	7.27	165	3.78	7.46	26	19.4	7.66	147	47.6
16	14/09/20	20:00	43	5	90	12.6	7.12	98	2.48	7.4	25	7.01	7.82	68	44.4
17	15/09/20	2:45	138	5	90	9.57	7.19	70	1.48	7.43	23	6.31	7.94	60	34.1

Fuente: Empresas Públicas de Medellín (2020)

Tanto el nivel alto como el bajo, arrojan resultados de remoción de turbiedad superiores al 50%, y considerando el cerco de frecuencias más representativas identificado con el barrido exploratorio (Menores a 1000Hz); 432Hz toma el lugar de frecuencia “Alta” seleccionada con un porcentaje de remoción de turbiedad del 95.7% y 65.6Hz toma el lugar de frecuencia “Baja” seleccionada con un porcentaje de remoción de turbiedad del 54.8%. De esta manera, de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, se tomó como nivel alto (+1) la frecuencia 432Hz y nivel bajo (-1) 65,6 Hz, de manera que el cero es el punto medio entre estos, es decir 183.2Hz

Los niveles elegidos para el tiempo de exposición se tomaron teniendo en cuenta el THR de la planta de aproximadamente 90 minutos, como nivel cero (0) así el nivel bajo (-1) es 60 minutos, y el nivel alto 120 minutos. De esta manera el diseño de experimentos aplicado es el siguiente.

Tabla 14.

Diseño Experimental Final

Tratamiento	Facto A Frecuencia (Hz)	Factor B Tiempo (min)
1	65,6	120
2	183,2	90
3	183,2	120
4	432	120
5	183,2	90
6	183,2	90
7	65,6	90
8	432	90
9	65,6	60
10	183,2	60
11	432	60
12	183,2	90
13	183,2	90
14	183,2	90

Fuente: Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.(2020)

Muestreo de agua natural

Se tomaron los datos de turbiedad para cada una de las alícuotas para la conformación de la muestra de agua compuesta que se obtuvo con el monitoreo de agua natural 6 x 72 (Tabla 15)

Tabla 15.

Datos de Turbiedad para Muestra Compuesta

Alícuota	Fecha	Hora	Turbiedad (NTU)
1	05/10/2020	10:00	125.0
2	05/10/2020	16:00	55.0
3	05/10/2020	22:00	18.7
4	06/10/2020	04:00	36.0
5	06/10/2020	10:00	36.0
6	06/10/2020	16:00	32.6
7	06/10/2020	22:00	19.8
8	07/10/2020	04:00	29.1
9	07/10/2020	10:00	49.5
10	07/10/2020	16:00	20.2
11	07/10/2020	22:00	18.7
12	08/10/2020	04:00	23.1

Fuente: Empresas Públicas de Medellín (2020)

El agua fue almacenada en 2 tanques de homogeneización, con el fin de mantener las condiciones iniciales de concentración de turbiedad constante, ya que la concentración podría tener un efecto significativo sobre la remoción de turbiedad, Adapureddy & Goel.(2012), por lo que incluir este parámetro como una variable implica un aumento en el desarrollo experimental, que incluye la realización de muestreos compuestos en diferentes épocas del año (época de lluvia – época seca) y tener en cuenta cualquier cambio climatológico (fenómeno del niño, de la niña etc), lo cual se sale del alcance de este proyecto. Por este motivo se optó por tener previo a la experimentación un tanque de homogeneización del agua natural.

Diseño de experimentos

Para cada ensayo, se tomaron datos de turbiedad y color a la entrada y a la salida del proceso para poder calcular el % de remoción, variable respuesta del diseño de la siguiente manera:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{\text{Turbiedad de entrada} - \text{turbiedad de salida}}{\text{turbiedad de entrada}} \times 100$$

En la tabla 16 se presentan los datos consolidados para todos los ensayos realizados de acuerdo con el diseño de experimentos (Tabla 16).

Donde se evidencia remociones entre 42,7% y 69,7%.

Tabla 16.*Ensayos Realizados de Acuerdo al Diseño Experimental*

67

RUN	Frecuencia (Hz)	Tiempo de Exposición (Min)	Color a la entrada	Color a salida	Turbiedad de entrada	Turbiedad a la salida	% Remoción de turbiedad
1	65,6	120	161	106	30.4	12,8	57,9
2	183,2	90	171	111	30.1	10,6	64,8
3	183,2	120	171	110	30.1	10,9	63,8
4	432	120	141	120	28.6	11	61,5
5	183,2	90	158	112	35.3	10,7	69,7
6	183,2	90	152	108	26.7	10,3	61,4
7	65,6	90	161	105	30.4	12,4	59,2
8	432	90	141	111	28.6	11,7	59,1
9	65,6	60	161	101	30.4	14,2	53,3
10	183,2	60	171	127	30.1	13,3	55,8
11	432	60	141	135	28.6	16,4	42,7
12	183,2	90	154	110	30.4	10,7	64,8

RUN	Frecuencia (Hz)	Tiempo de Exposición (Min)	Color a la entrada	Color a salida	Turbiedad de entrada	Turbiedad a la salida	% Remoción de turbiedad
13	183,2	90	159	110	29.2	10,6	63,7
14	183,2	90	153	109	29.9	10,5	64,9

Fuente: Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.(2020)

El análisis estadístico de la varianza de los factores para la remoción de turbiedad se realizó mediante el software de análisis estadístico comercial *Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.* con el fin de determinar cuáles de los factores evaluados, frecuencia (Hz) y/o tiempo de exposición (min) tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta, además si la interacción entre factores presenta significancia (Tabla 17)

Tabla 17.

Análisis de Varianza para % Remoción de la Turbiedad

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Frecuencia	8.40167	1	8.40167	1.14	0.3339
B:Tiempo de exposición	164.327	1	164.327	22.36	0.0052
AB	50.41	1	50.41	6.86	0.0472
Prueba falta de ajuste	8.4498	3	2.8166	0.38	0.7701
Pure error	36.7483	5	7.34967		
Total (corr.)	563.717	13			

Fuente: Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.(2020)

R-squared = 91.9821 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 86.971 percent

Standard Error of Est. = 2.71103

Mean absolute error = 1.20966

Durbin-Watson statistic = 2.67388 (P=0.8540)

Lag 1 residual autocorrelation = -0.351448

La tabla ANOVA divide la variabilidad en la variable respuesta (% R Turbiedad) en piezas separadas para cada uno de los efectos. Luego prueba la significancia estadística de cada efecto comparando el cuadrado medio con una estimación del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen valores P menores que 0.05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero en el nivel de confianza del 95.0%.

El tiempo de exposición al tratamiento tiene un efecto significativo sobre la remoción de turbiedad, mientras que la frecuencia no, sin embargo, el efecto

de la interacción entre el tiempo y la frecuencia si resultan significativas para el proceso (Tabla 17).

La prueba de falta de ajuste está diseñada para determinar si el modelo seleccionado es adecuado para describir los datos observados o si se debe utilizar un modelo más complicado. La prueba se realiza comparando la variabilidad de los residuos del modelo actual con la variabilidad entre las observaciones en los ajustes de réplica de los factores. Dado que el valor para la falta de ajuste en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0.05, el modelo parece ser adecuado para los datos observados con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 91,9821% de la variabilidad en % R Turbiedad. El estadístico R cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 86,971%.

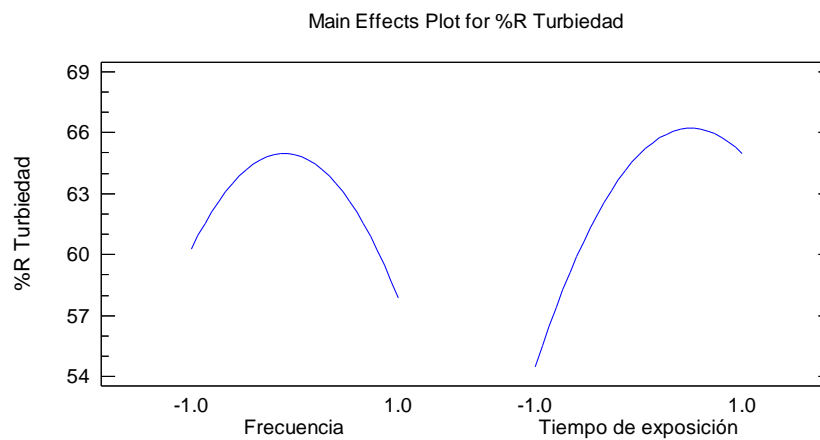
Adicionalmente, en la gráfica de efectos principales (figura 7) puede observarse que cuando se aumenta el tiempo de exposición se presenta una

mayor remoción de turbiedad, es decir, esta variable tiene un efecto positivo sobre la respuesta, de igual manera, tanto para la

frecuencia como para el tiempo de exposición se tiene un valor máximo de remoción en el rango evaluado en valores cercanos al centro.

Figura 7.

Efectos Principales en la Remoción de Turbiedad



Fuente: Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.(2020)

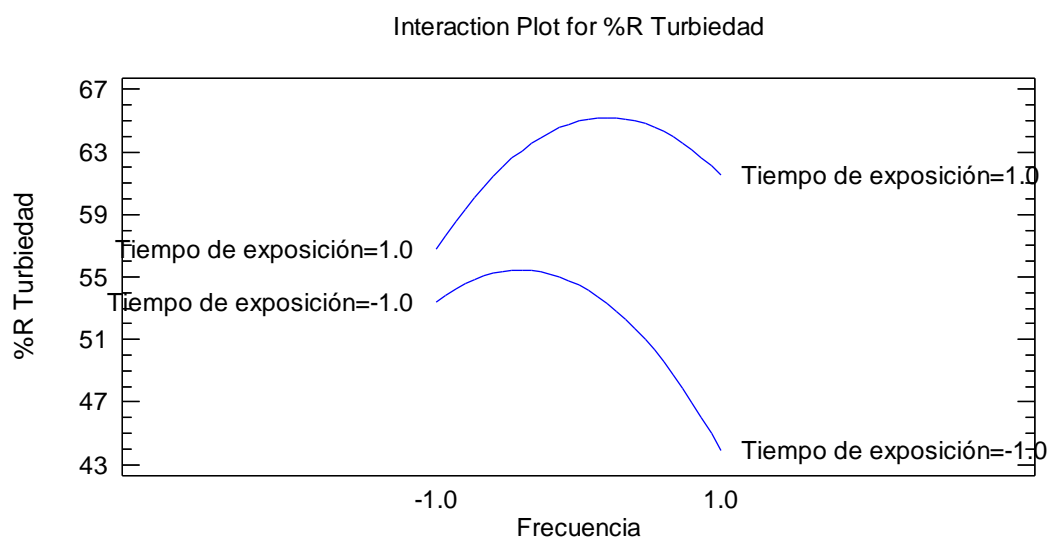
En cuanto a la interacción entre el tiempo de exposición y la frecuencia, se puede observar en la figura 7 donde se representa % de remoción de turbiedad en función de la frecuencia y el tiempo. Es evidente que los mayores % de remoción se dan en una frecuencia cercana al cero (183.2Hz) y un tiempo de exposición entre el 90 y 120 min.

En la figura 8, se observa que la variable respuesta (%R) se ve favorecida cuando el tiempo de exposición es mayor (nivel 1 (120min)) presentando una curva con mayores % de remoción de turbiedad, comparada con la curva en función de la frecuencia para el nivel bajo estudiando (-1). Por su parte la frecuencia, no es una variable estadísticamente significativa, como se había mencionado, y tiene un efecto negativo en el proceso ya que la respuesta en -1 es mayor que en 1(Figura 8). La interacción entre el tiempo y la frecuencia

aplicada al proceso entrega una remoción entre el 47 y el 67% aproximadamente.

Figura 8 .

Interacción Tiempo Frecuencia en la Remoción de Turbiedad



Fuente: Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.(2020)

Tabla 18.*Combinación de Niveles de Factores*

Factor	Bajo	Alto	Optimo
Frecuencia	-1.0	1.0	0.0581828
Tiempo de exposición	-1.0	1.0	0.524653
Respuesta	Optimo		
%R Turbiedad	66.247		

Fuente: Statgraphics Centurion XVIII versión 18.1.13.(2020)

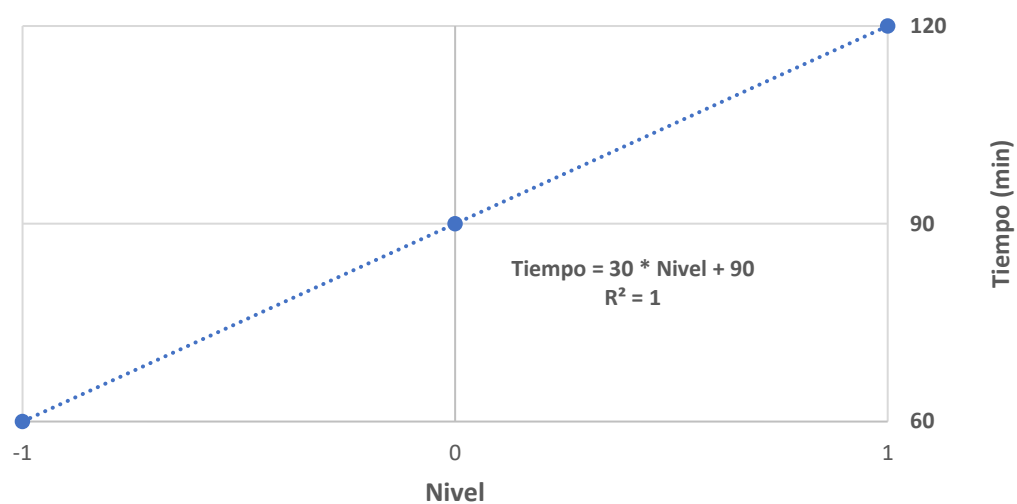
La tabla 18 muestra la combinación de niveles de factores que maximizan la función de deseabilidad en la región indicada. También muestra la combinación de los factores en los que se alcanza ese óptimo. En el caso de la frecuencia, el óptimo es un valor más cercano al nivel bajo, sin embargo, esta variable al no tener un efecto significativo, permite que se amplíe un poco el rango óptimo, en la figura 7 (main efecto) se evidencia que en un valor cercano

al centro para la frecuencia puede obtenerse mayor remoción de turbiedad, por este motivo se selecciona 183.6Hz como el óptimo para este parámetro.

En cuanto al tiempo de exposición el valor optimo es de igual manera un valor muy cercano al centro, es decir a 90 minutos. Para determinar el tiempo óptimo, que de acuerdo el análisis estadístico está alojado en el nivel 0.524653, es decir muy cercano al cero evaluado (90 min), se realizó una regresión lineal que permitiera calcular el tiempo exacto, ya que este variable tiene un efecto significativo y positivo sobre el proceso de remoción de turbiedad.

Figura 9.

Regresión Lineal para Calcular el Tiempo Exacto de Exposición



Fuente: El Autor (2020)

Por lo tanto, para el nivel óptimo obtenido (reemplazando en la ecuación del modelo) se tomó como 106 min.

Comparación de Resultados

Una vez realizado el análisis estadístico, y encontrados los valores óptimos de frecuencia aplicada y tiempo de exposición para la remoción de la

turbiedad como 186,3Hz y 106 minutos, se procede a realizar un ensayo por triplicado, registrando los valores de turbiedad, color y pH a la entrada de la PTAP caldas, que serán los mismos a la entrada de la planta a escala piloto y se confrontarán los valores de salida de las variable en cuestión, arrojados por ambos tratamientos, como se ilustra en las tablas 19 y 20

Tabla 19.

Ensayos Finales, Valores de Entrada

Ensayo	Fecha	Hora	Frecuencia	Caudal	Tiempo de Exposición	Turbiedad	Color	PH
1	13/01/2021	10:30	182	5mL/s	106 Minutos	318	1266 (Fuera rango de medida)	8.03
2	13/01/2021	12:30	182	5 mL/s	106 Minutos	300	1176 Fuera rango medida	7.92
3	13/01/2021	2:30	182	5 mL/s	106 Minutos	291	1323 Rango Fuera	7.98

Fuente: Empresas Públicas de Medellín (2020)

Tabla 20.

Ensayos Finales, Valores de Salida

Ensayo	Turbiedad Agua Clarificada Planta	Turbiedad a la Salida de la Maqueta	% de Remoción Salida Maqueta	Color Agua Clarificada Planta	Color a la Salida de la Maqueta	PH agua Clarificada Planta	PH a la Salida de la Maqueta	% de Remoción Salida Clarificada PTAP
1	17.9	118	$318 - 118 = 200 * \frac{100}{318} = 62.9$	155	844 por fuera rango medida	7.81	7.82	$318 - 17.9 = 300.1 * \frac{100}{318} = 94.4$
2	17.4	110	$300 - 110 = 200 * \frac{100}{318} = 65.3$	76	974 por fuera rango medida	7.69	7.82	$300 - 17.4 = 282.6 * \frac{100}{300} = 94.2$
3	16.6	105	$291 - 105 = 200 * \frac{100}{318} = 63.9$	81	920 por fuera rango medida	7.81	7.83	$291 - 16.6 = 274.4 * \frac{100}{318} = 94.3$

Fuente: Empresas Públicas de Medellín (2020)

Los porcentajes de remoción de turbiedad para cada uno de los ensayos superan el 62%, estableciendo casi una constante para los valores medios de frecuencia y tiempo desde el diseño de experimentos (183.2Hz y 106 minutos); donde todos los porcentajes de remoción de turbiedad están comprendidos entre el 61.4 % y el 69.7%

Con entera claridad se puede constatar la efectividad de la PTAP Caldas, tras comparar los valores de los porcentajes de remoción de turbiedad para ambos escenarios; y si bien no es un objetivo del presente trabajo hacer dicha comprobación, si deja de manifiesto que un porcentaje de remoción por encima del 62% frente a un 94%, con la implementación de una tecnología sana y limpia, como lo es la aplicación de las frecuencias de ondas sonoras; es una alternativa muy viable que, haciéndole los ajustes pertinentes de diseño y procesos complementarios para remoción de turbiedad (Procesos de filtración) puede llegar a entregar un agua de consumo que cumpla con una máximo de dos (2) unidades nefelométricas de turbiedad (UNT), como lo indica la resolución 2115 de 2007 del ministerio de la protección social Colombiana.

Conclusiones

Mejor porcentaje de remoción obtenido. Al final se obtiene un porcentaje de remoción de turbiedad promedio del 64% (Promediados los 3 valores obtenidos con los ensayos finales), con la aplicación de una frecuencia de onda sonora de 182Hz y un tiempo de exposición de 106 minutos, lo que es un reflejo coherente del diseño de experimentos; donde se obtiene un porcentaje de remoción de turbiedad de casi el 70% (69,7%) con la aplicación de una frecuencia de onda sonora de 183.2Hz y un tiempo de exposición de 90 minutos.

Tiempo de exposición y tiempo de retención hidráulico. El TRH (Tiempo de retención hidráulica) del agua clarificada de la PTAP Caldas, es de 86.4 minutos, comparado con el mejor tiempo de exposición obtenido en los ensayos que fue de 90 minutos, encontramos un margen muy estrecho, que da confiabilidad al desarrollo experimental; sin embargo, el modelo estadístico empleado, define un tiempo de exposición de 106 minutos para los experimentos finales, lo que nos lleva por consiguiente a extender y definir nuestro tiempo de exposición, por encima del TRH para el agua clarificada de la

PTAP Caldas, en aras de consolidar el montaje preciso y controlar las variables que pudieran reproducir constantemente el mejor porcentaje de remoción de turbiedad.

Eficiencia de la PTAP Caldas en la remoción de turbiedad. Si bien el propósito de este proyecto de grado no era poner en tela de juicio la eficiencia del tratamiento convencional del agua natural, llevado a cabo en la PTAP Caldas, si permitió constatar y ratificar que los procesos de coagulación, floculación y sedimentación definidos y estandarizados para la PTAP Caldas, cumplen satisfactoriamente la tarea de remoción de turbiedad del agua natural y entregan un agua clarificada optima al proceso de filtración, para finalmente distribuir un agua de consumo que cumple cabalmente con todas las exigencias normativas colombianas vigentes.

Es importante la búsqueda de tratamientos alternativos que permitan mitigar, o eliminar el uso de compuestos químicos, que, si bien son efectivos, traen consigo efectos nocivos para la salud y el medio ambiente. Este trabajo evidencia que el uso de ondas sonoras es una alternativa prometedora, con resultados aceptables en el tratamiento de aguas naturales para potabilización.

Recomendaciones

Utilizar un amplificador de sonido más potente y resistente al agua, en procura de conseguir un contacto directo con el agua a tratar, sin interferencias de materiales externos (impermeabilizantes) y donde se pueda apreciar con mayor facilidad la propagación de las ondas sonoras.

A la hora de componer la muestra de agua natural motivo de estudio, contar con un recipiente de capacidad superior al volumen compuesto y dotado de válvula dosificadora; para efectos prácticos de homogenización de las alícuotas y abastecimiento de la maqueta.

En trabajos futuros, debe incluirse como factor en el diseño de experimentos la concentración, teniendo en cuenta que en los ensayos preliminares se evidenció que esta puede tener un efecto importante en la remoción de turbiedad, ya que a concentraciones mayores de turbiedad a la entrada de la planta prototipo se presentaron mayores % remoción de turbiedad.

Se puede ampliar el rango de frecuencias evaluada, para determinar la mejor combinación con el tiempo de exposición, que este trabajo demostró, tiene un efecto significativo y positivo sobre la remoción de turbiedad.

Referencias Bibliográficas

- Adapureddy, S. M., & Goel, S. (2012). Optimizing electrocoagulation of drinking water for turbidity removal in a batch reactor. *International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE, 30*, 97-102.
- Akiyama, Y., Egawa, T., Koyano, K., & Moriwaki, H. (2020). Acoustic focusing of microplastics in microchannels: A promising continuous collection approach. *Sens. Sensors and Actuators, B: Chemical, 304*(December), 1-2.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.127328>
- AML COMERCIALIZADORA. (2020). *Altavoz Blue Function*.
- Aristizabal-Ciro, C., Botero-Coy, A. M., López, F. J., & Peñuela, G. A. (2017). Monitoring pharmaceuticals and personal care products in reservoir water used for drinking water supply. *Environmental Science and Pollution Research, 24*(8), 7335-7347. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8253-1>
- Balachandran, R., Patterson, Z., Deymier, P., Snyder, S. A., & Keswani, M. (2016). Understanding acoustic cavitation for sonolytic degradation of p-cresol as a model contaminant. *Chemosphere, 147*(May), 52-59.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.066>

Brennen, C. E. (2013). Cavitation and bubble dynamics. In *Cavitation and Bubble Dynamics*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>

Doosti, M. R., Kargar, R., & Sayadi, M. H. (2012). Water treatment using ultrasonic assistance : A review. *Ecology*, 2(2), 96–110.

El Hakim, S., Chave, T., & Nikitenko, S. I. (2021). Sonocatalytic degradation of EDTA in the presence of Ti and Ti@TiO₂ nanoparticles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70(May 2020), 105336.

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105336>

Empresas Públicas de Medellín. (2021). *PTAP Caldas Antioquia*.

Empresas Públicas De Medellín. (2020). *Guía Operativa*.

Exley, C., Pinnegar, J. K., & Taylor, H. (1997). Hydroxyaluminosilicates and acute aluminium toxicity in fish. *Journal of Theoretical Biology*, 189(2), 133–139. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0501>

Fernández Laforga, P. (2000). Conceptos físicos de las ondas sonoras. *Revista Física Y Sociedad*, 4(3), 57–71.

Fetyan, N. A. H., & Salem Attia, T. M. (2020). Water purification using

ultrasound waves: application and challenges. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 194–207.

<https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>

García Sanz, B., & Garrido, F. J. (2003). La contaminación acústica en nuestras ciudades. *Colección Estudios Sociales*, 12.

Garfí, M., Cadena, E., Sanchez–Ramos, D., & Ferrer, I. (2016). Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles. *Journal of Cleaner Production*, 137, 997–1003.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.218>

Google Maps. (2021). *Ubicación Cuenca La Valeria*.

Kabayashi, T., Saeki, T., & Nakamura, K. (2013). Prototyping and evaluation of ultrasonic particle filter considering water flux and sound propagation direction. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS*, 1300–1302.

<https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2013.0332>

Kuehl, R. . (2001). *Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*.

- Li, N., Hu, Y., Lu, Y. Z., Zeng, R. J., & Sheng, G. P. (2016). Multiple response optimization of the coagulation process for upgrading the quality of effluent from municipal wastewater treatment plant. *Scientific Reports*, 6(January), 1-13. <https://doi.org/10.1038/srep26115>
- Luo, X., Gong, H., He, Z., Zhang, P., & He, L. (2020). Research on mechanism and characteristics of oil recovery from oily sludge in ultrasonic fields. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123137. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123137>
- Martínez-Zapata, M., Aristizábal, C., & Peñuela, G. (2013). Photodegradation of the endocrine-disrupting chemicals 4n-nonylphenol and triclosan by simulated solar UV irradiation in aqueous solutions with Fe(III) and in the absence/presence of humic acids. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 251, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2012.10.009>
- Mazloomi, S., Zarei, A., Nourmoradi, H., Ghodsei, S., Amraei, P., & Haghighat, G. A. (2019). Optimization of coagulation-flocculation process for turbidity removal using response surface methodology: A study in Ilam water

- treatment plant, Iran. *Desalination and Water Treatment*, 147, 234–242.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23698>
- MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. D. T.
(2007). *Resolución 2115 de 2007* (p. 4).
- Nie, G., Hu, K., Ren, W., Zhou, P., Duan, X., Xiao, L., & Wang, S. (2021).
Mechanical agitation accelerated ultrasonication for wastewater
treatment: Sustainable production of hydroxyl radicals. *Water Research*,
198. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117124>
- Play Store. (2021). *APP Frecuency Generator*.
- Salamanca, E. (2017). Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Módulo
Arquitectura CUC*, 17(1), 29–48.
<https://doi.org/10.17981/moducuc.17.1.2016.02>
- Sánchez Carmona, R., Martín García, I., & Fahd Draissi, K. (2016). Efectos del
tratamiento ultrasónico sobre las microalgas y algunos parámetros
relacionados con la calidad del agua en una balsa de riego. *Tecnoaqua*,
18, 74–84.
- Sieliechi, J. M., Kayem, G. J., & Sandu, I. (2010). Effect of water treatment

- residuals (Aluminum and Iron Ions) on human health and drinking water distribution systems. *International Journal of Conservation Science*, 1(3), 175–182.
- Tang Yun–Lin, Gao Nai–Yun, P. W.–H. (2007). Progress on research of ultrasonic technology for drinking water. *Water & Wastewater Engineering*, 33(12), 113–118.
- Tomperi, J., Pelo, M., & Leiviskä, K. (2013). Predicting the residual aluminum level in water treatment process. *Drinking Water Engineering and Science*, 6(1), 39–46. <https://doi.org/10.5194/dwes-6-39-2013>
- Vázquez, T., & Montoya, H. (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable. *Conciencia Tecnológica*, 25.
- Wang, J., Wang, Z., Vieira, C. L. Z., Wolfson, J. M., Pingtian, G., & Huang, S. (2019). Review on the treatment of organic pollutants in water by ultrasonic technology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55(December 2018), 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.017>
- Zhang, X., Chen, Z., Shen, J., Zhao, S., Kang, J., Chu, W., Zhou, Y., & Wang, B. (2020). Formation and interdependence of disinfection byproducts during

chlorination of natural organic matter in a conventional drinking water treatment plant. *Chemosphere*, 242, 125227.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125227>

Zhou, D., Luo, Z., Fang, M., Jiang, J., Chen, H., Sha, D., & Lu, M. (2015).

Numerical Study of the Movement of Fine Particle in Sound Wave Field.

Energy Procedia, 75, 2415–2420.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.198>

Zhou, Z., Yang, Y., Li, X., Wang, W., Wu, Y., Wang, C., & Luo, J. (2014).

Coagulation performance and flocs characteristics of recycling pre-sonicated condensate sludge for low-turbidity surface water treatment.

Separation and Purification Technology, 123, 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.001>

Anexos

Anexo A. Instructivos de análisis

Metodología de análisis para los parámetros de turbiedad, color y pH

Medición de pH:

Equipo utilizado: PH Metro ORION 420A,

Reactivos: Agua destilada, soluciones buffer de 7.00, 10.00, opcional

4.00 y solución de cloruro de potasio (KCL)

Rango de medición y resolución del equipo: Mediciones de PH desde – 2.00 hasta 19.99 y una resolución de 0,001 /0.01 /0,1 y para temperatura desde –5.0 °C hasta 105.0 °C con una resolución de 0,1°C. (Empresas Públicas De Medellín, 2019)

Procedimiento de análisis (Empresas Públicas De Medellín, 2019)

El electrodo debe estar siempre en una solución de KCL 3M

Retirar el electrodo de la solución KCL 3M y enjuagar con agua destilada.

Sumergir el electrodo en la muestra.

Esperar hasta que se estabilice el valor.

Leer directamente en la pantalla.

Retirar el electrodo de la muestra.

Enjuagar el electrodo con abundante agua destilada.

Sumergir el electrodo en la solución de KCL nuevamente.

Medición de turbiedad:

Equipo utilizado: Turbidímetro HACH 2100P

Materiales: Patrones de formazina sellados de 4000, 1000, 200, 20 y menor a 0.1 NTU

Gel de formazina para verificación (Estándares secundarios)

Paño limpia celdas.

Reactivos: Agua destilada y aceite de silicona.

Rango de medición del equipo: Desde 0.001 NTU hasta 4000 NTU

Desviación estándar: +/- 2% más 0.01 NTU de 0 a 1000 NTU, +/- 5% de 1000 a 4000 NTU.

Resolución del equipo: 0.001 en el rango más bajo.

Precisión del equipo: $\pm 1\%$ ó ± 0.01 NTU la que resulte mayor

.(Empresas Públicas De Medellín, 2019)

Procedimiento de análisis:

Tener debidamente separados e identificadas las celdas o recipientes para lectura del blanco y muestra (Utilizar celda para agua de consumo a agua natural según el caso).

Acoplar el blanco en el compartimento del equipo para realizar el análisis y cerrar la cubierta.

Presionar “ ENTER” y leer directamente el valor en pantalla.

Verificar que el valor del blanco está dentro del rango definido para el estándar.

Si el valor es aceptable proseguir con el análisis, de lo contrario reportar al personal del laboratorio.

Llenar la celda de la muestra hasta el indicador o muesca de volumen y tapar.

Hacer coincidir la marca de la celda con la guía del compartimento del equipo.

Presionar “ENTER”

Leer el valor inmediatamente y directamente en la pantalla del equipo.

Si se deben hacer diluciones debido a la alta turbiedad, se multiplica el valor leído en el equipo por el número de veces que se haya diluido la muestra.

Descartar la muestra y enjuagar la celda con agua destilada. (Empresas Públicas De Medellín, 2019)

Medición de color:

Equipo utilizado: Espectrofotómetro HACH DR 2010

Materiales: Porta-celdas, celdas de medición, filtro de calibración.

Reactivos: Agua destilada libre de turbiedad.

Reproducibilidad: + 0.005 de absorbancia.

Ajustes: Ajuste al valor de calibración del blanco a 0.0 de absorbancia, 0 de concentración ó 100% de transmitancia con una linealidad fotométrica de + 0.002 A.

Longitud de onda y precisión: El equipo puede hacer mediciones con un rango de longitud de onda desde 400 hasta 900 nanómetros (nm), con una precisión de longitud de

onda de +2 nm entre un rango de 400 a 700 nm y de +3 nm de 700 a 900 nm.(Empresas Públicas De Medellín, 2019)

Instructivo de análisis:

Seleccionar en el equipo el método requerido (Color rango alto o bajo) dependiendo de la muestra a analizar.

Llenar la celda con agua destilada hasta el indicador o muesca de volumen.

Oprimir tecla “CERO” para realizar calibración.

Descartar el agua destilada y llenar la celda con el volumen de muestra a analizar.

Oprimir la tecla “MEDICION”

Leer directamente el valor en pantalla.

Si se deben hacer diluciones debido al alto contenido de partículas suspendidas y disueltas, se multiplica el valor leído en el equipo por el número de veces que se haya diluido la muestra.

Descartar la muestra y enjuagar la celda con agua destilada.(Empresas Públicas De Medellín, 2019)

Anexo B. Caracterización del agua natural y agua de distribución de la PTAP

Caldas, del 05 al 08 de Octubre de 2020.

Caracterización para los días en que se realiza el diseño experimental.

Datos extraídos del ROP (Registro operación planta_Formato de la intranet
epm)

Hora	Agua Natural						
	Turbiedad (UNT) – [ATI740]	Color (U.C)	pH – [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Conductividad (μS/cm) – [CT740]
23	120,89	980,00	7,30				71
0	96,60	677,00	7,32				73
1	91,74	710,00	7,32				72
2	221,83	1.500,00	7,30				68
3	566,52	1.450,00	7,17				62
4	936,89	4.200,00	7,08	52	45	12,10	60
5	279,51	3.300,00	7,22				68
6	127,10	2.856,00	7,28				71
7	103,03	1.220,00	7,32				72
8	115,59	980,00	7,39				72
9	82,93	670,00	7,43				73
10	74,87	409,00	7,50	50	46	12,18	74
11	66,56	420,00	7,51				76
12	61,16	390,00	7,51				76
13	55,88	380,00	7,50				77
14	53,67	330,00	7,48				77
15	51,51	310,00	7,42				76
16	49,28	290,00	7,41				76
17	48,43	270,00	7,39				76
18	56,41	270,00	7,35				76
19	197,48	1.890,00	7,32				74
20	165,08	1.650,00	7,31				74
21	84,16	840,00	7,31				75
22	113,67	1.100,00	7,31	44	41	15,60	75
23	61,36	660,00	7,33				75
Total	3.761,26	26.772,00	176,48	146	132	39,88	1.748
Promedio	156,72	1.115,50	7,35	48	44	13,29	72
Vr.Máximo	936,89	4.200,00	7,51	52	46	15,60	77
Vr.Mínimo	48,43	270,00	7,08	44	41	12,10	60

--	--	--	--	--	--	--	--

Hora	Agua Distribución							
	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
		T1	T1 - [PHIT741]					
23	0,13	2,00	7,41				1,14	
0	0,13	2,00	7,40				1,15	
1	0,13	2,00	7,40				1,18	
2	0,13	2,00	7,40				1,20	
3	0,12	2,00	7,39				1,21	
4	0,12	2,00	7,39	49	44	4,60	1,19	0,040
5	0,12	2,00	7,38				1,19	
6	0,11	2,00	7,37				1,20	
7	0,11	2,00	7,36				1,20	
8	0,11	2,00	7,35				1,20	
9	0,12	2,00	7,33				1,16	
10	0,14	2,00	7,32	48	45	4,20	0,99	0,044
11	0,13	2,00	7,31				0,98	
12	0,12	2,00	7,32				1,05	
13	0,11	2,00	7,33				1,07	
14	0,11	2,00	7,33				1,06	
15	0,10	2,00	7,34				1,11	
16	0,10	2,00	7,34				1,17	
17	0,09	2,00	7,34				1,17	
18	0,10	2,00	7,35				1,18	

19	0,10	2,00	7,36				1,21	
20	0,10	2,00	7,37				1,21	
21	0,10	2,00	7,38				1,22	
22	0,10	2,00	7,40	42	39	3,00	1,22	0,050
23	0,09	2,00	7,40				1,21	
Total	2,69	48,00	176,66	139	128	11,80	27,73	0,134
Promedio	0,11	2,00	7,36	46	42	3,93	1,16	0,045
Vr.Máximo	0,14	2,00	7,40	49	45	4,60	1,22	0,050
Vr.Mínimo	0,09	2,00	7,31	42	39	3,00	0,98	0,040

Operación

Planta

Caldas

Fecha:

6/10/2020



Hora	Agua Natural						
	Turbiedad (UNT) - [ATI740]	Color (U.C)	pH - [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Conductividad (μS/cm) - [CT740]
23	61,36	660,00	7,33				75
0	69,65	700,00	7,34				75
1	63,56	650,00	7,34				75
2	61,19	630,00	7,34				75
3	70,79	780,00	7,34				74
4	93,38	930,00	7,36				73
5	97,13	900,00	7,36				73
6	113,51	1.100,00	7,34				72
7	76,16	750,00	7,35				73
8	57,45	430,00	7,41				74
9	53,19	460,00	7,48				75

10	50,82	415,00	7,53				77
11	50,35	360,00	7,55				78
12	45,58	416,00	7,55				78
13	46,60	420,00	7,55				78
14	42,69	430,00	7,51	48	44	10,98	78
15	41,51	320,00	7,46				78
16	37,85	310,00	7,45				78
17	37,08	330,00	7,39				78
18	34,63	280,00	7,35				77
19	38,07	260,00	7,35				77
20	35,60	240,00	7,32	46	42	12,40	77
21	36,70	228,00	7,31				77
22	30,82	220,00	7,30				76
23	29,83	210,00	7,31				76
Total	1.314,14	11.769,00	177,59	94	86	23,38	1.822
Promedio	54,76	490,38	7,40	47	43	11,69	75
Vr.Máximo	113,51	1.100,00	7,55	48	44	12,40	78
Vr.Mínimo	29,83	210,00	7,30	46	42	10,98	72

**Registro
de
Operación
Planta ROP**

Fecha de 1/04/2021
Generación: 14:32

Agua Distribución

Hora	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
							T1 - [ACRIT741]	
23	0,09	2,00	7,40				1,21	
0	0,09	2,00	7,41				1,21	
1	0,11	2,00	7,40				1,19	

Operación

Planta

Caldas

Fecha:

7/10/2020



Hora	Agua Natural						
	Turbiedad (UNT) - [ATI740]	Color (U.C)	pH - [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Conductividad (μS/cm) - [CT740]
23	29,83	210,00	7,31				76
0	29,15	212,00	7,31				76
1	28,26	211,00	7,32				76
2	28,03	206,00	7,33				76
3	27,84	204,00	7,37				76
4	27,96	205,00	7,37				76
5	28,66	201,00	7,35				75
6	28,37	210,00	7,34				75
7	59,54	230,00	7,37				75
8	27,24	180,00	7,38				75
9	37,86	195,00	7,43				77
10	26,56	170,00	7,49				77
11	25,68	166,00	7,50				77
12	26,45	152,00	7,49				77
13	47,76	360,00	7,48	48	45	10,95	77
14	141,55	852,00	7,46				74
15	84,46	736,00	7,45				75
16	51,20	480,00	7,45				76
17	37,03	480,00	7,42				76
18	31,96	234,00	7,38				76
19	32,31	238,00	7,34				76
20	30,73	231,00	7,32				76
21	37,26	241,00	7,30	48	39	7,82	75
22	27,81	204,00	7,30				75

23	26,77	200,00	7,30				75
Total	950,44	6.798,00	177,25	96	84	18,77	1.819
Promedio	39,60	283,25	7,39	48	42	9,38	75
Vr.Máximo	141,55	852,00	7,50	48	45	10,95	77
Vr.Mínimo	25,68	152,00	7,30	48	39	7,82	74

**Registro
de
Operación
Planta ROP**

Fecha de 1/04/2021
Generación: 14:32 -

Agua Distribución

Hora	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
							T1 - [ACRIT741]	
23	0,10	2,00	7,41				0,96	
0	0,09	2,00	7,41				0,94	
1	0,09	2,00	7,40				0,93	
2	0,09	2,00	7,41				0,93	
3	0,08	2,00	7,41				0,92	
4	0,08	2,00	7,41				0,92	
5	0,10	2,00	7,42				0,93	
6	0,11	2,00	7,41				0,93	
7	0,11	2,00	7,40				0,91	
8	0,10	2,00	7,39				0,85	
9	0,10	2,00	7,40				0,85	
10	0,10	2,00	7,41				0,88	
11	0,09	2,00	7,43				0,89	
12	0,08	2,00	7,44				0,89	
13	0,08	2,00	7,44	47	43	4,52	0,87	0,036
14	0,07	2,00	7,45				0,90	
15	0,07	2,00	7,46				0,91	

16	0,07	2,00	7,47				0,93	
17	0,08	2,00	7,47				0,92	
18	0,07	2,00	7,47				0,92	
19	0,08	2,00	7,46				0,92	
20	0,08	2,00	7,46				0,91	
21	0,08	2,00	7,46	44	36	3,44	0,91	0,034
22	0,08	2,00	7,45				0,90	
23	0,09	2,00	7,44				0,89	
Total	2,07	48,00	178,37	91	79	7,96	21,75	0,070
Promedio	0,09	2,00	7,43	45	39	3,98	0,91	0,035
Vr.Máximo	0,11	2,00	7,47	47	43	4,52	0,94	0,036
Vr.Mínimo	0,07	2,00	7,39	44	36	3,44	0,85	0,034

Operación

Planta

Caldas

Fecha:

8/10/2020



Hora	Agua Natural						
	Turbiedad (UNT) - [ATI740]	Color (U.C)	pH - [PHIT740]	Alcalinidad Total (mg/l CaCO ₃)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Conductividad (μS/cm) - [CT740]
23	26,77	200,00	7,30				75
0	25,58	183,00	7,31				75
1	32,00	227,00	7,32				75
2	23,88	171,00	7,32				76
3	21,72	154,00	7,33				76
4	21,98	151,00	7,33				76
5	21,64	159,00	7,31				76
6	28,26	280,00	7,30				75
7	45,19	450,00	7,32				75
8	24,06	240,00	7,41	44	40	12,00	76
9	25,37	250,00	7,48				76
10	25,35	250,00	7,52				77
11	24,89	240,00	7,54				78
12	24,64	235,00	7,54				78
13	23,27	230,00	7,55				79
14	23,18	210,00	7,54				79
15	23,11	231,00	7,51				79
16	23,07	230,00	7,47				79
17	27,79	220,00	7,39				78
18	54,59	215,00	7,32				76
19	42,58	210,00	7,30				76
20	27,42	233,00	7,30				76
21	22,31	160,00	7,29				77
22	20,63	150,00	7,28				77

23	19,58	140,00	7,28				77
Total	652,09	5.219,00	177,26	44	40	12,00	1.842
Promedio	27,17	217,46	7,39	44	40	12,00	76
Vr.Máximo	54,59	450,00	7,55	44	40	12,00	79
Vr.Mínimo	19,58	140,00	7,28	44	40	12,00	75

**Registro
de
Operación
Planta ROP**

Fecha de 1/04/2021
Generación: 14:34 -

Hora	Turbiedad (UNT)	Color (U.C)	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dureza Total (mg/l)	Sust. Org. Oxi. (mg/l)	Cloro Residual Libre(mg/l)	Aluminio Residual (mg/l)
							T1 - [ACRIT741]	
23	0,09	2,00	7,44				0,89	
0	0,09	2,00	7,44				0,88	
1	0,09	2,00	7,44				0,88	
2	0,09	2,00	7,43				0,89	
3	0,10	2,00	7,43				0,91	
4	0,10	2,00	7,43				0,93	
5	0,09	2,00	7,42				0,96	
6	0,27	2,00	7,42				0,98	
7	0,10	2,00	7,41				0,98	
8	0,10	2,00	7,39	39	39	2,90	0,88	0,050
9	0,10	2,00	7,37				0,82	
10	0,10	2,00	7,36				0,83	
11	0,09	2,00	7,36				0,84	
12	0,08	2,00	7,36				0,85	
13	0,10	2,00	7,36				0,87	
14	0,08	2,00	7,37				0,88	
15	0,11	2,00	7,37				0,89	
16	0,08	2,00	7,38				0,91	

17	0,07	2,00	7,38				0,90	
18	0,07	2,00	7,39				0,89	
19	0,07	2,00	7,40				0,88	
20	0,07	2,00	7,40				0,85	
21	0,08	2,00	7,41				0,82	
22	0,08	2,00	7,42				0,82	
23	0,09	2,00	7,43				0,82	
Total	2,30	48,00	177,57	39	39	2,90	21,16	0,050
PromedioI	0,10	2,00	7,40	39	39	2,90	0,88	0,050
Vr.Máximo	0,27	2,00	7,44	39	39	2,90	0,98	0,050
Vr.Mínimo	0,07	2,00	7,36	39	39	2,90	0,82	0,050

Anexo C. Registro fotográfico de los valores obtenidos con los equipos de medición en línea y de mesa, para los ensayos finales

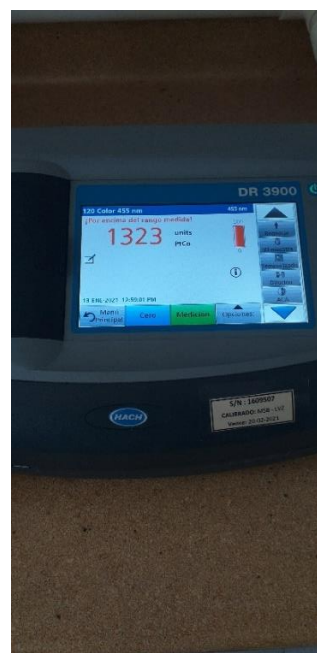
Turbidímetro en línea, valores registrados a la entrada



PH metro de mesa, valores registrados a la entrada



Espectrofotómetro de mesa, datos de color agua natural (entrada)



Turbidímetro de mesa, valores registrados a la salida de la maqueta



Turbiedad agua clarificada de la planta



Espectrofotómetro de mesa, datos de color agua clarificada de la planta



PH metro de mesa, valores registrados a la salida de la maqueta



Espectrofotómetro de mesa, datos de color a la salida de la maqueta

