

Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal

Evaluation of turbidity as a parameter indicator of treatment in a drinking water treatment plant

Mónica Rocío Martínez-Orjuela^{1a}, Julián Yamid Mendoza-Coronado^{1b}, Beatriz Eugenia Medrano-Solís^{1c},
Luisa Marina Gómez-Torres² y Carlos Alfonso Zafra-Mejía³

¹Especialización en Agua y Saneamiento Ambiental, Escuela de Posgrados, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Orcid: ^a 0000-0001-9736-6444, ^b 0000-0001-9000-2613, ^c 0000-0002-8601-8054

Correos electrónicos: ^a monikm_9103@hotmail.com, ^b ing.julian08@gmail.com, ^c beatrizmedrano.s@gmail.com

²Grupo de Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles (SyraS), Vicerrectoría de investigaciones, Universidad Manuela Beltrán, Colombia. Orcid: 0000-0002-4700-5939. Correo electrónico: luisa.gomez@docentes.umb.edu.co

³Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GiiAud), Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Orcid: 0000-0002-4061-4897.

Correo electrónico: czafra@udistrital.edu.co

Recibido: 13 marzo, 2019. Aceptado: 8 agosto, 2019. Versión final: 25 octubre, 2019

Resumen

Satisfacer la normatividad para suministro de agua apta para consumo humano es uno de los principales objetivos de las plantas potabilizadoras. Lo anterior, dada la contaminación de las fuentes de abastecimiento y a los cambios climáticos que ponen en riesgo los componentes del sistema en general. Este artículo analiza la turbidez como parámetro indicador del proceso de potabilización en una planta municipal, mediante la determinación del nivel de correlación que presenta la turbidez con otros parámetros y de acuerdo con los registros históricos entre los años 2011 y 2015. Así, mediante la toma de muestras y pruebas al afluente y efluente que se realiza periódicamente en la planta para medir la calidad del agua entregada a la comunidad, se determinan los niveles de los parámetros de calidad del agua y también se calculan los coeficientes de correlación lineal de Pearson entre estos. Concluyendo, que la turbidez presenta una correlación lineal positiva significativa con coliformes fecales ($r = 0,70$), coliformes totales ($r = 0,40$) y color aparente ($r = 0,40$). Adicionalmente, la turbiedad y coliformes fecales muestran las mejores correlaciones, presentando dos modelos de regresión lineal para el pronóstico de cada variable.

Palabras clave: agua potable; sulfato de aluminio; tratamiento de agua; turbiedad.

Abstract

To satisfy the regulations for water supply suitable for human consumption is one of the main objectives of the drinking water treatment plants. The above, given the pollution of the supply sources and the climatic changes that put at risk the components of the system in general. This paper analyzes the turbidity as an indicator parameter of the purification process in a municipal plant, by determining the level of correlation that the turbidity shows with other parameters and according to historical records between the years 2011 and 2015. Thus, by sampling and testing the influent and effluent that is periodically performed for the plant to measure the water quality supplied to the community it is possible to determine the levels of the water quality parameters, and the Pearson's linear correlation coefficients are also calculated between these. In conclusion, turbidity shows a significant positive linear correlation with fecal coliforms

($r = 0.70$), total coliforms ($r = 0.40$), and apparent color ($r = 0.40$). Additionally, turbidity and fecal coliforms show the best correlations, offering two linear regression models for the forecast of each variable.

Keywords: drinking water; aluminum sulphate; water treatment; turbidity.

1. Introducción

La contaminación del agua para consumo humano es una de las mayores causas de morbilidad y mortalidad en una población, debido a la exposición a contaminantes de tipo biológico y químico [1]. La intervención del hombre en ambientes naturales por medio de infraestructura, ampliación de áreas urbanas y rurales, y vertimiento de aguas residuales, aumentan la posibilidad de alteraciones repentinas en la calidad del agua de las fuentes utilizadas para abastecimiento de la población. Esto exige métodos complementarios para su tratamiento [2]. La eficiencia de una planta de tratamiento de agua potable está ligada al cumplimiento de la legislación en la calidad de agua suministrada sin importar los cambios en la calidad del agua del afluente [3]. Es así, como la turbidez se ha posicionado como un parámetro fisicoquímico importante para medir la calidad de agua en las fuentes de abastecimiento y en el agua suministrada a los usuarios [4]

La turbidez refleja el contenido de sustancias coloidales, minerales u orgánicas en el agua, por lo que puede ser indicio de contaminación [5]. Adicionalmente, elevados niveles de turbidez pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro. Así, la presencia de turbiedad en el agua representa un riesgo microbiológico para el ser humano [6]. Según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) a finales del siglo XX, la diarrea causada por mala calidad en el agua de consumo se ubica dentro de las principales causas de muerte en el mundo. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha documentado la muerte de aproximadamente 1,8 millones de personas al año, debido a enfermedades diarreicas que son fácilmente previsible si se tiene una adecuada gestión del agua potable [7].

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP) reconoce la importancia de la calidad del agua y su incidencia sobre la salud y el desarrollo de una población. Garantizar la calidad del agua favorece tanto la prevención como la transmisión de agentes que causan enfermedades [8]. Todos los seres humanos deben disponer de un abastecimiento seguro y satisfactorio de agua destinada para consumo humano y debe estar libre de microorganismos y sustancias que afecten negativamente la salud de sus consumidores [9]. En efecto, esto se logra a través de la operación adecuada de

una planta de tratamiento, logrando niveles de turbiedad inferiores a 1,0 UNT. Es importante controlar el riesgo de contaminación fecal y química monitoreando los procesos de tratamiento del agua. En este sentido, se recomienda incluir la turbidez entre las determinaciones básicas de mayor frecuencia para el monitoreo de la calidad del agua que ingresa a una planta y del agua suministrada a la población [4], [5], [9].

El agua potable es aquella que ha recibido un tratamiento destinado a cumplir ciertos parámetros físicos, químicos y microbiológicos con el fin de suministrarla a una población sin generar problemas de salud [10]. Para dar cumplimiento a lo anterior, se requiere de un conjunto de operaciones y procesos unitarios que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de mejorar sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas [11]. Esto incluye detectar cualquier posible contaminante microbiológico o químico, y aplicar las metodologías para que no continúe la contaminación [12].

Dentro de los procesos de potabilización se encuentra la clarificación cuyo objetivo es la máxima remoción de turbiedad [13], [14]. Esto por medio de la desestabilización eléctrica de las partículas coloidales y suspendidas que contiene el agua, conocida como la etapa de coagulación [15], [16]. En ocasiones estas reacciones producen CO_2 , disminuyendo el pH [16]. Seguido de la coagulación se encuentra la floculación, proceso físico en donde a través de una mezcla lenta se beneficia el contacto entre partículas, favoreciendo su aglomeración y, por ende, su posterior sedimentación [17]. La filtración constituye la última barrera en la remoción de partículas suspendidas [2]. Finalmente, se realiza un proceso de desinfección destruyendo los microorganismos patógenos aun presentes en el agua [18], [19].

Actualmente, existen diferentes métodos para mejorar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua después de ser captada de una fuente superficial. Los contaminantes del agua cruda se pueden eliminar por métodos físicos y químicos o por combinación de los dos. La selección de los métodos depende de la calidad de la fuente de abastecimiento [20]. La coagulación química es el proceso más eficiente para la eliminación de turbidez en el agua [19]. El sulfato de aluminio es el coagulante estándar empleado en tratamientos de agua [21]. La coagulación con aluminio a un pH de 6,5 a 7,0 puede lograr una remoción de 60 a 80% y con pH mayor a 9,5

la eficiencia de remoción sube a 90% [17]. Aunque la utilización del sulfato de aluminio se ha venido cuestionando en los últimos años por su posible relación con la aparición de enfermedades neurodegenerativas [22].

Estudios realizados en plantas potabilizadoras, establecen una relación entre la turbidez y los coliformes totales. La turbidez como propiedad óptica, no es un riesgo directo para la salud, pero se ha asociado con la presencia de bacterias, el aumento la demanda de cloro, la formación de productos de desinfección y promueve el crecimiento biológico en la red de distribución. Por lo que se sugiere el uso de este parámetro como indicador indirecto de contaminación microbiológica en aguas captadas de fuentes superficiales [11], [23].

Por ejemplo, la evaluación de la eficiencia de una planta de potabilización en el municipio de Centro-Tabasco, arrojó un valor máximo de remoción de turbidez hasta del 98,7%. El agua se volvió ligeramente ácida con un pH de 6,7, debido a la aplicación de sulfato de aluminio [24]. También un estudio realizado en la planta “Puerto Mallarino” de la ciudad de Cali, determinó que el incremento de la turbidez del río Cauca afectó la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua tratada, siendo la filtración la etapa más vulnerable; por lo que estos eventos exigieron una rápida y acertada respuesta operativa con el fin de mantener los estándares de calidad del agua tratada. También se identificó una alta correlación lineal entre la turbiedad máxima del agua cruda y la dosificación de coagulante y desinfectante [2].

El objetivo principal de esta investigación fue analizar la turbiedad como parámetro indicador del proceso de potabilización de la planta de tratamiento del municipio de Montería: Iguanas I (Colombia). Adicionalmente, se determinó el nivel de correlación que presentó la turbidez con parámetros como pH, color aparente, alcalinidad, conductividad eléctrica, coliformes totales y coliformes fecales; de acuerdo con los registros históricos entre los años 2011 y 2015. Por otro lado, se estimó la eficiencia de remoción de turbiedad en la planta mediante una comparación de los valores de entrada y salida de la planta. Así mismo, se determinó si el agua tratada cumplió con los límites establecidos en la resolución colombiana 2115 de 2007 y las directrices de la OMS; y se realizó un análisis en el tiempo de la variación de turbiedad del afluente para identificar los meses críticos durante la operación de la planta. En este análisis también se consideró la influencia del régimen de precipitación.

2. Metodología

2.1. Localización de la planta de tratamiento

Montería es un municipio colombiano con nivel de complejidad alto que se caracteriza por sus bajas precipitaciones en el mes de febrero con 11 mm de lluvia, considerándose el mes más seco del año. Por otro lado, la mayor parte de las precipitaciones se presentan en el mes de junio con un promedio de 170 mm lluvia [25]. Se encuentra ubicado a 18 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 28 °C. Su dotación neta es de 150 l/hab d. La Planta Potabilizadora de Montería “Iguanas I” está ubicada en el barrio San Francisco a la orilla del río Sinú. Se abastece de esta fuente superficial por medio de una captación con barcaza flotante que permite manejar las diferencias de nivel del río. La planta trata en promedio 50 l/s, operando las 24 horas del día, y los siete días de la semana. El tratamiento del agua consta de una etapa de mezcla rápida en un canal provisto de baffles deflectores, que le imprimen alta turbulencia al agua luego de dosificar sulfato de aluminio tipo B líquido (SALB) puro como coagulante.

El agua coagulada pasa a una etapa de floculación y sedimentación que ocurre dentro de un módulo de clarificación mediante la inducción de un movimiento circular ascendente. En esta etapa se cuenta con módulos de sedimentación acelerada tipo colmena. Seguido a esto, el agua es conducida a la etapa de filtración, en donde pasa por un medio filtrante, en este caso arena. Por último, la etapa de desinfección se realiza utilizando hipoclorito de calcio dosificado en la tubería que conduce el agua filtrada al tanque de almacenamiento superficial con capacidad de 200 m³. Posteriormente, el agua es distribuida a la red por medio de dos bombas de elevación. En ocasiones cuando la turbiedad sobrepasa 400 UNT es necesario el ajuste de pH dosificando cal (CaO) manualmente en la cámara de mezcla rápida debido a las altas dosis de coagulante utilizado. En la Fig. 1 se visualiza el proceso de potabilización de la planta Iguanas I.

Los anteriores análisis son registrados por el operador en el formato de control de tratamiento y posteriormente archivados para la trazabilidad de la calidad del agua tanto cruda como potable. A partir del año 2007, el área administrativa se ha encargado de recopilar toda la información que los funcionarios diligencian a diario y ha construido una base de datos que muestra el valor promedio mensual de cada parámetro. En esta investigación se analiza la información recopilada por el área administrativa entre los años 2011 y 2015.

2.2. Análisis de información

En esta fase se evaluó la correlación entre la turbiedad y los parámetros de calidad del agua afluente: pH, color aparente, alcalinidad, conductividad eléctrica, coliformes totales y coliformes fecales ($n = 58$, por cada parámetro); mediante la determinación del coeficiente de correlación lineal de Pearson (r). Lo anterior, con el fin de evaluar relaciones directas o indirectas entre estos parámetros y así valorar si la turbiedad del afluente es el parámetro indicador del proceso de potabilización en la planta. Adicionalmente, se evaluó la mejor tendencia entre los parámetros mencionados y se desarrollaron modelos lineales para el pronóstico de las variables con tendencia a ser considerable en el coeficiente de correlación de Pearson. Para el procesamiento y análisis de los datos se hizo uso del *software* Microsoft Excel V.2013.

2.2.1. Eficiencia de remoción de turbiedad

Se realizó una comparación entre los valores registrados de turbiedad a la entrada y salida de la planta entre los años 2011 y 2015. Se determinó la eficiencia de remoción mediante la ecuación (1).

$$\text{Eficiencia} = \frac{(\text{Turbiedad}_i - \text{Turbiedad}_o)}{\text{Turbiedad}_i} * 100\% \quad (1)$$

Donde, Turbiedad_i y Turbiedad_o fueron la turbiedad a la entrada y a la salida de la planta en UNT, respectivamente.

2.3. Análisis legislativo

Se realizó una comparación entre los parámetros medidos en el efluente de la planta tales como pH, turbiedad, color aparente, alcalinidad, conductividad eléctrica, coliformes totales, coliformes fecales y cloro residual libre, con los valores máximos permisibles para aguas de consumo humano en Colombia y los sugeridos por la OMS; determinando de este modo si el agua tratada cumple con la legislación nacional vigente y con las directrices de la OMS [19]. Finalmente, para determinar los meses críticos en el funcionamiento de la planta se analizaron y compararon los promedios mensuales a nivel multianual de la turbiedad afluente y efluente. En los anteriores análisis también se consideró la influencia de la precipitación.

3. Resultados

3.1. Relación entre turbiedad y parámetros de calidad del agua

En la Fig. 2, se muestran los valores obtenidos para los coeficientes de correlación lineal de Pearson durante el periodo analizado. A partir de estos resultados, se evidenció que los parámetros de turbiedad y coliformes fecales ($r = 0,70$), y turbiedad y coliformes totales ($r = 0,40$), conductividad y pH ($r = 0,40$), conductividad y alcalinidad ($r = 0,40$), y coliformes fecales y coliformes totales ($r = 0,60$) presentaron coeficientes de correlación entre débiles y considerables.

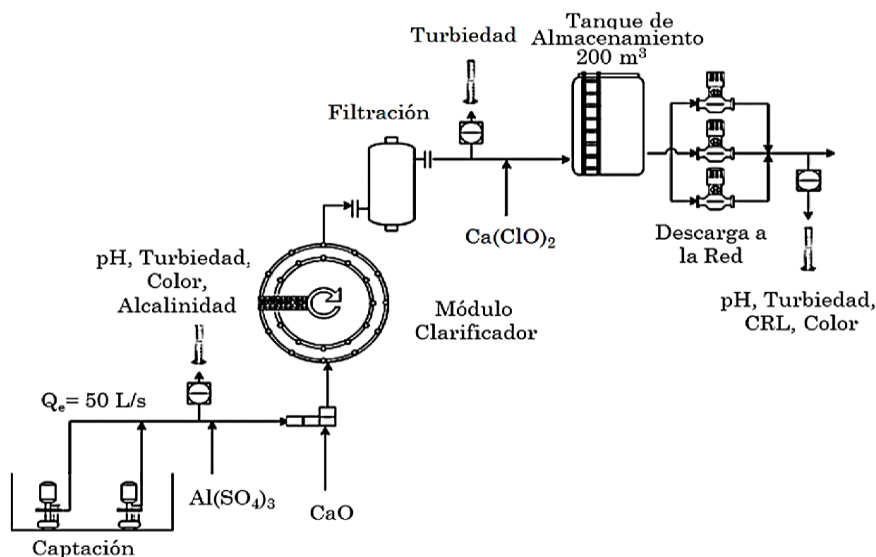


Figura 1. Proceso de potabilización de la planta Iguanas I.

Adicionalmente, se observó el siguiente orden de precedencia en la magnitud de los coeficientes de correlación de Pearson entre parámetros de calidad del agua: Turbiedad > Coliformes Fecales, pH y alcalinidad > Conductividad.

Por otro lado, se calcularon los coeficientes de correlación en época de bajas precipitaciones y se comprobó su variación con respecto a los obtenidos durante todo el periodo de estudio. Siendo los coeficientes de correlación durante estos periodos considerables entre turbiedad y color ($r = 0,70$), y turbiedad y pH ($r = -0,50$). De igual manera, el orden de precedencia en la magnitud de los coeficientes de correlación durante el periodo de disminución de la precipitación fue el siguiente: Turbiedad > Coliformes Fecales, pH y Alcalinidad > Conductividad. Para los meses de altas precipitaciones, los coeficientes de correlación fueron similares a los obtenidos durante todo el periodo de estudio, excepto entre los parámetros de turbiedad y color ($r = 0,20$).

El coeficiente de correlación lineal entre turbiedad y color aparente obtenido fue similar al reportado por Redondo y López [8] en la planta potabilizadora El Dorado de Bogotá (Colombia), aunque en este los

resultados correspondieron a agua tratada ($r = 0,45$). Por otro lado, el coeficiente de correlación obtenido entre turbiedad y coliformes totales fue menor al reportado por Marco et al. (2004) ($r = 0,98$) en una planta potabilizadora de la ciudad de Concepción del Uruguay. Esto confirmó lo sugerido por McJunkin [26], quien recomendó el uso de la turbidez como indicador cualitativo indirecto de riesgo de contaminación microbiológica en aguas captadas de fuentes superficiales. Adicionalmente, la turbiedad y los coliformes fecales mostraron la mejor asociación y se desarrollaron los modelos para el pronóstico de cada variable (Tabla 1). Estos fueron evaluados a partir del promedio multianual, siendo “y” el valor de coliformes fecales en UFC/100 ml y “x” el valor de turbiedad en UNT.

Tabla 1. Modelos de correlación desarrollados entre coliformes fecales y turbiedad

Modelo	Ecuación	R ²
Lineal	$Y = 9,26 * X + 1364$	0,531
Potencial	$Y = 301,6 * X^{0,443}$	0,581

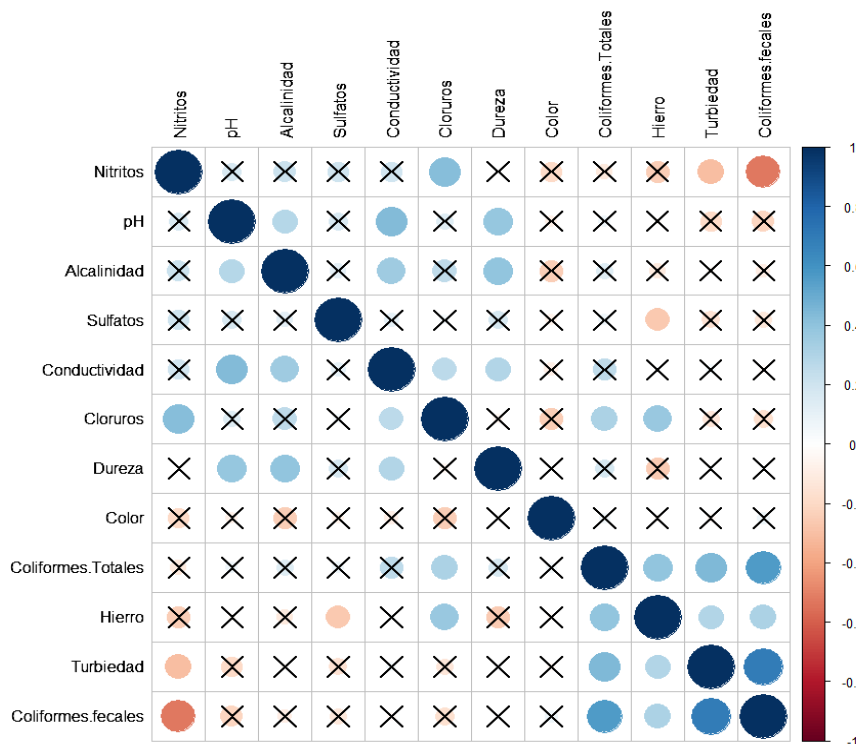


Figura 2. Coeficientes de correlación lineal entre los parámetros de calidad del agua afluente.

3.2. Eficiencia de remoción de turbiedad

En promedio, se observó a nivel multianual que en el 75% del periodo evaluado la eficiencia de remoción de turbiedad se mantuvo superior al 98,8% (ver Fig. 3). Excepto en el mes de febrero, donde se presentó el porcentaje de remoción de turbiedad más bajo en la planta, con un valor cercano al 96%. Este mes se caracterizó por presentar bajas precipitaciones en el municipio de Montería [24], por lo cual podemos sugerir que para este periodo se realizaron mantenimientos en la planta los cuales probablemente afectaron el proceso de potabilización. Además, el valor promedio multianual de turbiedad del agua afluente para el mismo mes fue de 47,4 UNT, el cual fue relativamente bajo en comparación con el promedio registrado en el mes de junio (240 UNT). De acuerdo con lo reportado por el IDEAM [24], junio fue el mes en donde mayores precipitaciones se presentaron en el sector durante el periodo analizado. Para el caso de coliformes fecales, la tendencia de remoción se mantuvo constante a lo largo del periodo evaluado (100%). Sin embargo, la remoción de color al igual que la remoción de turbiedad presentó su valor más bajo en el mes de febrero (82,7%). En promedio, la remoción de color fue de 92,7%. De acuerdo con lo anterior, se observó probablemente una relación directa entre la remoción de turbiedad y la remoción de color.

En promedio, se observó también a nivel multianual que en el 75% del periodo evaluado la eficiencia de remoción

de turbiedad se mantuvo superior al 98,8% (Fig. 3). Excepto en el mes de febrero, donde se presentó el porcentaje de remoción de turbiedad más bajo de la planta con un valor cercano al 96%. Este mes, se caracterizó por presentar bajas precipitaciones en el municipio de Montería [25], por lo que en este periodo se realizaron operaciones de mantenimiento en la planta aprovechando la ausencia de lluvias, lo cual posiblemente afectó el proceso de potabilización.

Adicionalmente, el valor promedio multianual de turbiedad del agua afluente para el mismo mes fue de 47,4 UNT, el cual fue relativamente más bajo en comparación con el promedio registrado en el mes de junio (240 UNT). Esta fue otra posibilidad por la que se redujo la eficiencia en el mes más seco, ya que cuando mejor fue la calidad del afluente se tendió a una menor eficiencia de remoción. De acuerdo a lo reportado por el IDEAM [25], junio fue el mes en donde mayores precipitaciones se presentaron en el sector durante el periodo analizado. Para el caso de coliformes fecales, la tendencia de remoción se mantuvo constante a lo largo del periodo evaluado (100%). Sin embargo, la remoción de color al igual que la remoción de turbiedad presentó su valor más bajo en el mes de febrero (82,7%).

En promedio la remoción de color fue de 92,7%. De acuerdo con lo anterior, se observó probablemente una relación directa entre la remoción de turbiedad y la remoción de color.

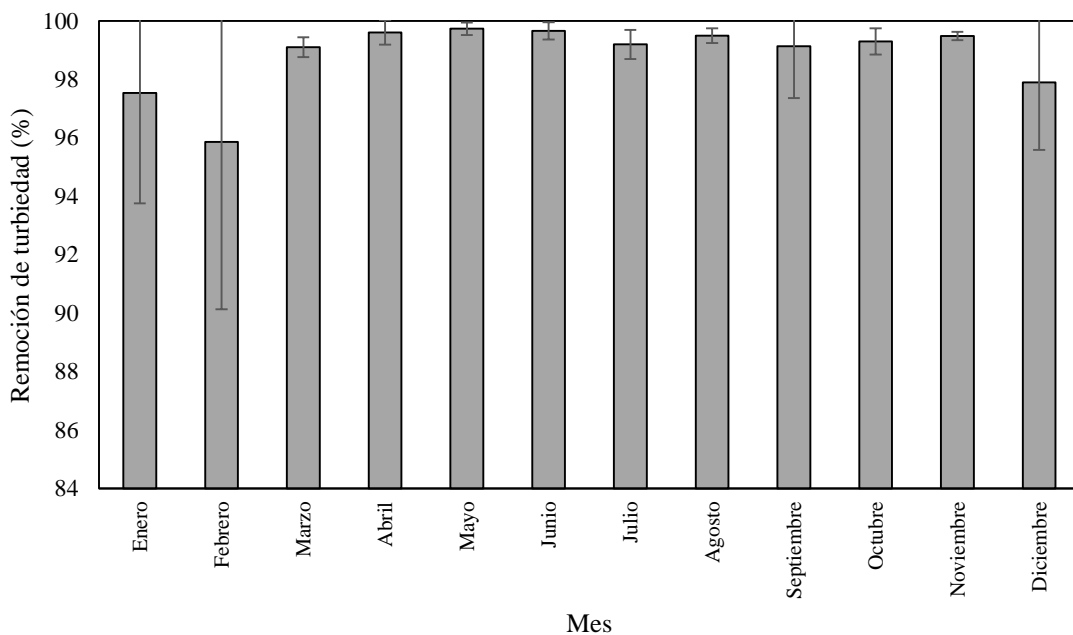


Figura 3. Eficiencia de remoción multianual de turbiedad durante los años 2011-2015.

3.3. Análisis legislativo

La Fig. 4 muestra en resumen los valores mínimos y máximos registrados de los parámetros estudiados y los valores máximos permisibles por la legislación colombiana e internacional (OMS), siendo más exigente la norma colombiana ya que impone límites a diferentes parámetros que no son tenidos en cuenta por la OMS. En primer lugar, el pH registró valores dentro del rango permisible (6,5-9,0) de acuerdo con la normatividad vigente en Colombia y recomendada por la OMS. El pH promedio del agua efluente fue de 6,86. Por otro lado, el máximo valor de turbiedad reportado fue de 8,3 UNT. Durante el 90% del periodo evaluado la turbiedad se mantuvo menor a 2,0 UNT y el 10% restante no cumplió con el valor máximo permisible (Resolución 2115 de 2007). En promedio, el valor de turbidez fue de 1,2 UNT.

Adicionalmente, en el agua afluente de la planta de estudio se registró un valor máximo de 20.00 UPC. En el 98,3% del periodo analizado, el color cumplió con lo establecido en la legislación vigente y el 1,7% restante, reportó valores por encima del máximo permisible. En promedio, el color aparente del efluente fue de 3,19 UPC. En cuanto a la alcalinidad, se presentaron valores inferiores al máximo permisible (200 mg/L CaCO_3). En promedio, la alcalinidad fue de 30,1 mg/L CaCO_3 . Del mismo modo, los valores de conductividad eléctrica reportados fueron inferiores al máximo permisible para aguas de consumo humano (1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). En promedio, la conductividad presentó un valor de 126,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$. En cuanto a los valores registrados de coliformes fecales y

coliformes totales, el 100% del periodo analizado se cumplió con la normatividad, siendo 0,0 UFC/100 ml el valor resultante y al mismo tiempo el máximo permisible.

Finalmente, el cloro residual libre presentó valores dentro del rango permisible. La media de este parámetro fue de 1,14 mg/L. El cloro residual libre se encontró durante todo el periodo analizado dentro del rango permitido según la normatividad colombiana vigente y la OMS. Los resultados obtenidos se aproximaron a los reportados por Ibrahim y Abu Shanab [27] para una planta potabilizadora en Beheira (Egipto), en donde el promedio de este parámetro fue de 1,47 mg/L. Se observó también que los parámetros que no cumplieron con la legislación durante el periodo analizado fueron turbiedad y color. Presentando el color y la turbiedad un valor 33,3% y 315% superior al máximo permisible, respectivamente.

3.4. Periodos críticos de turbiedad

Por último, para realizar el análisis en el tiempo de la variación de turbiedad del afluente se graficaron los promedios multianuales de turbiedad de entrada y salida de la planta. Esto con el fin de tener puntos de comparación y determinar los meses críticos donde se presentaron picos de alta turbiedad.

En la Fig. 4 se observa que a partir de abril y hasta octubre aumentó la turbiedad. Esto coincidió con los registros de precipitación consultados en el IDEAM [25], en donde se observó que durante el periodo analizado entre los meses de abril y octubre se presentaron altas precipitaciones en el sector.

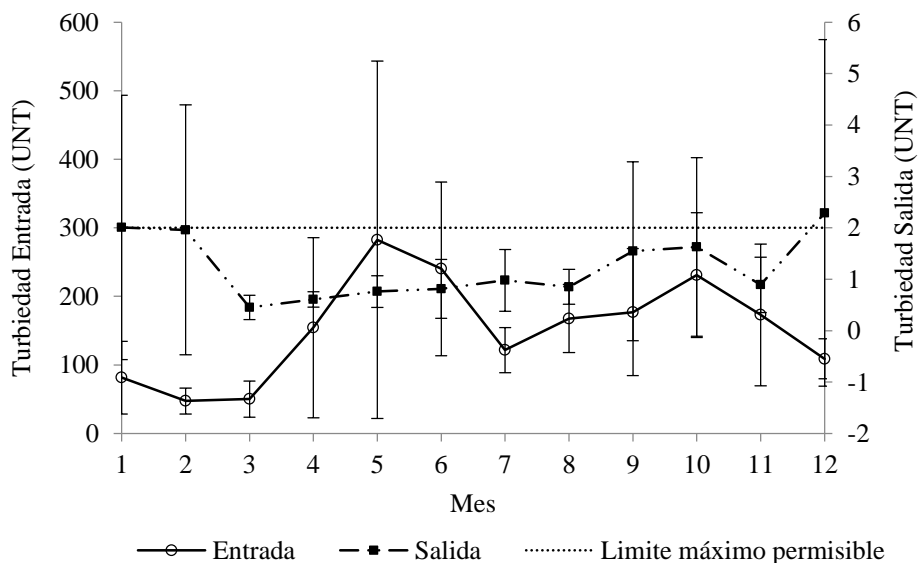


Figura 4. Comparación de turbiedad promedio multianual del afluente y efluente durante los años 2011-2015.

En promedio, durante estos meses la máxima precipitación registrada se dio en el mes de junio (226 mm) y la mínima en el mes de abril (79 mm).

Se puede analizar de la Fig. 4, que durante los meses de enero, febrero y diciembre se presentaron puntos críticos de operación, con valores de turbiedad de salida iguales o superiores al límite máximo permisible por la legislación colombiana (2,0 UNT). Según los reportes del IDEAM [25], durante estos meses se presentaron en promedio precipitaciones de 0,0, 11 y 58 mm respectivamente; siendo estos valores de precipitación los mínimos observados durante el periodo de estudio.

4. Conclusiones

Los resultados muestran que existe una correlación lineal positiva de media a fuerte entre la turbiedad y los siguientes parámetros: coliformes fecales ($r = 0,70$), coliformes totales ($r = 0,40$) y color aparente ($r = 0,40$). Estos parámetros podrían ser considerados como indicadores dentro de la evaluación operacional de una planta potabilizadora con características similares a las de estudio. Es decir, para un caudal de tratamiento de 50 L/s, sulfato de aluminio tipo B como coagulante, módulo de clarificación para floculación y sedimentación, y filtros tipo ascendente de arena. En promedio, la eficiencia de remoción de turbiedad de la planta potabilizadora Iguanas I es de 98,8%. En general, el agua tratada cumple con lo establecido en la resolución colombiana 2115 de 2007 y la OMS en sus guías de agua apta para consumo humano.

En promedio, los periodos críticos de remoción de turbiedad de la planta son los meses de enero, febrero y diciembre entre los años 2011 y 2013, con una concentración en el efluente entre 6,1-8,3 UNT. La turbiedad del afluente posiblemente se ve afectada por las variaciones en las precipitaciones. Es decir, se observa en promedio un aumentando de la turbiedad desde 50 UNT en marzo y hasta 282 UNT en mayo, posiblemente evidenciando elevados valores durante los periodos en los cuales la precipitación aumenta hasta 100 mm. Los hallazgos también muestran que en la planta de potabilización de estudio la eficiencia de remoción de turbiedad es elevada (98,8%). Es decir, todos sus procesos unitarios posiblemente actuaron de manera adecuada a pesar de existir variaciones de hasta 713 UNT en el afluente durante los meses de mayor precipitación. Durante estos meses todos los parámetros del efluente se encuentran dentro de los límites permisibles de la resolución colombiana 2115 de 2007 [28] y las guías de la OMS [19].

Esta investigación se constituye en un punto de referencia para las empresas prestadoras de servicio de acueducto que deseen utilizar fuentes de abastecimiento con calidad de agua similar a la presentada en este caso de estudio. Esto, incluyendo la turbiedad entre los parámetros básicos de mayor frecuencia para el monitoreo de la calidad del agua, dada la rapidez de la obtención del resultado y el bajo costo en su determinación. Se debe también tener en cuenta que para estos casos específicos (tipo de fuente de abastecimiento y planta de tratamiento), la calidad del agua cruda debe ser muy buena y sin la presencia de contaminantes disueltos que representen un riesgo para la salud humana. Por lo tanto, se debe tener completa seguridad de lo anterior mediante muestreos periódicos a la fuente de abastecimiento de agua que garantice la seguridad de los usuarios. Por último, los resultados obtenidos en este estudio permiten demostrar que el agua suministrada a la población durante el intervalo analizado fue apta para el consumo humano y no presenta un riesgo para la salud pública.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles - SYRAS de la Universidad Manuela Beltrán (Colombia), y al Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental - GIAUD de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia).

Referencias

- [1] E. Boelee, G. Geerling, B. van der Zaan, A. Blauw, and A. D. Vethaak, "Water and health: From environmental pressures to integrated responses," *Acta Trop.*, vol. 193, pp. 217–226, 2019, doi: 10.1016/j.actatropica.2019.03.011.
- [2] C. Montoya, D. Loaiza, P. Torres, C. H. Cruz, and J. C. Escobar, "Efecto Del Incremento En La Turbiedad Del Agua Cruda Sobre La Eficiencia De Procesos Convencionales De Potabilización (Effect of Increase of Raw Water Turbidity on Efficiency of Conventional Drinking Water Treatment Processes)," *Rev. EIA*, vol. 8, no. 16, pp. 137–148, 2011, doi:10.24050/reia.v8i16.438.
- [3] A. J. Hartshorn, G. Prpich, A. Upton, J. Macadam, B. Jefferson, and P. Jarvis, "Assessing filter robustness at drinking water treatment plants," *Water Environ. J.*, vol. 29, no. 1, pp. 16–26, Mar. 2015, doi:10.1111/wej.12094.
- [4] M. Stevenson and C. Bravo, "Advanced turbidity prediction for operational water supply planning," *Decis. Support Syst.*, vol. 119, pp. 72–84, 2019, doi: 10.1016/j.dss.2019.02.009.

- [5] D. Miljojkovic, I. Trepsic, and M. Milovancevic, "Assessment of physical and chemical indicators on water turbidity," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 527, p. 121171, 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.121171.
- [6] World Health Organization, "Water Quality And Health-Review Of Turbidity: Information for regulators and water suppliers," 2017.
- [7] B. Manzolillo, "Uso de Tecnologías Limpias en la Desinfección del Agua para la Reducción de Diarrea en Niños. Revisión Sistemática," *Tekhné*, vol. 22, no. 1, pp. 50–57, 2019.
- [8] A. C. López Guali And E. A. Redondo Peñuela, "Evaluación De La Calidad Del Agua En La Planta Potabilizadora El Dorado (Bogotá D.C.) A Través Del Análisis Estadístico De Series De Tiempo," Universidad Distrital Francisco José De Caldas, 2016.
- [9] S. Hussain, A. S. Ghouri, and A. Ahmad, "Pine cone extract as natural coagulant for purification of turbid water," *Heliyon*, vol. 5, no. 3, p. e01420, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01420.
- [10] J. A. Orellana, "Características del agua potable," 2005. [Online]. Disponible en: http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_03_Caracteristicas_del_Agua_Potable.pdf
- [11] M. F. García Moscoso and M. B. Marca Sinchi, "Evaluación de la eficiencia del proceso de potabilización de agua de la planta Patamarca-San Andrés," Universidad de Cuenca, 2016.
- [12] G. Etienne, *Potabilización Y Tratamiento De Agua*, 1st Ed. Biblioteca Virtual De Desarrollo Sostenible Y Salud Ambiental, 2009.
- [13] J. Maroušek *et al.*, "Ferrous sludge from water clarification: Changes in waste management practices advisable," *J. Clean. Prod.*, vol. 218, pp. 459–464, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.037.
- [14] I. Mendoza *et al.*, "Eficiencia de *Hylocereus lemairei* como coagulante - floculante en aguas para consumo humano," *Impacto Científico*, vol. 3, no. 1, pp. 53–69, 2008.
- [15] A. Matilainen, M. Vepsäläinen, and M. Sillanpää, "Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 159, no. 2, pp. 189–197, 2010, doi: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
- [16] H. A. Restrepo Osorno, "Evaluación Del Proceso De Coagulación-Floculación De Una Planta De Tratamiento De Agua Potable," Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín, 2009.
- [17] M. Sillanpää, M. C. Ncibi, A. Matilainen, and M. Vepsäläinen, "Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review," *Chemosphere*, vol. 190, pp. 54–71, 2018, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.113.
- [18] D. Xu *et al.*, "A comparison study of sand filtration and ultrafiltration in drinking water treatment: Removal of organic foulants and disinfection by-product formation," *Sci. Total Environ.*, vol. 691, pp. 322–331, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.071.
- [19] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*, 4th ed. World Health Organization, 2017.
- [20] C. P. Gerba and I. L. Pepper, "Drinking Water Treatment," in *Environmental and Pollution Science*, 3rd ed., M. L. Brusseau, I. L. Pepper, and C. P. B. T.-E. and P. S. (Third E. Gerba, Eds. Academic Press, 2019, pp. 435–454. doi: 10.1016/B978-0-12-814719-1.00024-0.
- [21] D. Castrillón Bedoya And M. D. L. Á. Giraldo, "Determinación De Las Dosis Óptimas Del Coagulante Sulfato De Aluminio Granulado Tipo B En Función De La Turbiedad Y El Color Para La Potabilización Del Agua En La Planta De Tratamiento De Villa Santana," Universidad Tecnológica De Pereira, 2012.
- [22] S. C. Bondy and A. Campbell, "Chapter Five - Aluminum and Neurodegenerative Diseases," in *Environmental Factors in Neurodegenerative Diseases*, vol. 1, M. Aschner and L. G. B. T.-A. in N. Costa, Eds. Academic Press, 2017, pp. 131–156. doi: 10.1016/bs.ant.2017.07.008.
- [23] L. Marcó, R. Azario, C. Metzler, M. Del, and C. García, "La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina)," *Hig. y Sanid. Ambient.*, vol. 4, pp. 72–82, 2004.
- [24] R. Solís Silvan, J. R. Laines Canepa, And J. R. Hernández Barajas, "Mezclas Con Potencial Coagulante Para Clarificar Aguas Superficiales," *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, Vol. 28. Scielomx, Pp. 229–236, 2012.

[25] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), “Boletín Climatológico Mensual”, 2017. [Online]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual>. [Accedido: 08-ago-2019]

[26] F. E. Mcjunkin, *Agua y salud humana*. Organización Panamericana de la Salud, 1988.

[27] H. Z. Ibrahim and M. A. Abu-Shanab, “Monitoring of some disinfection by-products in drinking water treatment plants of El-Beheira Governorate, Egypt,” *Appl. Water Sci.*, vol. 3, no. 4, pp. 733–740, 2013, doi:10.1007/s13201-013-0121-2.

[28] Ministerio De La Protección Social And V. Y. D. T. Ministerio De Ambiente, *Resolución Número 2115*. Colombia, 2007, p. 23. [Online]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_2115_de_2007.pdf. [Accedido: 08-ago-2019]