

Modelo Correlacional de Sólidos Suspendidos Totales Presentes en Aguas Residuales Domésticas Mediante Análisis de Turbiedad¹

Sandra M. Bolívar Cuartas², Diego L. Castaño Muñoz³, Omar D. Gutiérrez Flórez⁴

Resumen

Introducción: Standard Methods Organization definió una serie de métodos analíticos que permiten medir la calidad del agua, entre los que puede citarse la norma 2540 D como el método convencional para determinar la cantidad de sólidos suspendidos totales (SST). Este método, sin embargo, toma mucho tiempo (2 horas) en desarrollarse, por lo que actualmente existen diversos esfuerzos para cuantificar los SST de forma más rápida, mediante su correlación con otros parámetros fisicoquímicos. En este sentido, los parámetros SST y turbiedad son de gran interés en esta

investigación, con los cuales se busca establecer una posible correlación usando un modelo matemático simple. **Objetivo:** el propósito de esta investigación es establecer un modelo de correlación entre la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) y unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) en muestras de Caolín que permita una determinación rápida e *in-situ* de los niveles de SST en aguas residuales domésticas. **Materiales y Métodos:** el desarrollo experimental fue realizado en tres etapas: primero, se prepararon soluciones a partir de Caolín a las que se les determinó la turbiedad; segundo, se realizó una regresión lineal que contempló como variables los

1 Artículo Original derivado de la Investigación, del trabajo de grado de pregrado: Modelo de correlación del contenido de sólidos suspendidos totales presentes en aguas residuales de uso doméstico mediante el método de turbidez, con filiación al Institución Universitaria ITM en el periodo de agosto a noviembre de 2020, financiado por la Institución Universitaria ITM, en la ciudad de Medellín - Colombia.

2 Estudiante de Química Industrial. Grupo Alquimia, Facultad Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No 76A-354 Vía al Volador, Medellín, Colombia, ORCID: 0000-0001-8508-5565. Correo: sandrabolivar241631@correo.itm.edu.co.

3 Estudiante de Química Industrial. Grupo Alquimia, Facultad Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No 76A-354 Vía al Volador, Medellín, Colombia, ORCID: 0000-0003-4022-4722. Correo: diegocastano76395@correo.itm.edu.co.

4 Ing. Químico, M. Sc en Ciencias-Química. Grupo Alquimia, Facultad Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Calle 73 No 76A-354 Vía al Volador, Medellín, Colombia, ORCID: 0000-0003-2955-6224. Correo: omargutierrez@itm.edu.co.

Autor para Correspondencia: Sandra Bolívar, e-mail: sandrabolivar241631@correo.itm.edu.co
Recibido: 30/11/2020 Aceptado: 15/08/2021

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

parámetros de concentración de SST y turbiedad por nefelometría; y tercero, se tomaron dos muestras de aguas residuales domésticas proveniente de un afluyente y un acuario, a la que se le aplicaron las mismas mediciones, SST y turbiedad. **Resultados:** se construyó una curva de calibración donde se muestra la regresión lineal entre SST y turbiedad, posteriormente, se interpolan las NTU de las muestras de agua problema con la concentración de SST y se obtuvo como resultado 47,69mgSST/L para el afluyente y 106,29mgSST/L para el agua del acuario, los

cuales presentan una diferencia de 2,7 % y 1,7 % respectivamente con relación a los valores estimados con el método termogravimétrico convencional (norma 2540 D) 49mgSST/L y 104,50mgSST/L. **Conclusión:** es posible establecer un modelo correlacional para la determinación de la concentración de SST en muestras de aguas residuales domésticas usando el método de turbiedad.

Palabras clave: Sólidos suspendidos totales; turbiedad; correlación; aguas residuales domésticas.

Correlational Model of Total Suspended Solids Present in Domestic Wastewater Using Turbidity Analysis

Summary

Introduction: Standard Methods Organization defined a number of analytical methods that allow measuring water quality, including the standard norm 2540 D as the conventional method for determining the quantity of total suspended solids (TSS). This method, however, takes a long time (2 hours) to develop, so there are currently several efforts to quantify TSS more quickly, by correlating them with other physicochemical parameters. In this sense, the parameters TSS and turbidity are of great interest in this research, with which we seek to establish a possible correlation using a simple mathematical model. **Objective:** the purpose of this research is to establish a correlation model between the concentration of total

suspended solids (TSS) and nephelometric turbidity units (NTU) in Kaolin samples that allow a rapid determination and *in-situ* of TSS levels in domestic wastewater. **Materials and methods:** the experimental development was carried out in three stages: first, solutions were prepared from Kaolin to which turbidity was determined; second, a linear regression was performed that considered as variables the parameters of TSS concentration and turbidity by nephelometry; and third, two samples of domestic wastewater from a tributary and an aquarium were taken, to which the same measurements of TSS and turbidity, were applied. **Results:** a calibration curve was built showing the linear regression between TSS and turbidity, subsequently, the NTU of the water samples problem with the concentration of TSS was interpolated and the result obtained was 47.69 mgTSS/L for the tributary and 106.29mgTSS/L for the aquarium water, which have a difference of 2.7 % and 1.7 % respectively in relation to the values estimated with the conventional

thermogravimetric method (standard norm 2540 D) 49 mgTSS/L and 104.50mgTSS/L. **Conclusion:** it is possible to establish a correlational model for the determination of

the concentration TSS in domestic wastewater samples using the turbidity method.

Keywords: Total suspended solids; turbidity; correlation; domestic wastewater.

Modelo Correlacional de Sólidos Suspensos Totales Presentes em Águas Residuais Domésticas Usando Análise de Turbidez

Resumo

Introdução: a Standard Methods Organization definiu uma série de métodos analíticos que permitem medir a qualidade da água, incluindo a norma padrão 2540 D como o método convencional para determinar a quantidade de sólidos suspensos totais (SST). Este método, no entanto, leva um longo tempo (2 horas) para se desenvolver, por isso existem atualmente vários esforços para quantificar a SST mais rapidamente, correlacionando-os com outros parâmetros físico-químicos. Nesse sentido, os parâmetros SST e turbidez são de grande interesse nesta pesquisa, com a qual buscamos estabelecer uma possível correlação utilizando um modelo matemático simples. **Objetivo:** o objetivo desta pesquisa é estabelecer um modelo de correlação entre a concentração de sólidos suspensos totais (SST) e unidades de turbidez nefelométrica (UTN) em amostras de Kaolin que permita uma determinação rápida e *in situ* dos níveis de SST em águas residuais domésticas. **Materiais e Métodos:** o desenvolvimento experimental foi realizado em três etapas: primeiro, foram preparadas soluções a

partir de Kaolin para as quais a turbidez foi determinada; segundo, foi realizada uma regressão linear que considerou como variáveis os parâmetros de concentração de SST e turbidez por nefelometria; e terceiro, foram colhidas duas amostras de águas residuais domésticas de um afluente e um aquário, para as quais foram aplicadas as mesmas medidas de SST e turbidez. **Resultados:** foi construída uma curva de calibração mostrando a regressão linear entre SST e turbidez, posteriormente, a UTN do problema das amostras de água com a concentração de SST foi interpolada e o resultado obtido foi de 47,69 mgSST/L para o afluente e 106,29 mgSST/L para a água do aquário, que têm uma diferença de 2,7 % e 1,7 % respectivamente em relação aos valores estimados com o método termogravimétrico convencional (padrão 2540 D) 49 mgSST/L e 104,50 mg SST / L. **Conclusão:** é possível estabelecer um modelo correlacional para a determinação da concentração de SST em amostras domésticas de águas residuais utilizando o método de turbidez.

Palavras-chave: Sólidos suspensos totais; turbidez; correlação; águas residuais domésticas.

Introducción

La mayoría de los países tienen marcos legales orientados a regular los vertimientos de agua de naturaleza doméstica e industrial. Estos controles buscan determinar la concentración de carga contaminante presente en los efluentes que llegan a los cuerpos de agua y que afectan la calidad de esta.

En Colombia existe un marco legal orientado a regular los vertimientos de este recurso en los diferentes sectores industriales, por ejemplo, el portal web del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estipula que:

La norma de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015 reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años) respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país. Esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas presentes en ocho sectores económicos del país.

Esta Resolución es de obligatorio cumplimiento para todas aquellas personas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios y que en el desarrollo de estas generen aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

En este sentido, el aumento de la población y los desarrollos industriales, han generado impactos negativos en el uso del

recurso hídrico, de acuerdo con Ruiz, Carvajal y Escobar (2007,172) los cuerpos de agua son fuertemente afectados por sustancias cada vez más agresivas y difíciles de tratar debido a su naturaleza química.

A raíz de la crisis que se está viviendo entorno al problema de la contaminación del agua, la mayoría de los gobiernos definen programas de monitoreo que buscan medir parámetros físicos, químicos y biológicos (Ruiz, Carvajal & Escobar, 2007,177). En efecto, desde que la calidad del agua se convirtió en una preocupación mundial, distintas organizaciones y comunidades científicas han desarrollado métodos analíticos que apuntan a generar información precisa sobre las sustancias contaminantes presentes en los hidrosistemas. A propósito, The Standard Methods Organization es una entidad integrada por tres sociedades técnicas: La Asociación Estadounidense de Salud Pública (APHA), la Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas (AWWA) y la Federación del Medio Ambiente del Agua (WEF), quienes desde el año de 1905, han realizado un compendio de técnicas analíticas para estimar la carga contaminante del agua, el cual se consolidó con el nombre de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, documento que se convirtió en referente para la comunidad científica cuyo campo de interés es monitorear la calidad del agua.

Por otro lado, es importante entender cómo funcionan estas técnicas, primero, cuando se habla de turbiedad, se está haciendo referencia a una propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión (Carpio, 2007, 2), y en segundo

lugar, la termogravimetría referenciada como método 2540 D del *Methods for the Examination of Water and Wastewater*, consiste en retener partículas sólidas en un filtro de fibra de vidrio a través del que se hace pasar una muestra homogénea; el residuo que queda retenido se seca a 103 – 105 °C y el incremento en el peso del filtro representa la cantidad de SST (Hernández, 2007, 2), este último requiere un tiempo de desarrollo de aproximadamente dos días, el cual es superior al tiempo necesario para el primero.

Al respecto, en el campo de la investigación relacionado con el desarrollo de nuevos métodos analíticos y/o estrategias que apunten a mejorar el tiempo y la generación de resultados obtenidos en la medición de los distintos parámetros de la calidad del agua, se plantean diseños experimentales con el objetivo de vincular una técnica con otra y que permita determinar parámetros o hacer aproximaciones que ayuden a tomar decisiones frente a los tratamientos que la industria suele utilizar para sus vertimientos, sin embargo, es claro que el documento de referencia *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* no considera el establecimiento de relaciones entre métodos analíticos distintos, aunque ello no representa un impedimento para lograrlo.

Se puede afirmar entonces que este tipo de relaciones vinculantes entre métodos analíticos no es tan sencillo como se quisiera, porque una muestra de agua que presenta una diversidad de contaminantes en términos de sus propiedades físicas y químicas hace que no solo la naturaleza de la muestra sea compleja, sino el mismo análisis sobre

ella (Nasrabadi et al (2014)). No obstante, algunos investigadores ya han intentado diseñar modelos correlacionales entre SST y turbiedad, lo que lo convierte en un tema de interés de algunos estudios (Nasrabadi et al., 2014, Nasrabadi et al., 2016; Downing, 2006; Rügner et al., 2014; Stubblefield et al., 2007 & Torres et al., 2013). Al consultar los resultados de estos diseños experimentales propuestos por otros (Nasrabadi et al., 2016; Torres et al., 2013; Rügner et al., 2014), se hallaron experiencias positivas, sin embargo, hay otros que han encontrado dificultades en asumir este modelo como algo válido o generalizado (Downing, 2006 y Gippel, 1995).

Existen varias razones que justifican el hecho de que establecer este tipo de correlaciones es una tarea compleja, entre ellas se destacan:

1. La distribución del tamaño de las partículas es una variable importante porque hay una dependencia con las características de la fuente y de los periodos estacionales. También, se cree que hay una relación directa entre el tamaño y la concentración, ya que pueden presentarse aglomeraciones dependiendo de las propiedades de las mezclas que se forman (Gippel, 1995).
2. La naturaleza de la partícula es importante porque la gravedad específica en sustancias orgánicas suele ser menor que en los minerales, lo que afecta también su suspensión en la superficie. Normalmente las partículas con superficie porosa tienen un orden de distribución muy distinto

a las partículas con superficies suaves, lo que tiene también implicaciones en la forma en que se refleja la luz durante la medición de la turbidez (Gippel, 1995).

3. El color del agua hace que la luz incidente y dispersa se absorba parcialmente, por lo que se reduce la turbidez nefelométrica (Gippel, 1995).
4. Por otro lado, Downing (2006) centra su trabajo en describir las causas en la sensibilidad de los sensores ópticos de diferentes modelos para medir la turbidez, lo cual es un indicador de las incertidumbres que se presentan en los instrumentos para medir los parámetros determinados.

Básicamente, lo anterior representa variables que se tuvieron en cuenta en distintas investigaciones, sin embargo, aunque todas coinciden en el análisis de muestras compuestas, vemos que los resultados no fueron los mismos para todos y ello se justifica en el hecho de que el comportamiento de los sedimentos es aleatorio y depende de las variables previamente mencionadas.

Por lo tanto, esta investigación se orientó en establecer un modelo de correlación entre la concentración de SST y turbiedad en muestras de Caolín que permita una determinación rápida e *in-situ* de los niveles de SST en aguas residuales domésticas. Para tal efecto, se prepararon diversas muestras de Caolín a diferentes concentraciones que representan la carga contaminante de SST del agua. El Caolín es un tipo de mineral de arcilla que suele ser

utilizado como material de referencia en la determinación de sólidos sedimentables y de SST por ser un material casi insoluble en agua, formando una mezcla heterogénea. Esta propiedad fue el criterio para elegirlo como uno de los componentes para la preparación de dichas soluciones, ya que el tipo de solución que forman se asemeja a las muestras de agua problema.

Existen razones que justifican el hecho de no poner en consideración otros parámetros distintos a los mencionados, primero, porque la dispersión de sólidos en los sistemas acuosos es una interacción de naturaleza física, mientras que el pH, el oxígeno disuelto, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) son variables de tipo químico, las cuales no guardan una relación directa con la dispersión de la luz, mientras que las partículas sólidas si la tienen. En relación con lo anterior, Downing (2006) y Kronvang, Grant y Laubel (1997) ponen en discusión la utilidad de los sensores ópticos en la medición de SST como los sistemas láser, dispersores de luz y los de fibra óptica, entre otros, puesto que la presencia de sólidos en estos sistemas si genera dicha dispersión, sin embargo, no se requieren equipos muy sofisticados para lograr su estimación, como los turbidímetros que son equipos ópticos caracterizados por ser de bajo costo si se comparan con otros. Segundo, Samboni Ruiz, Carvajal Escobar y Escobar (2007) realizaron una revisión de los parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua, donde se muestra que los SST en contraste con la DBO, tienen un comportamiento gradual que permiten

hacer un seguimiento más detallado, por ejemplo, cuando el cambio de la calidad de agua se da en un rango de 0 a 100 (Índice de calidad del agua, ICA), la variación de la DBO es de 0 a 30 mg/L, mientras que en los SST es mayor; y tercero, investigaciones como las de Schwarz, Gocht y Grathwohl (2011); Rügner, Schwientek, Egner y Grathwohl (2014) y Nasrabadi, Ruegner, Sirdari, Schwientek y Grathwohl (2016) plantean la posibilidad de correlacionar SST con la turbiedad, sin poner en consideración otros parámetros como los ya mencionados, lo que significa, que no es necesario hacerlo si el interés se centra en establecer una correlación entre SST y turbiedad.

Materiales y Métodos

Para el planteamiento de un modelo de correlación entre la concentración de SST y turbiedad se establecieron tres etapas: Primero, se preparó una solución de 1000 mg/L en base seca de Caolín y de esta, se prepararon 12 soluciones acuosas de 35, 75, 105, 145, 185, 225, 265, 305, 345, 385, 425 y 465 mgCaolín/L. Seguidamente, se procedió a realizar mediciones de turbiedad por cuadruplicado, como se observa más adelante en la tabla N° 1. Segundo, una vez obtenidos los datos experimentales, estos se promediaron para construir la curva de calibración (figura N°1) que sirvió

para estimar la concentración de SST por el método de turbiedad a dos muestras problema. Tercero, las muestras problema fueron tomadas de distintas fuentes, con el fin de que estas gozaran de características particulares. Una de ellas fue captada de un afluyente (hidrosistema urbano) localizado en 6°12'43.8"S 75°36'13.1"W, y la otra fue tomada de un acuario localizado en 6°16'57.3"N 75°33'15.2"E, cuya contaminación consta de material orgánico, entre otros. En este caso, se sometieron a análisis ambas muestras de agua problema con características diferentes, con el fin de darle robustez a la correlación obtenida.

A estas muestras de agua residual doméstica se les aplicaron dos métodos: el primero, fue el 2540 D a través del cual se estimó el contenido de SST, y el segundo, fue un análisis de turbiedad por cuadruplicado donde se obtuvieron los resultados registrados en la tabla N°2. Este estudio se llevó a cabo en el laboratorio de química del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) sede Robledo.

Resultados

De acuerdo con los resultados experimentales registrados en la tabla N° 1 que se muestra a continuación:

Tabla N° 1. Resultados de la medición de turbiedad a las diluciones de Caolín preparadas.

Concentración mg Caolín/L	Lectura de turbiedad 1 (NTU)	Lectura de turbiedad 2 (NTU)	Lectura de turbiedad 3 (NTU)	Lectura de turbiedad 4 (NTU)	Turbiedad Promedio (NTU)
35	12,58 ± 0,25	12,71 ± 0,25	12,59 ± 0,25	12,58 ± 0,25	12,59 ± 0,25
75	37,50 ± 0,75	37,58 ± 0,75	36,76 ± 0,74	37,29 ± 0,75	37,40 ± 0,75
105	48,97 ± 0,98	45,22 ± 0,90	48,44 ± 0,97	49,84 ± 1,00	48,71 ± 0,96
145	74,40 ± 1,49	71,60 ± 1,43	70,50 ± 1,41	74,36 ± 1,49	72,98 ± 1,45
185	99,33 ± 1,99	96,21 ± 1,92	101,7 ± 2,03	100,6 ± 2,01	99,97 ± 1,99
225	117,0 ± 2,34	114,0 ± 2,28	110,0 ± 2,20	116,2 ± 2,32	115,1 ± 2,29
265	124,7 ± 2,49	125,5 ± 2,51	127,0 ± 5,54	126,3 ± 2,53	125,9 ± 2,52
305	149,1 ± 2,98	147,4 ± 2,95	151,0 ± 3,02	147,4 ± 2,95	148,3 ± 2,97
345	180,2 ± 3,60	185,0 ± 3,70	184,9 ± 3,70	186,6 ± 3,73	185,0 ± 3,68
385	195,9 ± 3,92	191,1 ± 3,82	197,0 ± 3,94	186,3 ± 3,73	193,5 ± 3,85
425	216,0 ± 4,32	218,3 ± 4,37	222,1 ± 4,44	222,5 ± 4,45	220,2 ± 4,39
465	259,5 ± 5,19	267,0 ± 5,34	266,6 ± 5,33	258,2 ± 5,16	263,1 ± 5,26

Fuente: Elaborado por los autores.

Se pudo establecer una regresión lineal entre SST y la turbiedad promedio de las cuatro lecturas reportadas en esta, como se muestra en la figura N°1. Es importante aclarar que las incertidumbres de las NTU promedio se calcularon aplicando las reglas de propagación de errores/

incertidumbres (Vargas et al., 2008) a partir de la incertidumbre de cada valor estimado, el cual corresponde al 2% del valor de la lectura de acuerdo con la incertidumbre del turbidímetro (MICRO TPW 20000) empleado en este estudio.

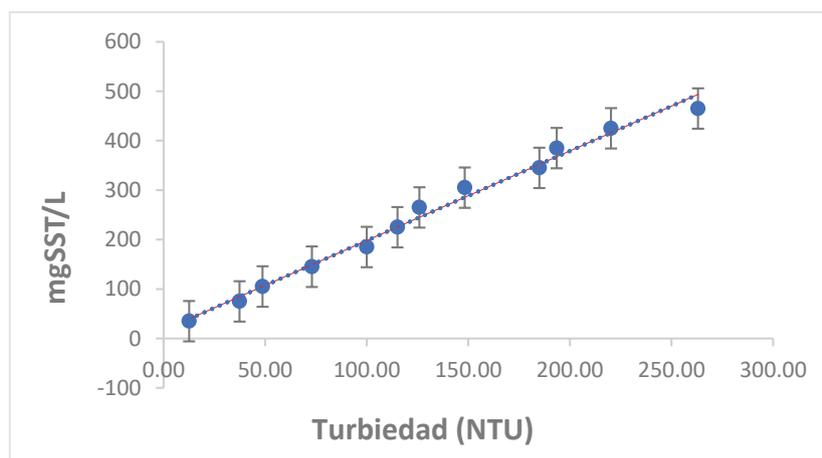


Figura N° 1. Curva de calibración NTU vs SST.

En la anterior curva de calibración (figura N°1) se observa que a medida que aumenta la turbiedad también aumenta la concentración de SST, evidenciándose una correlación lineal entre ambos parámetros, en contraste, Nasrabadi et al., (2016) en su investigación logró establecer dicha correlación para un conjunto de datos en un intervalo de 202-1212 mg/L para SST y 63-501 NTU para turbiedad, logrando un $R^2=0,96$, lo que muestra una tendencia a la posibilidad de establecer vínculos entre ambos métodos analíticos siempre que la distribución de tamaños no sea muy heterogénea. Por ejemplo, Foster, Millington y Grew (1992) hallaron que en suspensiones de sedimentos fluviales con concentraciones de hasta 400 mg/L, la turbiedad no variaba significativamente para partículas entre 16 y 63 μm , en contraste, Bright, Mager y Horton (2020) encontraron

que en partículas suspendidas con tamaños menores a 6 μm no existe una relación sistemática entre las NTU y los SST.

Seguidamente, se estimó la concentración de SST de las muestras de agua problema afluyente y acuario (consideradas aguas residuales domésticas) a partir del valor promedio de NTU que se registra en la tabla N°2, cuyos resultados fueron de $47,69 \pm 2,78$ y $106,29 \pm 1,90$ mgSST/L respectivamente, según:

$$[SST] = 1,8136T + 16,551$$

Donde:

[SST]: Concentración de sólidos suspendidos totales expresado como mgSST/L.

T: Turbiedad expresado como NTU.

Tabla N°2. Resultados de la medición de la turbiedad en las muestras de agua.

	Lectura de turbiedad 1 (NTU)	Lectura de turbiedad 2 (NTU)	Lectura de turbiedad 3 (NTU)	Lectura de turbiedad 4 (NTU)	Turbiedad Promedio (NTU)
Muestra afluyente	$18,28 \pm 0,37$	$15,17 \pm 0,30$	$16,17 \pm 0,32$	$18,17 \pm 0,36$	$17,17 \pm 0,34$
Muestra acuario	$49,20 \pm 0,98$	$49,76 \pm 1,00$	$47,69 \pm 0,95$	$50,03 \pm 1,00$	$49,41 \pm 0,98$

Fuente: Elaborado por los autores.

Finalmente, a las mismas muestras de agua problema se les determinó de nuevo la concentración de SST pero por el método 2540 D, obteniendo como resultado una concentración de 49,00 mgSST/L para el afluyente y 104,50 mgSST/L para el agua del acuario.

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos de las muestras del afluyente y el acuario se observa que existe una diferencia del 2,7 % y 1,7 % respectivamente comparado con lo estimado por el método termogravimétrico 2540 D. Esto significa que es posible establecer una correlación entre los métodos

mencionados aquí para los intervalos entre 35-465 mgSST/l y 12-263 NTU para turbiedad en aguas residuales domésticas. Si bien, los resultados no son exactos entre uno y otro método, esta información es útil para conocer de forma rápida e *in-situ* la concentración de SST de las muestras, lo que permitirá establecer un plan de contingencia que favorezca un mayor control de dichas aguas antes de ser desechadas, y así poder dar cumplimiento a lo establecido en la Resolución 0631 de 2015. Considerando que esta norma establece que el límite permisible de SST para los vertimientos de aguas residuales domésticas es de 75mg/L, se evidencia que la muestra del afluente está cumpliendo con lo establecido en dicha resolución, caso contrario, es lo que ocurre con la muestra del acuario donde se obtuvo un resultado por encima de lo permitido.

En correspondencia con lo anterior, los errores relativos de los resultados pueden deberse a distintas causas, entre ellas a la variedad de parámetros como la densidad, el tamaño y la forma de las partículas, así como el color del agua, que pueden afectar la relación entre los valores de SST y la turbiedad (Downing, 2006 citado por Nasrabadi et al., 2016, 2).

Conclusión

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos y la discusión anterior, se concluye que es posible establecer una correlación para la determinación de la concentración de SST usando el método de turbiedad, que permita su estimación rápida e *in-situ*. Lo anterior se cumple en un

intervalo de 35-465 mgSST/l y 12-263 NTU para turbiedad en aguas residuales domésticas.

Referencias

- Bright, C., Mager, S. y Horton, S. (2020). Response of nephelometric turbidity to hydrodynamic particle size of fine suspended sediment. *International Journal of Sediment Research*, 35(5), 444-454.
- Carpio, T. (15 de junio de 2007). *Turbiedad por nefelometría (método B)*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Turbiedad+por+Nefelometr%C3%ADa..pdf/fc92342e-8bba-4098-9310-56461c6a6dbc#:~:text=La%20turbiedad%20es%20una%20expresi%C3%B3n,trasmitida%20a%20trav%C3%A9s%20de%20la>
- Downing, J. (2006). Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*, 26(17-18), 2299-2318.
- Foster, I. D. L., Millington, R. y Grew, R. G. (1992). The impact of particle size controls on stream turbidity measurement; some implications for suspended sediment yield estimation. *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*, 210, 51-62.
- Gippel, C. J. (1995). Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological processes*, 9(1), 83-97.

- Hernández, A. (2 de agosto de 2007). *Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °C*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Suspendidos+Totales+en+aguas.pdf/f02b4c7f-5b8b-4b0a-803a-1958aac1179c>
- Kronvang, B., Grant, R. y Laubel, A. L. (1997). Sediment and phosphorus export from a lowland catchment: Quantification of sources. *Water, Air, and Soil Pollution*, 99(1), 465-476. <https://doi.org/10.1007/BF02406886>
- Minambiente (2021). *Vertimientos y reuso de aguas residuales*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales#:~:text=La%20norma%20de%20vertimientos%2C%20la,industrial%20y%20ambiental%20del%20pa%C3%ADs>.
- Nasrabadi, T., Rügner, H., Sirdari, Z. Z., Schwientek, M. y Grathwohl, P. (2016). Using total suspended solids (TSS) and turbidity as proxies for evaluation of metal transport in river water. *Applied Geochemistry*, 68, 1-9.
- Rice, W. E., Baird, B. R. y Eaton, D. A. (Ed.). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. *American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation*.
- Ruiz, N. E. S., Escobar, Y. C. y Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 172-181.
- Rügner, H., Schwientek, M., Egner, M. y Grathwohl, P. (2014). Monitoring of event-based mobilization of hydrophobic pollutants in rivers: Calibration of turbidity as a proxy for particle facilitated transport in field and laboratory. *Science of the Total Environment*, 490, 191-198.
- Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y. y Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 172-181.
- Schwarz, K., Gocht, T. y Grathwohl, P. (2011). Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in highly vulnerable karst systems. *Environmental Pollution*, 159(1), 133-139.
- Stubblefield, A. P., Reuter, J. E., Dahlgren, R. A. y Goldman, C. R. (2007). Use of turbidometry to characterize suspended sediment and phosphorus fluxes in the Lake Tahoe basin, California, USA. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(3), 281-291.

Torres, Lara, Luna, Araújo y González (2013). Metodología para estimar concentraciones de SST en tiempo real en hidrosistemas urbanos a partir de mediciones de turbiedad. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1), 23-35.

Vargas, J., Ramirez, I., Perez, S. y Madrigal, J. (2008). *Física Mecánica Conceptos básicos y problemas*. Fondo editorial ITM.