

**Análisis de series de tiempo de parámetros fisicoquímicos para estudiar el funcionamiento de una potabilizadora**

**Time series analysis of physicochemical parameters to study the functioning of a water treatment plant**

**Edgardo Antonio Redondo-Peñuela <sup>1\*</sup>, Carlos Alfonso Zafra-Mejía <sup>2</sup>, Juan Pablo Rodríguez-Miranda <sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Ingeniero Ambiental, Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GIIAUD), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.*

<sup>2</sup> *Ph.D en Ingeniería Ambiental, Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental (GIIAUD), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.*

<sup>3</sup> *Ph.D. en Ingeniería, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.  
Email: czafra@udistrital.edu.co*

Recibido: 16/04/2020

Aceptado: 02/07/2020

Cite this article as: E. A. Redondo-Peñuela, C. A. Zafra-Mejía, J. P. Rodríguez-Miranda “Análisis de series de tiempo de parámetros fisicoquímicos para estudiar el funcionamiento de una potabilizadora”, *Prospectiva*, Vol 18, N° 2, 2020.

<http://doi.org/10.15665/rp.v18i2.2341>

### RESUMEN

*El objetivo de este artículo es estudiar el funcionamiento de una potabilizadora (PTAP) mediante un análisis de series de tiempo de parámetros fisicoquímicos del agua tratada. Se utilizan modelos Autorregresivos Integrados de Promedios Móviles (ARIMA) para analizar las series de tiempo de parámetros fisicoquímicos. Los resultados sugieren que los modelos ARIMA tienen un mejor ajuste bajo una escala de tiempo semanal (a mediano plazo) en comparación con una escala de tiempo diaria (a corto plazo). Se evidencia entonces que la evaluación ARIMA del funcionamiento de la PTAP debe realizarse a mediano plazo. Los hallazgos también sugieren a la turbiedad como el posible parámetro indicador para evaluar el funcionamiento de la PTAP, debido a que muestra la mayor ventana de tiempo o persistencia. Este parámetro en un instante de tiempo determinado puede transmitir sus efectos hasta por tres semanas consecutivas en el agua tratada por la PTAP. Los resultados muestran que el enfoque ARIMA en PTAPs probablemente se constituye en una herramienta de evaluación de su funcionamiento actual, y de planeación a mediano plazo ante eventos atípicos o contingencias.*

**Palabras Clave:** ARIMA, Calidad del agua, Parámetros fisicoquímicos, Potabilización, Series de tiempo.

### ABSTRACT

*The objective of this paper is to study the functioning of a water treatment plant (WTP) by analyzing time series of physicochemical parameters of treated water. Autoregressive Integrated Moving Averages (ARIMA) models are used to analyze the time series of physicochemical parameters. The results suggest that ARIMA models have a better fit on a weekly time scale (medium-term) compared to a daily time scale (short-term). It is then evident that the ARIMA assessment of the functioning of WTP should be carried out in the medium term. The findings also suggest turbidity as the possible indicator parameter to evaluate the functioning of WTP, because it shows the largest window of time or persistence. This parameter in an instant of time can transmit its effects for up to three consecutive weeks in the water treated by the WTP. The results show that the ARIMA approach in WTPs is likely to be a tool to assess its current functioning, and to medium-term planning in the face of outlier events or contingencies.*

**Key words:** ARIMA, water quality, drinking water treatment, physicochemical parameters, time series.

## 1. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es un elemento base para el desarrollo sostenible de las ciudades, y el agua potable es fundamental para la supervivencia humana y la estabilidad regional [1]. La calidad del agua puede variar tanto a largo como a corto plazo, usualmente exhibiendo patrones basados en el tiempo. Por ejemplo, se reporta que los parámetros de calidad del agua pueden depender del caudal de las fuentes de abastecimiento, y es probable que éstos tengan una estructura de persistencia así como también el efecto de estacionalidad observado en los caudales [2]. Una mejor comprensión de las características temporales de estas series de tiempo es necesaria para realizar pronósticos más exactos en relación con la calidad del agua en plantas potabilizadoras [3]. Asimismo, el interés principal de los gerentes de plantas potabilizadoras (PTAP) es proporcionar un suministro de agua fiable de la manera más económica, garantizando la disponibilidad y continuidad del servicio con una determinada probabilidad y sin demora bajo condiciones de funcionamiento, entornos específicos y sucesos contingentes [4]. En consecuencia, una gestión óptima de estos sistemas es una tarea compleja y se ha convertido también en un tema de investigación cada vez más significativo a nivel mundial [5].

En Colombia la Resolución 2115 de 2007 [6] establece el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) para consumo humano como un instrumento de monitoreo y control frente a la calidad del agua suministrada por los prestadores del servicio. No obstante, debido al grado de sencillez del índice y su fundamento en el cumplimiento o no con respecto a límites máximos establecidos por la legislación, éste probablemente no facilita el análisis de las series de tiempo (mediano y largo plazo) de los parámetros de calidad del agua potable suministrada. Al respecto, Díaz et al. [7] reportan que en muchas ocasiones los parámetros cumplen con la legislación pero éstos oscilan temporalmente muy cerca del límite de admisibilidad, lo cual probablemente refleja un deterioro en la calidad del agua potable suministrada. Por lo tanto, se hace necesario desarrollar investigaciones acerca del uso de herramientas estadísticas para evaluar el comportamiento temporal de los parámetros de calidad del agua en PTAPs; de manera que se puedan tomar medidas de gestión a mediano y largo plazo para mantener estos parámetros dentro de los límites legislativos establecidos. Este estudio también surge debido al escaso número de publicaciones en Colombia con respecto al uso del análisis de series de tiempo para evaluar la calidad del agua durante la operación de sistemas de potabilización.

El agua para consumo humano debe recibir un tratamiento de potabilización para cumplir determinadas características físicas, químicas y microbiológicas, con el fin de ser suministrada sin generar problemas de salud pública. En este sentido, es necesario someter al agua cruda a un conjunto de procesos unitarios para mejorar estas características de calidad [8]. Existen diferentes métodos de tratamiento para mejorar las características del agua cruda después de ser captada desde una fuente de abastecimiento. Estos métodos de tratamiento pueden ser físicos y químicos o una combinación de los dos; y su selección depende de la calidad del agua de la fuente de abastecimiento [5]. No obstante, muchas plantas de potabilización utilizan un sistema convencional para el

tratamiento del agua; es decir, utilizan una combinación de coagulación, sedimentación, filtración y desinfección para proporcionar agua potable limpia y segura al público. En todo el mundo, una combinación de coagulación, sedimentación y filtración es la tecnología de tratamiento de agua más utilizada y se ha utilizado desde principios del siglo XX [9].

Para analizar las variaciones en el tiempo de los parámetros de calidad del agua se han desarrollado modelos estadísticos, los cuales se constituyen en una alternativa para este propósito. En este sentido, se pueden destacar los modelos autorregresivos integrados de promedios móviles (ARIMA), los cuales han sido implementados satisfactoriamente en investigaciones para la evaluación de la calidad del agua [10]. Los modelos ARIMA son populares debido a su simplicidad y robustas propiedades estadísticas. Proporcionan también un método potente para obtener resultados precisos y fiables sin un costoso tiempo de calibración. Estos modelos estadísticos estudian la posible relación temporal entre los datos actuales, y los datos pasados y sus errores [11]. Los modelos ARIMA son también conocidos como modelos de Box-Jenkins. Específicamente, estos modelos consideran la secuencia de los datos a lo largo del tiempo como una secuencia aleatoria; analizan también una parte de los datos en la secuencia para obtener parámetros específicos que describen el modelo matemático, para posteriormente modelar las series de tiempo; y usan los datos restantes en la secuencia para validar el modelo matemático. El modelo validado también se utiliza para predecir los valores posteriores de la serie de datos [8-9].

Los modelos ARIMA fueron utilizados en diversos contextos asociados con la calidad del agua. Por ejemplo, Ömer-Faruk [12] utilizó modelos ARIMA para simular parámetros de calidad del agua en una hoya hidrográfica de Turquía (temperatura, boro y oxígeno disuelto). Este investigador logró simular adecuadamente los parámetros de calidad del agua durante 108 meses. Los coeficientes de correlación obtenidos entre los datos observados y simulados para temperatura, boro y oxígeno disuelto fueron 0.909, 0.902 y 0.893, respectivamente. Parmar y Bhardwaj [13] obtuvieron resultados satisfactorios al analizar parámetros como pH, DBO<sub>5</sub> y DQO en cuerpos de agua superficial, demostrando la efectividad de los modelos ARIMA para analizar el comportamiento temporal de estos parámetros y la realización de pronósticos. Lotfi et al. [14] también utilizaron modelos ARIMA para estudiar el comportamiento temporal de parámetros de calidad del agua en una depuradora municipal (SST, DBO<sub>5</sub> y DQO). Estos investigadores reportaron que los modelos ARIMA fueron útiles para mejorar la eficiencia en la depuradora en relación con la DBO<sub>5</sub> ( $R^2$  del modelo desarrollado = 0.99).

El objetivo principal de este artículo es estudiar el funcionamiento de una PTAP mediante un análisis de series de tiempo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua tratada. Al respecto, se utilizan modelos estadísticos ARIMA para analizar las series de tiempo de parámetros de calidad del agua. Se realiza también un análisis comparativo de la calidad del agua con respecto a legislación de referencia: Organización Mundial de la Salud (OMS) y legislación colombiana. La influencia del régimen de precipitación también es considerada durante el funcionamiento de la PTAP. Finalmente, se analizan los modelos ARIMA desarrollados para evaluar a corto (diario) y mediano (semanal) plazo el funcionamiento de la PTAP.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

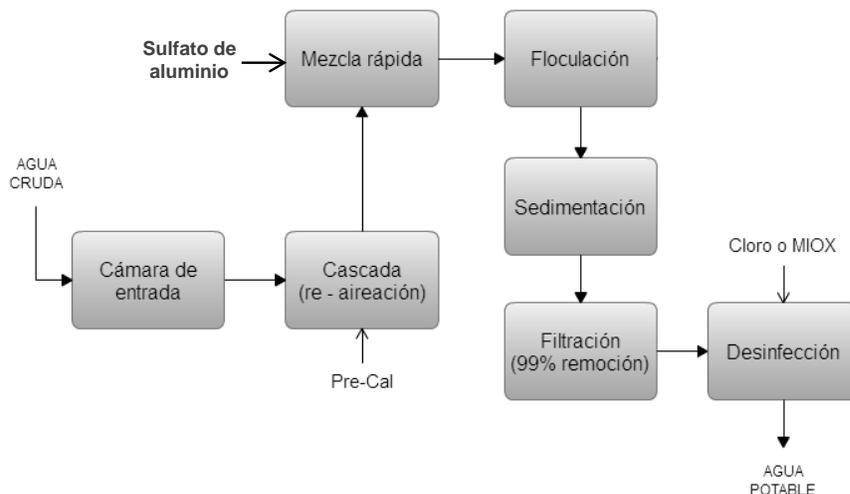
### 2.1. Descripción de la PTAP en estudio

La investigación se desarrolló en una PTAP municipal (El Dorado), la cual suministró agua potable a más de 300000 habitantes al sur de la ciudad de Bogotá (Colombia). Esta PTAP potabiliza el agua proveniente de tres embalses de abastecimiento conectados en serie: (i) Los Tunjos (2,4 millones de m<sup>3</sup>), (ii) Chisacá (7,4 millones de m<sup>3</sup>) y (iii) La Regadera (3,3 millones de m<sup>3</sup>). Es decir, la PTAP trata el agua acumulada en el embalse La Regadera. El agua es conducida 11,1 km desde este embalse hasta la PTAP mediante tuberías de 39" y 36" de diámetro. El caudal promedio potabilizado es de 0,40 m<sup>3</sup>/s, no obstante, la capacidad máxima de diseño de la PTAP es de 1,60 m<sup>3</sup>/s. El sistema de potabilización es de tipo convencional (Fig. 1.): aireación (cascada-vertedero semicircular), pre-alcalinización, coagulación (canaleta Parshall; sulfato de aluminio granular tipo B), floculación (trenes

floculadores-sedimentadores mecánicos de eje horizontal), sedimentación (alta tasa), filtración (convencional con antracita), desinfección (cloro y electrólisis salina-MIOX), y pos-alcalinización.

Figura 1. Sistema convencional de tratamiento en la PTAP.

Figure 1. Conventional treatment system in PTAP.



## 2.2. Muestreo y análisis de laboratorio

El periodo de muestreo estuvo comprendido entre el 01/12/2006 y 28/02/2015. Se recolectó información diaria para los siguientes parámetros fisicoquímicos de calidad del agua: turbiedad, color, conductividad eléctrica, pH, alcalinidad total, cloruros, dureza total, hierro total, aluminio residual, cloro residual libre, cloro residual combinado, cloro residual total y sulfatos. Las muestras de agua fueron recolectadas en el tanque de almacenamiento, después del proceso de desinfección.

Los análisis de laboratorio se realizaron bajo las siguientes normas técnicas: turbiedad (Standard Methods, SM 2130), color (SM 2120), conductividad eléctrica (SM 2510), pH (SM 4500 H+), alcalinidad total (SM 2320), cloruros (SM 4500-Cl), dureza total (SM 2340), hierro total (SM 3500-Fe), aluminio residual (SM 3500-Al), cloro residual libre (SM 4500-Cl), cloro residual combinado (SM 4500-Cl), cloro residual total (SM 4500-Cl) y sulfatos (SM 4500-SO42) [15].

## 2.3. Análisis de información

El sistema de análisis de la información comprendió tres fases. En la Fase 1 se realizó un análisis estadístico descriptivo con el fin de detectar tendencias o anomalías en las series de tiempo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua. La distribución normal de las series de tiempo fue evaluada mediante una prueba de Kolmogorov-Smirnov ( $p$ -valor  $> 0,05$ ). Se estudiaron también las relaciones entre variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) con el fin de establecer posibles parámetros de control o indicadores del funcionamiento en la PTAP. Es decir, en este estudio se asumió que los parámetros con las mejores correlaciones fueron aquellos que posiblemente permitieron explicar el funcionamiento de la PTAP. Los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa informático SPSS Versión 21.0. Por último, se realizó un análisis comparativo de los parámetros de calidad del agua en relación con normatividad de referencia: Resolución colombiana 2115 de 2007 [6] y las Directrices de Calidad de Agua Potable publicadas por la OMS [16].

Durante la Fase 2 se evaluó la influencia del régimen de precipitación en el área de estudio (periodos secos y de lluvias). Se analizaron los cambios en cada uno de los parámetros de calidad del agua de la PTAP en relación con el régimen de precipitación. Al respecto, se utilizaron los registros diarios de precipitación de la estación climatológica “Santa María de Usme” (4°28’52,7” N; -74°7’34,6” W), los cuales fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). El régimen de precipitación mensual (P) fue analizado mediante los períodos propuestos por el método de quintiles (Qi) de Bolognesi [15]. Este método consideró los siguientes periodos mensuales de precipitación (P): muy seco ( $P < Q1$ ), seco ( $Q1 \leq P < Q2$ ), normal ( $Q2 \leq P < Q3$ ), lluvioso ( $Q3 \leq P < Q4$ ) y muy lluvioso ( $Q4 \leq P < Q5$ ).

En la Fase 3, se desarrollaron modelos Autorregresivos Integrados de Promedios Móviles (ARIMA) mediante la metodología de Box y Jenkins [18] para estudiar las series de tiempo de parámetros fisicoquímicos de calidad del agua. Las escalas temporales consideradas para este análisis fueron de corto y mediano plazo, es decir, diaria (media móvil de 24 h) y semanal (media móvil de 168 h), respectivamente. Esta última escala de tiempo fue utilizada como alternativa para identificar tendencias a mediano plazo en los parámetros de calidad del agua tratada por la PTAP. En el desarrollo de los modelos ARIMA se tuvieron en cuenta las tres etapas reportadas por Guerrero [19]: identificación, estimación y verificación del modelo. Durante la etapa de identificación del modelo se determinaron los órdenes de los polinomios autorregresivos y de promedios móviles, así como también el grado de diferenciación para cancelar la no estacionalidad de las series de tiempo en estudio. Es decir, se determinaron los órdenes “p”, “d” y “q” del modelo ARIMA. En la segunda etapa se determinaron los parámetros de los polinomios autorregresivo ( $\phi_1, \dots, \phi_p$ ) y de promedios móviles ( $\theta_1, \dots, \theta_p$ ) para cada modelo identificado mediante el método de máxima verosimilitud. Finalmente, se verificaron los ocho supuestos propuestos por Box y Jenkins [18] con el fin de seleccionar los mejores modelos ARIMA para cada serie de tiempo en estudio. Todas las anteriores etapas de la metodología ARIMA fueron realizadas mediante el programa informático IBM-SPSS Versión 21.0.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis normativo

Los resultados mostraron a nivel diario que la turbiedad promedio del agua tratada durante el periodo de estudio fue de 0,27 UNT, con variaciones entre 0,03-1,84 UNT (Tabla 1). Este parámetro estuvo dentro del límite de admisibilidad establecido por la normatividad colombiana (2,0 UNT) y la OMS (5,0 UNT). Se observó también que solo el 0,73% de los registros de turbiedad fueron mayores a 1,0 UNT, lo cual sugirió una adecuada calidad del agua en relación a este parámetro durante el periodo de estudio.

En relación con el pH, se observó un valor promedio diario de 6,95 durante el periodo de investigación; con variaciones entre 5,19-9,93 (Tabla 1). Se registraron excedencias durante 12 días (< 0,01%) en relación con los límites establecidos por la normatividad colombiana [6] y la OMS [16]. Los resultados también permitieron visualizar que los límites establecidos por la legislación colombiana para pH (6,50-9,00) fueron ligeramente más permisivos en comparación con los límites de la OMS (6,50-8,50). Los resultados sugirieron que el incumplimiento con respecto al pH probablemente no representó un riesgo para la salud humana [20], pero pudo estar relacionado con una disminución en la eficiencia operativa de la PTAP. Al respecto, Akoto et al. [21] sugirieron que el incumplimiento de este parámetro pudo estar principalmente asociado con los procesos unitarios de coagulación (mezcla rápida) y floculación (mezcla lenta), o con la aplicación de cal durante el proceso de potabilización.

Los resultados mostraron que la concentración promedio diaria de cloro residual libre (CRL) fue de 1,48 mg/L, con variaciones entre 0,28-2,59 mg/L. Al respecto, la OMS [16] reportó que fue común a nivel mundial suministrar agua potable con concentraciones de CRL mayores a 1,0 mg/L como medida de prevención durante su distribución, y que no se han reportado efectos adversos al consumir agua con estas concentraciones de cloro. De

esta manera, las concentraciones de CRL mayores al límite máximo admisible establecido por la legislación colombiana probablemente no representaron un riesgo para la salud pública, y pudieron probablemente estar relacionadas con la presencia de agentes reductores en el agua cruda [22].

En relación con los demás parámetros de calidad del agua en estudio, las mayores variaciones en orden de importancia se observaron de la siguiente manera: (i) hierro total, (ii) aluminio residual, (iii) color, y (iv) cloruros; donde los valores máximos observados fueron 34, 13, 10 y 5 veces superiores en relación con los valores promedio diarios (Tabla 1). Lo anterior sugirió que las características del agua suministrada por la PTAP no fueron constantes (homogéneas) a lo largo del tiempo. Esto posiblemente por las características del agua cruda a tratar o por la dosificación de los reactivos utilizados durante la potabilización.

### 3.2. Influencia de la precipitación

Los resultados sugirieron que en el área de estudio las precipitaciones tuvieron un régimen bimodal, donde la época seca se registró entre los meses de enero y marzo, y julio y septiembre ( $P < Q_2$ , quintiles de Bolognesi); mientras que la época de lluvias se registró entre los meses de abril y junio, y octubre y diciembre ( $P \geq Q_3$ ). La anterior tendencia en el régimen de precipitación mensual también pudo posiblemente verse influenciada por los fenómenos climáticos de “La Niña” y “El Niño”, los cuales ocurrieron entre los años 2010-2011 y 2013-2015, respectivamente [23].

En promedio, los resultados mostraron comparativamente que las concentraciones diarias de los parámetros de calidad del agua en la PTAP variaron en relación con el régimen de precipitación. Durante la época de lluvias los siguientes parámetros tendieron a aumentar en comparación con la época seca: turbiedad, conductividad eléctrica, dureza total y cálcica, hierro total, aluminio residual, cloro residual libre, combinado y total, y sulfatos (Tabla 1). Por ejemplo, Ibrahim y Abu-Shanab [24] y Romero [25] reportaron que la turbiedad del agua potabilizada tendió comparativamente a incrementarse en tiempo de lluvia. En efecto, este último investigador también reportó la necesidad de incrementar la concentración del coagulante (sulfato de aluminio) en la PTAP para poder disminuir la turbiedad; lo cual posiblemente generó un incremento en la concentración de los residuales del coagulante en el agua tratada (aluminio residual y sulfatos).

Tabla 1. Estadísticos diarios para parámetros fisicoquímicos de calidad del agua tratada (n = 3010)

Parámetro	Unidad	Mín.	Máx.	Media			Desv. estándar	Res. 2115 de 2007 <sup>a</sup>	OMS <sup>b</sup>
				Total	Época seca	Época de lluvias			
Turbiedad	UNT	0,03	1,84	0,27	0,26	0,28	0,14	2,00	5,00
Color	UPC	0,00	18,0	1,76	1,93	1,54	1,29	15,0	15,0
Conductividad eléctrica	µs/cm	4,69	119	57,3	56,9	57,7	10,3	1000	1000
pH	Unidades	5,19	9,93	6,95	6,98	6,92	0,28	6,50-9,00	6,50-8,50
Alcalinidad total	mg/L	2,00	22,0	7,61	8,03	7,12	2,06	200	200
Cloruros	mg/L	0,00	21,3	4,60	4,88	2,24	2,46	250	250
Dureza total	mg/L	1,53	39,3	17,4	17,1	17,7	3,17	300	500
Dureza cálcica	mg/L	4,79	28,1	15,4	15,1	15,8	2,86	-	-
Hierro total	mg/L	0,00	1,01	0,03	0,03	0,03	0,05	0,30	0,30
Aluminio Residual	mg/L	0,00	0,93	0,07	0,06	0,07	0,06	0,20	0,20
Cloro residual libre	mg/L	0,28	2,59	1,48	1,47	1,48	0,25	0,3-2,00	5,00
Cloro residual combinado	mg/L	0,00	11,0	0,12	0,11	0,13	0,21	-	-

Cloro residual total	mg/L	0,00	12,1	1,60	1,59	1,61	0,33	-	-
Sulfatos	mg/L	0,00	26,4	7,77	7,08	8,63	2,57	250	400

Nota. <sup>a</sup> Resolución colombiana 2115 de 2007 [6]; <sup>b</sup> Guidelines for Drinking Water Quality [16].

Por otro lado, los siguientes parámetros tendieron a disminuir comparativamente durante la época de lluvias: color, pH, cloruros y alcalinidad total (Tabla 1). En orden de importancia, los parámetros que mostraron comparativamente las mayores variaciones fueron los siguientes: cloruros (218%), color (25,3%) y sulfatos (21,9%). No obstante, una prueba *t*-Student evidenció que el único parámetro que mostró diferencias significativas en relación con el régimen de precipitación fue cloruros ( $p$ -valor  $< 0,001$ ). De esta manera, los resultados sugirieron que la eficiencia del proceso de potabilización probablemente no estuvo condicionada por el régimen de precipitación en el área de estudio. Es decir, posiblemente existió una correcta operación de la PTAP según el régimen de precipitación observado.

### 3.3. Correlación entre parámetros

Se realizó un análisis de correlación de Pearson ( $r$ ) entre parámetros de calidad del agua bajo las dos escalas de tiempo propuestas para estudiar el funcionamiento de la PTAP: diaria (corto plazo) y semanal (mediano plazo). Los resultados mostraron que las mejores correlaciones se presentaron bajo la escala de tiempo semanal. Las mejores correlaciones se observaron en orden de importancia para los siguientes parámetros fisicoquímicos: cloruros, cloro residual libre, turbiedad, hierro total y conductividad eléctrica (Tabla 2).

En relación a los cloruros, las correlaciones significativas se evidenciaron en orden de importancia con los siguientes parámetros: conductividad eléctrica ( $r = 0,68$ ), dureza cálcica ( $r = -0,63$ ), dureza total ( $r = -0,58$ ) y cloro residual libre ( $r = -0,52$ ). La relación entre cloruros y conductividad eléctrica posiblemente se debió a que esta última dependió de la concentración de sustancias disueltas ionizadas, entre ellas el ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) [26]. Se observaron también correlaciones significativas entre cloro residual libre, y hierro total ( $r = 0,59$ ) y cloruros ( $r = -0,52$ ). Estos resultados difirieron con respecto a lo reportado por Barbooti et al. [27]. Sin embargo, Romero [25] reportó que la relación entre cloro residual libre y hierro total estuvo posiblemente asociada con el proceso de desinfección en PTAPs; en donde el cloro al ser un agente oxidante se combinó rápidamente con el hierro presente en el agua ( $\text{Fe}^{++}$ ) y, a su vez, el cloro residual libre ( $\text{HOCl}$ ) reaccionó con este para formar  $\text{Fe}^{+++}$ .

Con respecto a la turbiedad, se observaron correlaciones directas con hierro total ( $r = 0,54$ ) y color ( $r = 0,53$ ), e inversas con alcalinidad total ( $r = -0,50$ ). Lo anterior probablemente evidenció la influencia de la alcalinidad y el pH en la eficiencia del proceso de potabilización, en relación con la eliminación de turbidez del agua. A partir de las correlaciones expuestas en la Tabla 2, los resultados posiblemente sugirieron en orden de importancia a los siguientes parámetros como indicadores del funcionamiento de la PTAP en estudio: (i) cloruros, (ii) cloro residual libre, (iii) turbiedad, (iv) hierro total y (v) conductividad eléctrica. Los anteriores parámetros también fueron identificados para poder estudiar el funcionamiento de la PTAP a partir de los modelos ARIMA desarrollados para éstos.

### 3.4. Análisis ARIMA

Se desarrollaron modelos ARIMA ( $p,d,q$ ) para las escalas de tiempo diaria y semanal a partir de los parámetros identificados como posibles indicadores del funcionamiento de la PTAP en estudio. En relación con el término autorregresivo ( $p$ ), los resultados mostraron a nivel diario que parámetros como hierro total y cloro residual libre no estuvieron influenciados por las concentraciones de días inmediatamente anteriores ( $p = 0$ ; Tabla 3). Esta tendencia probablemente se debió a que estos parámetros dependieron de condiciones

controladas para garantizar un óptimo tratamiento del agua, posiblemente, en lo relacionado con la estabilización del pH y la dosificación del agente coagulante en la PTAP de estudio (sulfato de aluminio).

Por otro lado, parámetros como turbiedad, conductividad eléctrica y cloruros mostraron una memoria corta a nivel diario. Es decir, estos parámetros en un instante de tiempo específico dependieron de las observaciones registradas entre uno y tres días inmediatamente anteriores (p entre 1-3; Tabla 3). La anterior tendencia probablemente estuvo relacionada con las acciones correctivas asumidas durante los días anteriores para la potabilización del agua en la PTAP, como por ejemplo, las posibles acciones correctivas asociadas con las variaciones de turbiedad según la frecuencia de las lluvias. Al respecto, Azzouz y Ballesteros [28] estudiaron la influencia del régimen de precipitación sobre la turbiedad en una PTAP. Estos autores reportaron que los eventos atípicos de turbiedad condicionaron el funcionamiento de la PTAP hasta por dos días.

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre parámetros fisicoquímicos del agua tratada (series semanales).

Parámetro	TUR	COL	CE	PH	ALC	CLO	DUT	DUC	HT	AR	CRL	CRC	CRT	SUL
TUR	1,00													
COL	<b>0,53</b>	1,00												
CE	-0,33	-0,19	1,00											
PH	-0,41	-0,08	0,48	1,00										
ALC	<b>-0,50</b>	-0,10	0,24	0,46	1,00									
CLO	-0,27	0,09	<b>0,68</b>	0,48	0,25	1,00								
DUT	0,20	-0,03	-0,05	-0,22	0,09	<b>-0,58</b>	1,00							
DUC	0,27	0,00	-0,19	-0,25	0,05	<b>-0,63</b>	<b>0,96</b>	1,00						
HT	<b>0,54</b>	0,43	-0,35	-0,33	-0,11	-0,30	0,32	0,37	1,00					
ALR	0,15	0,18	-0,13	-0,31	-0,38	-0,16	0,09	0,04	0,26	1,00				
CRL	0,40	0,34	-0,46	-0,29	-0,23	<b>-0,52</b>	0,40	0,44	<b>0,59</b>	0,11	1,00			
CRC	-0,11	-0,29	0,17	0,12	0,03	-0,21	0,19	0,16	-0,12	-0,16	0,05	1,00		
CRT	0,34	0,24	-0,38	-0,23	-0,21	<b>-0,54</b>	0,43	0,46	<b>0,52</b>	0,07	<b>0,95</b>	0,36	1,00	
SUL	0,15	-0,18	<b>0,50</b>	-0,03	-0,29	0,00	0,45	0,40	0,02	0,23	0,01	0,18	0,07	1,00

Nota. TUR = Turbiedad; COL = Color; CE = Conductividad eléctrica; ALC = Alcalinidad; CLO = Cloruros; DUT = Dureza total; DUC = Dureza cálcica; HT = Hierro total; AR = Aluminio residual; CRL = Cloro residual libre; CRC = Cloro residual combinado; CRT = Cloro residual total; SUL = Sulfatos. Valores en negrilla corresponden a correlaciones significativas mayores y menores a 0,50 y -0,50, respectivamente.

Los resultados también mostraron que el parámetro fisicoquímico con mayor memoria ARIMA fue la turbiedad (p entre 2-3; Tabla 3). Es decir, este parámetro en un momento determinado posiblemente transmitió sus efectos hasta por tres días consecutivos en la PTAP. Esto permitió sugerir a la turbiedad como el parámetro con una mayor ventana de tiempo (i.e., persistencia) para posiblemente evaluar el funcionamiento en la PTAP y, de esta manera, poder también controlar su operación a nivel diario. Por lo tanto, desde el punto de vista ARIMA, los resultados sugirieron a la turbiedad como el principal parámetro indicador del funcionamiento de la PTAP a nivel diario. Por ejemplo, Zang et al. [29] y Baxter et al. [30] desarrollaron metodologías y modelos de redes neuronales para evaluar el funcionamiento en PTAPs considerando a la turbiedad como el principal parámetro indicador.

A partir del término autorregresivo (p) de los modelos ARIMA desarrollados, los resultados sugirieron a nivel diario un orden de importancia diferente para los posibles parámetros indicadores del funcionamiento en la PTAP de estudio. Es decir, en relación con el orden de importancia sugerido por las correlaciones de Pearson. El orden ARIMA fue el siguiente: (i) turbiedad, (ii) conductividad eléctrica, (iii) Cloruros, (iv) hierro total y (v) cloro

residual libre (Tabla 3). Los resultados sugirieron que este orden de importancia ARIMA posiblemente sería más útil para evaluar a nivel diario el funcionamiento de la PTAP en estudio, debido a que consideró el comportamiento temporal de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada.

A nivel semanal, los resultados ARIMA mostraron una tendencia similar a la observada a nivel diario para el término autorregresivo (p). Es decir, los hallazgos indicaron que el parámetro fisicoquímico con mayor memoria ARIMA fue la turbiedad (p entre 2-3; Tabla 3). Este parámetro en un instante de tiempo determinado posiblemente transmitió sus efectos hasta por tres semanas consecutivas en la PTAP. En efecto, los resultados sugirieron a la turbiedad como el parámetro con una mayor ventana de tiempo a nivel semanal (persistencia) para evaluar el funcionamiento y posiblemente controlar a futuro la operación de la PTAP. Los resultados también evidenciaron a nivel semanal el siguiente orden de importancia ARIMA para los parámetros fisicoquímicos del agua tratada: (i) turbiedad, (ii) conductividad eléctrica, (iii) cloro residual libre, (iv) hierro total y (v) cloruros. Por lo tanto, los resultados insinuaron que a nivel diario y semanal los mejores parámetros para evaluar el funcionamiento de la PTAP fueron turbiedad y conductividad eléctrica; esto a partir de los análisis del término autorregresivo (p) de los modelos ARIMA desarrollados.

Con respecto al término ARIMA de promedios móviles (q), los resultados mostraron a nivel diario que existieron variaciones en los parámetros fisicoquímicos del agua tratada. En orden de importancia, los parámetros con mayor variación diaria fueron los siguientes: hierro total, conductividad eléctrica, cloro residual libre, turbiedad y cloruros (Tabla 3). Por ejemplo, para parámetros como hierro total y conductividad eléctrica la metodología ARIMA mostró periodos de variación de hasta 15 y 12 días consecutivos, respectivamente. Estas variaciones fueron en relación al valor medio de cada parámetro durante el periodo de estudio. De esta manera, los resultados ARIMA insinuaron que estos dos parámetros fueron posiblemente los más difíciles de controlar a nivel diario durante el proceso de potabilización. Por otro lado, los parámetros con menor variación fueron cloruros y turbiedad. Los resultados mostraron periodos de variación de hasta 3 y 5 días consecutivos, respectivamente. Estos parámetros fueron posiblemente los más fáciles de controlar a nivel diario durante la operación de la PTAP. Posiblemente, esto también sugirió una menor ocurrencia diaria de valores atípicos para estos dos parámetros en comparación con los demás parámetros fisicoquímicos del agua tratada en estudio.

Tabla 3. Modelos ARIMA para parámetros fisicoquímicos indicadores del funcionamiento de la PTAP.

Parámetro	Modelo ARIMA <sup>a</sup>			MAPE <sup>d</sup> (%)	Modelo ARIMA <sup>b</sup>			
	(p,d,q)	Transf. <sup>c</sup>	R <sup>2</sup>		(p,d,q)	Transf.	R <sup>2</sup>	MAPE (%)
Turbiedad	(2,0,5)	Ln	0,578	24,90	(2,1,7)	Ln	0,956	4,709
	(3,0,3)	Ln	0,577	24,89	(3,1,7)	Ln	0,956	4,704
Conductividad eléctrica	(1,1,12)	Ln	0,856	4,888	(2,1,12)	Ln	0,992	0,949
	(1,0,12)	Ln	0,857	4,854	(2,1,11)	Ln	0,992	0,949
Cloruros	(1,1,3)	R	0,806	20,96	(1,0,16)	Ln	0,984	3,783
	(1,0,3)	R	0,786	21,77	(0,1,16)	Ln	0,984	3,768
Hierro total	(0,1,12)	R	0,524	70,41	(1,1,12)	R	0,916	21,04
	(0,1,15)	R	0,525	70,83	(1,1,14)	R	0,916	21,00
Cloro residual libre	(0,1,4)	R	0,400	10,52	(1,1,8)	N	0,969	1,621
	(0,1,6)	R	0,394	10,53	(2,1,7)	Ln	0,968	1,647

Nota. <sup>a</sup> Escala de tiempo diaria; <sup>b</sup> Escala de tiempo semanal; <sup>c</sup> Transformación: Ln = Logaritmo natural; R = Raíz cuadrada; N = Ninguna; <sup>d</sup> MAPE = Error absoluto porcentual promedio.

A nivel semanal, el término ARIMA de promedios móviles (q) permitió identificar los siguientes parámetros fisicoquímicos como los de mayor variación en el agua tratada: cloruros, hierro total y conductividad eléctrica. Se observaron periodos de variación de hasta 16, 14 y 12 semanas consecutivas, respectivamente. Probablemente, estos parámetros fueron los más difíciles de controlar a nivel semanal durante el proceso de potabilización. Los resultados también mostraron que los parámetros de menor variación fueron turbiedad y cloro residual libre. En estos parámetros se observaron variaciones entre 7 y 8 semanas consecutivas. Probablemente, estos dos

parámetros fisicoquímicos fueron los que mostraron menores valores atípicos en relación con los demás parámetros en estudio. En relación con la turbiedad, Montoya et al. [31] reportaron que su incremento en PTAPs afectó la eficiencia en el tratamiento y, por lo tanto, la calidad del agua tratada; siendo la filtración la etapa más vulnerable. Estos investigadores también reportaron la existencia de una alta correlación entre la máxima turbiedad en el agua tratada y la dosificación de productos químicos (coagulante y desinfectante).

Con respecto al ajuste de los modelos ARIMA desarrollados, los resultados mostraron mejores resultados para la escala de tiempo semanal. Es decir, los errores absolutos promedios de los modelos ARIMA desarrollados a nivel diario fueron mayores. Los modelos diarios desarrollados para hierro total, turbiedad y cloruros fueron los que mostraron los mayores errores absolutos promedio en su ajuste; 70,6%, 24,9% y 21,4%, respectivamente (Tabla 3). Esto sugirió que los modelos ARIMA no se ajustaron adecuadamente a la serie de tiempo en estudio, probablemente debido a la alta variabilidad de los registros diarios observados en el agua tratada de la PTAP.

Como se mencionó, los modelos ARIMA desarrollados a nivel semanal mostraron un mejor ajuste. Al respecto, los modelos desarrollados para hierro total, turbiedad y cloruros fueron los que presentaron los mayores errores promedio (MAPE) a nivel semanal; 21,0%, 4,71% y 3,78%, respectivamente (Tabla 3). En promedio, estos errores absolutos para hierro total, turbiedad y cloruros en la escala de tiempo semanal se disminuyeron 3,36, 5,29 y 5,68 veces en comparación con los modelos ARIMA desarrollados para la escala de tiempo diaria. Por lo tanto, los resultados sugirieron a la escala de tiempo semanal como la más adecuada para evaluar el funcionamiento y, posiblemente, para controlar a futuro la operación de la PTAP en estudio.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se estudia el funcionamiento de una PTAP mediante un análisis de series de tiempo con modelos ARIMA. Los hallazgos de este estudio permiten generar las siguientes conclusiones.

Los resultados sugieren que la metodología ARIMA tiene un mejor ajuste bajo una escala de tiempo semanal ( $R^2 \geq 0,916$ ) en comparación con la escala de tiempo diaria ( $R^2 \geq 0,394$ ). En promedio, los resultados evidencian un incremento significativo de los errores absolutos porcentuales en los modelos ARIMA desarrollados a nivel diario (5,18 veces), en comparación con los modelos ARIMA desarrollados bajo una escala de tiempo semanal. De esta manera, en este estudio se evidencia que la evaluación del funcionamiento actual y el control a futuro de la PTAP probablemente deben realizarse bajo una escala de tiempo semanal (mediano plazo). Los hallazgos también sugieren a la turbiedad como el posible parámetro indicador del funcionamiento de la PTAP, debido a que muestra la mayor ventana de tiempo o persistencia a nivel semanal. Es decir, este parámetro en un instante de tiempo determinado puede transmitir sus efectos hasta por tres semanas consecutivas en el agua tratada. El análisis ARIMA también sugiere que la turbiedad tiene una menor variación a nivel semanal, en comparación con los demás parámetros fisicoquímicos considerados. En promedio, en este estudio se sugieren variaciones de la turbiedad durante periodos de 7 semanas consecutivas. Este periodo de variación en la turbiedad podría estar asociado con el régimen de precipitación del área de estudio, el cual tiene una duración promedio de 12 semanas consecutivas. En efecto, la turbiedad en la época de lluvias se incrementa en promedio un 7,69% con respecto de la época seca.

Los resultados muestran que el enfoque ARIMA en PTAPs probablemente se constituye en una herramienta de evaluación de su funcionamiento actual, y de planeación a mediano plazo ante eventos atípicos o contingencias. Finalmente, los resultados de la presente investigación son útiles para las empresas y diseñadores de sistemas de potabilización para tomar decisiones técnicas, económicas y de salud pública a mediano plazo.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (Colombia) por el apoyo logístico brindado durante el desarrollo de la investigación.

### Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

### REFERENCIAS

- [1] X. Ding, Q. Zhu, A. Zhai, y L. Liu, «Water quality safety prediction model for drinking water source areas in Three Gorges Reservoir and its application», *Ecological Indicators*, vol. 101, pp. 734-741, jun. 2019, doi: [10.1016/j.ecolind.2019.01.068](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.068).
- [2] S. Ahmad, I. H. Khan, y B. P. Parida, «Performance of stochastic approaches for forecasting river water quality», *Water Research*, vol. 35, n.º 18, pp. 4261-4266, dic. 2001, doi: [10.1016/S0043-1354\(01\)00167-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00167-1).
- [3] A. K. Sampathirao, J. M. Grosso, P. Sopsakis, C. Ocampo-Martinez, A. Bemporad, y V. Puig, «Water demand forecasting for the optimal operation of large-scale drinking water networks: The Barcelona Case Study.», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, n.º 3, pp. 10457-10462, ene. 2014, doi: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.01343](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01343).
- [4] S. Platikanov *et al.*, «Chemometric analysis for river water quality assessment at the intake of drinking water treatment plants», *Science of The Total Environment*, vol. 667, pp. 552-562, jun. 2019, doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.02.423](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.423).
- [5] J. Yanza-López *et al.*, «Evaluation of FeCl<sub>3</sub> and PAC for the potabilization of water with high content of color and low turbidity», *TecnoLógicas*, vol. 22, n.º 45, pp. 11-23, ago. 2019, doi: [10.22430/22565337.1085](https://doi.org/10.22430/22565337.1085).
- [6] MAVDT, «Resolución Conjunta 2115 de 2007 Ministerio de la Protección Social», 2007. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=30008&dt=S> (accedido may. 28, 2019).
- [7] J. M. G. Díaz, N. G. Díaz, y A. M. Q. Cuellar, «Comparación entre los índices de agua potable IAP y los índices de riesgo de la calidad de agua para consumo humano IRCA utilizados para la determinación de la calidad del agua para consumo humano», *Publicaciones e Investigación*, vol. 4, n.º 1, pp. 53-59, may. 2010, doi: [10.22490/25394088.578](https://doi.org/10.22490/25394088.578).
- [8] M. Garfí, E. Cadena, D. Sanchez-Ramos, y I. Ferrer, «Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles», *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 997-1003, nov. 2016, doi: [10.1016/j.jclepro.2016.07.218](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.218).
- [9] M. Martínez-Orjuela, J. Mendoza-Coronado, B. Medrano-Solís, L. Gómez-Torres, y C. Z.- Mejía, «Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal», *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, n.º 1, pp. 15-24, mar. 2020, doi: [10.18273/revuin.v18n4-2020001](https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2020001).
- [10] A. Gibrilla, G. Anornu, y D. Adomako, «Trend analysis and ARIMA modelling of recent groundwater levels in the White Volta River basin of Ghana», *Groundwater for Sustainable Development*, vol. 6, pp. 150-163, mar. 2018, doi: [10.1016/j.gsd.2017.12.006](https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.006).

- [11] P. Narayanan, A. Basistha, S. Sarkar, y S. Kamna, «Trend analysis and ARIMA modelling of pre-monsoon rainfall data for western India», *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 345, n.º 1, pp. 22-27, ene. 2013, doi: [10.1016/j.crte.2012.12.001](https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.12.001).
- [12] D. Ömer Faruk, «A hybrid neural network and ARIMA model for water quality time series prediction», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, n.º 4, pp. 586-594, jun. 2010, doi: [10.1016/j.engappai.2009.09.015](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.09.015).
- [13] K. S. Parmar y R. Bhardwaj, «Statistical, time series, and fractal analysis of full stretch of river Yamuna (India) for water quality management», *Environ Sci Pollut Res Int*, vol. 22, n.º 1, pp. 397-414, ene. 2015, doi: [10.1007/s11356-014-3346-1](https://doi.org/10.1007/s11356-014-3346-1).
- [14] K. Lotfi *et al.*, «Predicting wastewater treatment plant quality parameters using a novel hybrid linear-nonlinear methodology», *Journal of Environmental Management*, vol. 240, pp. 463-474, jun. 2019, doi: [10.1016/j.jenvman.2019.03.137](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.137).
- [15] Apha, *Standard Methods*, Edición: 22. Washington, DC: Clearway Logistics Phase 1a, 2012.
- [16] WHO, «Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum», OMS, 2017. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/) (accedido may. 28, 2019).
- [17] V. Y. Bohn, M. C. Piccolo, y G. M. E. Perillo, «Análisis de los periodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina)», mar. 2011, Accedido: may. 28, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/21270>.
- [18] G. E. P. Box y G. Jenkins, *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. San Francisco, CA, USA: Holden-Day, Inc., 1990.
- [19] V. M. Guerrero, *Análisis Estadístico de Series de Tiempo Económicas*. International Thomson Editores, S. A. de C. V., 2003.
- [20] S. Farooq, I. Hashmi, I. A. Qazi, S. Qaiser, y S. Rasheed, «Monitoring of Coliforms and chlorine residual in water distribution network of Rawalpindi, Pakistan», *Environ Monit Assess*, vol. 140, n.º 1, pp. 339-347, may 2008, doi: [10.1007/s10661-007-9872-2](https://doi.org/10.1007/s10661-007-9872-2).
- [21] O. Akoto, O. Gyamfi, G. Darko, y V. R. Barnes, «Changes in water quality in the Owabi water treatment plant in Ghana», *Appl Water Sci*, vol. 7, n.º 1, pp. 175-186, mar. 2017, doi: [10.1007/s13201-014-0232-4](https://doi.org/10.1007/s13201-014-0232-4).
- [22] M. Ibargüen Castañeda y L. M. Bernal Mejía, «Establecer la demanda de cloro en el Acueducto Tribunas Córcega de la Ciudad de Pereira», Tesis, Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [23] E. Navarro, P. Arias, y S. Viera, «El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia | Navarro-Monterroza | Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales», *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, vol. 43, n.º 166, pp. 120-132, mar. 2019, doi: [10.18257/raccefy.704](https://doi.org/10.18257/raccefy.704).
- [24] H. Z. Ibrahim y 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, n.º 4, pp. 733-740, dic. 2013, doi: [10.1007/s13201-013-0121-2](https://doi.org/10.1007/s13201-013-0121-2).

- [25] J. Romero, *Calidad del agua*, 3 edición. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2009.
- [26] D. Zalacáin, S. Martínez-Pérez, R. Bienes, A. García-Díaz, y A. Sastre-Merlín, «Salt accumulation in soils and plants under reclaimed water irrigation in urban parks of Madrid (Spain)», *Agricultural Water Management*, vol. 213, pp. 468-476, mar. 2019, doi: [10.1016/j.agwat.2018.10.031](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.031).
- [27] M. M. Barbooti *et al.*, «Evaluation of quality of drinking water from Baghdad, Iraq», *Science World Journal*, vol. 5, n.º 2, ene. 2010, doi: [10.4314/swj.v5i2.61512](https://doi.org/10.4314/swj.v5i2.61512).
- [28] A. Azzouz y E. Ballesteros, «Influence of seasonal climate differences on the pharmaceutical, hormone and personal care product removal efficiency of a drinking water treatment plant», *Chemosphere*, vol. 93, n.º 9, pp. 2046-2054, nov. 2013, doi: [10.1016/j.chemosphere.2013.07.037](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.037).
- [29] K. Zhang, G. Achari, R. Sadiq, C. H. Langford, y M. H. I. Dore, «An integrated performance assessment framework for water treatment plants», *Water Research*, vol. 46, n.º 6, pp. 1673-1683, abr. 2012, doi: [10.1016/j.watres.2011.12.006](https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.006).
- [30] C. W. Baxter, Q. Zhang, S. J. Stanley, R. Shariff, R.-R. Tupas, y H. L. Stark, «Drinking water quality and treatment: the use of artificial neural networks», *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 28, n.º S1, pp. 26-35, ene. 2001, doi: [10.1139/100-053](https://doi.org/10.1139/100-053).
- [31] C. Montoya, C. Cruz, P. Torres, y J. Escobar, «Effect of increase of raw water turbidity on efficiency of conventional drinking water treatment processes», *Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq.*, vol. 16, pp. 137-148, 2011.