



Implementación de Plástico Polipropileno como Material de Contacto en Aireadores de Bandejas

Polypropylene Plastic Implementation as a Contact Material in Tray Aerators

Carlos Enríquez | Universidad Central del Ecuador
Elio Álvarez | Universidad Central del Ecuador

ARTICLE HISTORY

Received: 20/03/2023
Accepted: 04/05/2023

PALABRAS CLAVE

Transferencia de gases, torres de aireación, aireación por gravedad, tratamiento de aguas.

KEY WORDS

Gas transfer, aeration towers, gravity aeration, water treatment.

RESUMEN

La presente investigación es una alternativa de uso de polipropileno (PP) como medio de contacto en torres de aireación, con el fin de remoción de hierro, ácido sulfhídrico y dióxido de carbono en reemplazo de la grava tradicional. Se construyeron dos prototipos, utilizando grava y plástico polipropileno, considerando que la torre patrón es la que contiene grava. Este proceso determinó que el polipropileno es eficiente para oxidar metales y remover gases, siendo el 50,4% de hierro, 33% de dióxido de carbono (CO₂) y 23% ácido sulfhídrico (H₂S) a diferencia de la grava que presentó valores de 30% para CO₂ y 69% de H₂S, respectivamente, además se obtuvo que la torre con grava es un 21,7% más económica que la del PP. Se genera gestión de economía circular mediante el reúso de residuos no biodegradables y se evita el uso de recursos pétreos no renovables como la grava

ABSTRACT

This research is an alternative to using polypropylene (PP) as a contact medium in aeration towers; to remove iron, hydrogen sulfide, and carbon dioxide instead of traditional gravel. Two prototypes were built, using gravel and polypropylene plastic, considering that the standard tower is the one that contains gravel. This process determined that polypropylene is efficient in oxidizing metals and removing gases, 50.4% Iron, 33% Carbon Dioxide (CO₂), and 23% Hydrogen Sulfide (H₂S). Unlike gravel, which presented values of 30% for CO₂ and 69% H₂S, respectively. It was also obtained that the tower with gravel is 21.7% cheaper than that of PP. Circular economy management is generated by reusing non-biodegradable waste and avoiding using non-renewable stone resources such as gravel

I. INTRODUCCIÓN

El agua es la principal materia prima de los seres humanos y su más importante recurso de supervivencia, por lo cual, garantizar su calidad de consumo está dentro de las leyes y derechos de cada país [1]. Previo a la distribución de agua potable, esta debe ser sometida al tratamiento más acorde, dependiendo de su origen, sea este residual o cruda; así como de sus características físicas, químicas y microbiológicas; con lo que podemos asignarle dife-

rentes procedimientos de depuración. La caracterización del agua como base de análisis, establece las condiciones en que ingresa a la planta, cuyos resultados podrían dar la presencia de hierro, dióxido de carbono, manganeso, entre otros [2]. Si se contase con dichos parámetros, una alternativa de remoción es la transferencia de gases, a través de la aireación [3].

La aireación es un proceso que consiste en incluir aire en el agua por medio de la transferencia de gases; todo esto con el propósito de remover ciertos contaminantes [3]. La variedad de aireadores que se tienen es por gravedad, que a su vez se clasifican en aireadores de bandeja, manual y de cascada [4]. En aireadores de bandeja, de manera común se diseñan con un medio de contacto, de grava, coque o ladrillo, la razón fundamental es el aumentar el área de contacto con el aire y garantizar la remoción de sustancias volátiles y transferencia de gases [4].

Actualmente, con el avance tecnológico e investigativo, se busca mejorar los sistemas tradicionales de aireación, a través de la implementación de nuevas alternativas que reduzcan costos e impactos ambientales. Entre la serie de alternativas existentes, se analizó la inclusión del polipropileno (PP) como medio de contacto; su aplicación ya se la ha realizado en otras etapas del proceso de tratamiento de aguas, tal es el caso de pozos de absorción o percolación.

El PP es considerado uno de los contaminantes más comunes en botaderos y cuerpos de agua, por lo tanto, al reutilizarlo o darle una funcionalidad extra antes de su disposición final, ayudaría a mitigar este tipo de impacto ambiental [5].

En cuanto al plástico reciclado como material de contacto en aireadores de bandejas, no se ha incursionado en esta opción para el tratamiento de aguas, siendo necesario un estudio para conocer la funcionalidad, eficiencia y presupuesto de este material adaptado a las condiciones de nuestro medio, para su posible aplicación en el futuro como una nueva opción al momento de construir torres de aireación, aportando con un diseño de economía circular mediante la reutilización de plástico, evitando así la contaminación ambiental.

El uso del polipropileno en el tratamiento de aguas está involucrado en varios estudios, como el realizado por [6] en su trabajo denominado «Propuesta de mejoramiento para el tratamiento de agua potable y residual en la empresa Palmas del Cesar S. A.» en la ciudad de Bucaramanga, Colombia, donde se evidencia el uso de pall rings como medio de contacto en las torres de aireación. El pall rings es un anillo cilíndrico hueco, modelado por inyección, construido a base de polipropileno natural de alta densidad, que al incluirlo en el sistema de aireación obtuvo resultados efectivos en la absorción de hierro.

A su vez, existen trabajos afines como el realizado por [7] denominado «Influencia del plástico reciclado en las características del agua residual doméstica mediante el proceso de filtro percolador» en Perú con el uso de polietilentereftalato (PET), donde se lograron efectos positivos

en reducción de DQO y DBO₅ superiores al 90 por ciento, en aguas residuales de origen doméstico.

El objetivo principal de esta investigación fue incorporar a los aireadores de bandeja el PP, como medio de contacto, en reemplazo de la grava tradicional. Su integración permitió analizar la factibilidad de este material, ofreciendo una opción que permita disminuir la utilización de recursos no renovables, como es la grava, y, por otra parte, reducir la contaminación generada por la acumulación de plásticos en los sitios de disposición final.

Para determinar la eficiencia del polipropileno como medio de contacto, se diseñó y construyó torres de aireación, acogiendo las recomendaciones otorgadas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). En las mencionadas torres de aireación se colocó grava, para posteriormente pasar la muestra de agua mediante un sistema de bombeo que permita controlar el caudal que ingresa al modelo; luego se realizó este mismo procedimiento colocando plástico polipropileno en lugar de grava, para posteriormente analizar eficiencias y comparaciones entre los diferentes materiales de contacto utilizados.

En el laboratorio de la Universidad Central del Ecuador se prepararon diferentes tipos de agua sintética con concentraciones de dióxido de carbono, para lo que se tomó la muestra de agua y se expuso a dicho gas durante varios minutos. De igual forma, se agregó agua proveniente del camal metropolitano de Quito para garantizar la presencia de hierro. Y, finalmente, se utilizó como base el agua del río Machángara (ácido sulfhídrico), para determinar las concentraciones presentes de este gas.

Con la finalidad de garantizar la calidad de agua producida experimentalmente se realizó una caracterización para medir parámetros físicos y químicos como temperatura, turbidez y pH.

Una vez obtenidos todos los parámetros, datos e información, para su procesamiento se utilizó la herramienta Minitab para ofrecer un análisis completo de la investigación experimental; con el propósito de comprobar la eficiencia de la aireación y plástico polipropileno como material de contacto en el tratamiento de aguas y posteriormente relacionarla con las fuentes de información tanto primarias como secundarias, y de esta manera proceder al diseño óptimo del sistema.

Para finalizar y complementar este proyecto de investigación, se realizó un análisis técnico y económico de todas las alternativas, a fin de elegir la más viable, lo que permitirá tener enfoques presupuestarios y técnicos del proyecto a desarrollar.

2. MÉTODO

2.1. DISEÑO DE TORRES DE AIREACIÓN

El diseño de las torres de aireación parte de un caudal de diseño (Q_{dis}) que depende directamente del caudal medio diario por un factor de capacidad, de acuerdo con el nivel de servicio; es así como se estimó un caudal de diseño de 1 L/s (ver Tabla 1).

Para el diseño de las torres de aireación, nos basamos en los valores recomendados por [8]; con el fin de enmarcarnos en una metodología validada y que permita generar una comparativa adecuada frente a otras torres de aireación.

Es así como, según la tabla 1, la carga hidráulica no puede ser mayor a $900 \text{ m}^3/\text{dm}^2$, eso quiere decir la cantidad de agua que podrá ingresar al sistema por unidad de área; de la misma forma mantenerse en un número óptimo de bandejas (3- 6), a fin de generar la transferencia de gases deseada y cumplir con la altura de torre estipulada.

Como parámetros complementarios, según [9] se tiene:

- Diámetro de orificios de 0,5 cm
- Separación entre orificios de 2,5 cm
- Carga hidráulica (Ch) 2 l/s-m^2

Para el área específica (Ae) adoptado es de $0,15 \text{ m}^2/\text{l/s}$, mismo que cumple con las especificaciones tanto de [10] y [11] (ver Tabla 2).

Como material elegido para las torres de aireación se tienen perfiles de acero ASTM A36, por medio de un análisis estático se pudo evidenciar que las torres de aireación cumplen con los rangos de diseño, es decir, se tiene un esfuerzo máximo de tensión Von Misses de 23 MPa, muy inferior al límite de fluencia del A36 (límite de fluencia $S_y=236 \text{ MPa}$), con una deformación promedio de 0,93 mm. Mediante una bomba de 1 HP con un rango de caudal de 1 a 3 l/s, garantizamos el flujo de agua para el proceso de corridas de aireación respectivos (ver Figura 1).

2.2. MEDIOS DE CONTACTO

2.2.1. Grava. El material granular (grava) fue tomado de la cantera Chaupi Chupa, que se ubica en el cantón Quito, parroquia Nayón, provincia de Pichincha, sector San Pedro del Valle.

En este lugar los materiales pétreos son de un ambiente aluvial que está desarrollado por terrazas jóvenes y material coluvial propio del sitio; es una cantera de uso frecuente como materia prima, debido a sus propiedades resistentes a la abrasión con valores de densidad de 1700 kg/m^3 .

Aquí podemos encontrar agregados gruesos de diferentes granulometrías; las mismas van desde $3/8$ de pulgada hasta los $3/4$ de pulgada; en esta investigación se utilizaron diámetros de $3/4$ de pulgada.

2.2.2. Polipropileno. Descubierta en Italia, en 1954, por G. Natta y K. Ziegler, fue comercializado en América del norte y Europa rápidamente en 1957; es considerado un polímero con características termoplásticas obtenido de forma industrial a partir del hidrocarburo insaturado de la molécula del propileno (C_3H_6) $_n$, presenta características únicas lo que lo hacen muy demandado en la industria, pues una de sus propiedades principales es que resiste temperaturas superiores a los 100°C en la atmosfera terrestre además de que soporta los 140°C para su esterilización con agua presurizada sin deformarse [5]. Entre las más importantes características se puede mencionar que tiene un peso ligero, resiste a la compresión, tensión, álcalis y ácidos y presenta una baja absorción a la humedad.

El material para esta investigación fue obtenido en la ciudad de Guayaquil, de una empresa dedicada al reciclaje del polipropileno que se encuentran en textiles, envases, dispositivos médicos, empaques de alimentos, materiales de laboratorio, entre otros. Para utilizar el material descrito, este ha pasado por procesos de recolección, triturado, lavado, centrifugado, secado, granceado y extrusión (ver Tabla 3).

2.3. AGUA SINTÉTICA

Para poder garantizar la estabilidad y sobre todo la existencia de los parámetros a ser analizados, producimos una muestra de agua sintética en el laboratorio, esto nos dio la posibilidad de analizar eficiencias de los aireadores, variando las concentraciones de dióxido de carbono, hierro y ácido sulfhídrico.

Para este fin, tomamos un agua cruda como base, siendo la escogida la del río Machángara en el sector de Monjas, dicho lugar fue definido por la facilidad de acceso y toma de la muestra; la misma que tuvo que ser verificada en cuanto a la presencia o no de los parámetros en análisis (CO_2 , Fe y H_2S).

Al verificar la existencia de los parámetros en análisis, pero considerando la variabilidad que se maneja en cuerpos de agua naturales, se complementa el proceso realizando el siguiente procedimiento: por cada 20 litros de agua del río Machángara se añadieron 2 litros de agua proveniente de la PTAR Camal de Quito, con esto garantizamos la cantidad de hierro; con la finalidad de aumentar la materia orgánica en el agua se dejó tapados los envases llenos durante 24 horas; para el dióxido de carbono, se conectó una manguera al tubo de escape de un vehículo, hasta el interior del envase de la muestra de agua sintética en un lapso de 5 minutos (ver Tabla 4).

Tabla 1.

Valores recomendados para los parámetros de las torres de aireación

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Carga hidráulica	300-900	m ³ /dm ²
Número de bandejas	3-6	u
Altura total del aireador	1,2-3	m
Lecho de contacto	15-30	cm
• Espesor	4-15	cm
• Coque o piedra, diámetro	5-15	cm
• Esferas de cerámica, diámetro	5-15	cm
Orificios de distribución, diámetro	5-12	mm
Profundidad de agua en las bandejas	15	cm
Separación entre bandejas	30-75	cm

Nota. Parámetros de diseño de aireadores de bandeja. Tomado de Romero, J, 2002 [8]. Purificación del agua. Segunda edición. Bogotá-Colombia.

Tabla 2.

Cuadro resumen del diseño de las torres de aireación

Nº	Parámetros	Valor
1	Número de bandejas	4
2	Largo (m)	0.40
3	Ancho (m)	0.40
4	Diámetro de orificios (m)	0.005
5	Separación de orificios	0.025
6	# orificios por fila y col.	13
7	Diámetro lecho coque (m)	0.02
8	Altura lecho coque (m)	0.15
9	Altura de bandejas (m)	0.2
10	Separación entre bandejas	0.15
11	Altura total (m)	1.4

Nota. Resultados del diseño de las torres de aireación

Tabla 3.

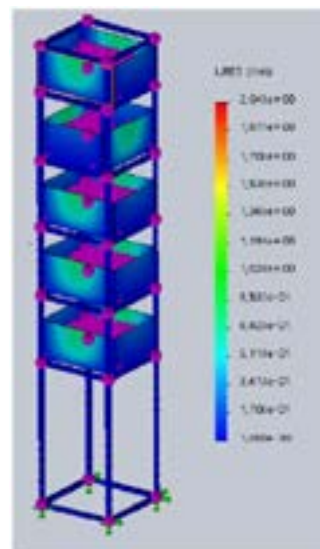
Especificaciones del polipropileno como material de contacto

Peso/	29g
Peso/ unidad	81,2 kg
Color	Obscuro
Textura	Rugoso
Área de contacto	
Deformación	ASTM D648 – 245 °F @ 66 psi
Esfuerzo a la tracción	ASTM D648 – 245 °F @ 66 psi
Densidad	ASTM D792 – (0,91 a 0,93) g/
Inflamabilidad	ASMT D635 – 600 °C (bajo)

Nota. Ficha técnica - Relleno plástico tipo esfera. Tomado de Plásticos B&R [12]

Figura 1.

Simulación torre de aireación con grava como medio de contacto



Nota. Esquema de la modelación estructural de la torre propuesta, identificando su estabilidad y funcionalidad ante agentes de carga viva y carga muerta

Tabla 4.*Parámetros de control de la muestra de agua sintética*

Número	Ensayo	Técnica
1	Alcalinidad total	Volumetría
2	Anhídrido carbónico	Cálculo
3	Carbonatos	Cálculo
4	Carga contaminante	Cálculo
5	DBO5	Volumetría
6	DQO	Método oxidativo y colorimétrico
7	Fosfatos	Colorimétrico
8	Hierro total	Espectrofotometría de absorción atómica
9	Sulfuro	Volumetría
10	Turbidez	Método rápido MERCK

Nota. Parámetros que fueron analizados en la muestra de agua sintética y su procedimiento de obtención en el laboratorio. [9]

2.4. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN DE LAS TORRES DE AIREACIÓN EN SUS DIFERENTES MEDIOS DE CONTACTO

Obtenidos los parámetros de diseño, tanto de las torres de aireación y el procedimiento para la elaboración del agua sintética se derivó con la experimentación:

2.4.1. Elaboración de agua sintética

Para iniciar con la preparación de la muestra de agua sintética en las instalaciones de la Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, se procedió a:

- Toma de base de muestra río Machángara, se tomaron 55 litros de agua en el barrio Orquídeas de la ciudad de Quito, en las coordenadas 0°13'19.8"S 78°29'13.5"W; mediante una muestra simple, a una temperatura de 19°C en un día soleado, sin lluvia.
- Tomadas las muestras del río Machángara se dejaron almacenadas durante 24 horas con la finalidad de proliferar los sulfuros.
- Por cada 20 litros de agua se colocaron 2 litros de agua proveniente del camal metropolitano del sur de Quito.
- Se conectó una manguera desde el tubo de escape del vehículo hacia el envase de la muestra de agua, para adicionar concentraciones de CO₂.
- Culminado el proceso de elaboración de agua sintética se tomó una muestra para determinar los parámetros iniciales que contiene la misma antes de pasar por las torres de aireación.

2.4.2. Prueba de medios de contacto en torres de aireación

Las torres se instalaron y llenaron con los diferentes medios de contacto (polipropileno y grava) a una altura de 15 cm con cada material, previo dato establecido en el diseño de las torres.

Se acopló la bomba de agua previamente calibrada para impulsar la muestra al caudal establecido en el diseño de la torre, 1 L/s. Para obtener la calibración de la bomba se realizaron aforos *in situ*, asegurando así que el volumen de agua por segundo trasladado sea el correcto y no se modifique el diseño inicial.

Posteriormente, se procedió a pasar 20 litros de agua sintética preparada en el laboratorio por cada torre de aireación, durante 20 segundos como se determinó en el diseño inicial; para ambos medios de contacto, grava y plástico polipropileno.

Finalmente, se tomaron las muestras una vez realizadas la experimentaciones por las torres de aireación, respectivamente etiquetadas, para determinar su estado y concentraciones finales.

Posterior al paso de agua por las torres de aireación y su análisis de laboratorio, es necesario comparar las eficiencias de remoción del hierro, dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico, a fin de concluir si el material PP como medio de contacto presenta características positivas y ventajosas por sobre la grava.

El análisis debió complementarse con la determinación de parámetros de pH, color, temperatura y conductividad, esto se lo hizo con la finalidad de tener un control de la muestra durante los ensayos en la torre de aireación con los diferentes medios de contacto, a su vez se

realizaron ensayos adicionales de alcalinidad, DBO, DQO, turbidez, carga contaminante y fosfatos.

Es importante aclarar que la aireación en muchos de los parámetros analizados no es una operación unitaria cuyo fin sea su remoción, pero la finalidad fue obtener información agregada de la interacción con los diferentes medios de contacto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DISEÑO DE TORRES DE AIREACIÓN

El diseño propuesto cumple con lo planteado tanto por RAS [10], la normativa colombiana para la purificación del agua elaborada por [8]; es importante anotar que además gran parte del diseño se fundamenta en las recomendaciones dadas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) [11].

El diseño arrojó los siguientes resultados:

- 4 bandejas de 40 x 40 x 20 cm con altura del medio de contacto de 15 cm y separación entre bandejas de 15 cm.
- 169 orificios de 5 mm de diámetro, separados entre sí 2,5 cm.
- Acero ASTM A36 con espesor de 1,2 mm, columnas con un perfil cuadrado de 30x30 mm con 2 mm de espesor.
- Bomba de 1 HP con alcance de 21 m de altura y un caudal hasta de 80 L/s.

3.2. AGUA ELABORADA EN LABORATORIO

Una vez diseñadas las torres de aireación, se procedió a realizar las pruebas de remoción de elementos en la torre de grava y polipropileno; a continuación, se describen los resultados obtenidos de la caracterización de la muestra de agua sintética elaborada en laboratorio, los resultados obtenidos al realizar los ensayos se muestran en la tabla 5 (ver Tabla 5).

3.3. EFICIENCIA DE LAS TORRES DE AIREACIÓN

Dióxido de carbono. En este parámetro, en condiciones iniciales tuvo un valor de 191 mg/L; en la torre con grava, tuvimos una eficiencia de 30,9 % y en el caso de la torre con PP una eficiencia del 33%, siendo la torre con polipropileno más eficiente en 6,36% (ver Figura 4).

Hierro. Para este parámetro en condiciones iniciales se tuvo un valor de 3,47 mg/L, en la torre con grava no existió remoción de hierro, en el caso de la torre con polipropileno se tuvo una eficiencia del 50,4%, de acuerdo con [13] el rango aceptable de remoción de hierro en torres de aireación debe estar entre 30 y 50% sin el uso de agentes químicos que ayuden a una mejor adsorción de hie-

rrero, estos valores son utilizados para aguas sedimentadas pretratadas (ver Figura 5).

Ácido sulfhídrico. Para este parámetro en condiciones iniciales se tuvo un valor de 2,26 mg/L, en el caso de la torre con grava se tuvo una eficiencia del 69%, mientras que, en la torre con polipropileno se obtuvo una eficiencia de remoción del 23%.

Para [14], los rangos de remoción de ácido sulfhídrico deben ser de 40 a 70 % en el mejor de los casos (ver Figura 6).

Estos son los tres parámetros principales de análisis en esta investigación, ya que su remoción puede darse a través del uso de la aireación; pero nos hemos planteado definir qué sucede con otros parámetros complementarios importantes en la definición de la calidad del agua.

Parámetros complementarios. Se realizó una caracterización de las muestras de agua analizando pH, color, temperatura y conductividad con la finalidad de tener un control de la muestra durante los ensayos en la torre de aireación con los diferentes medios de contacto, asimismo se realizaron ensayos de alcalinidad, DBO, DQO, turbidez, carga contaminante y fosfatos (ver Figuras 7, 8, 9, 10 y 11).

3.4. DISCUSIÓN

El PP al ser un polímero formado por cadenas de ramificaciones y al tener un ancho físico inferior a 0,7 nm, le da la capacidad de que las moléculas de dióxido de carbono queden atrapadas para obtener una separación con respecto al líquido; así como indica [15] dicha capacidad que tiene el polímero, es en parte por las moléculas apolares, las que aumentan la selectividad del CO_2 sobre otras moléculas; al comparar esto con otros gases facilita las separaciones por adsorción, ya que generalmente conduce a interacciones de adsorbato-adsorbente más fuertes.

Las altas eficiencias de remoción de hierro en las torres de PP, se debe a que como se indicó en el ítem anterior, este material contiene una estructura molecular que forma cadenas ramificadas espaciales; razón principal para que las moléculas de hierro cuando pasan por el material queden atrapadas y se obtenga así la separación de este componente, para [16], el principio de adsorción de este polímero es alto, además es capaz de eliminar una amplia gama de microcontaminantes con una tasa de eliminación rápida y grandes cantidades de captación, puede capturar contaminantes cargados de manera positiva, negativa y neutra.

A diferencia del CO_2 , el H_2S es un gas menos denso, eso quiere decir que en cada molécula de este gas se tiene mayor cantidad de partículas, por lo que la grava al tener una estructura molecular más compacta, a diferencia del polipropileno, permite retener este gas en las ramificaciones internas que forman este elemento, de tal manera que se produce la separación del gas sobre el agua por medio de la adsorción.

Tabla 5.*Parámetros de control de la muestra de agua sintética*

Parámetros	Unidades	Condiciones iniciales	Ensayos	
			Torre con grava	Torre con polipropileno
Alcalinidad total	mgCaCO ₃ /L	259	145	255
Dióxido de carbono (CO ₂)	mg/L	191	132	128
Carbonatos	mg/L	No detectable	No detectable	No detectable
Carga contaminante	kg/día	18	25	17
DBO ₅	mgO ₂ /L	72	25	56
DQO	mgO ₂ /L	126	73	146
Fosfatos (P-PO ₄)	mg/L	5	2	3
Hierro	mg/L	3,47	4,08	1.72
Ácido sulfhídrico	mg/L	2,26	0,70	1.74
pH	-	7,66	7,74	8
Oxígeno disuelto	mg/L	0,42	5,88	4,04
Temperatura	°C	20,5	20.1	21,7
Color	UPC	100	60	80
Turbidez	NTU	117	58	114

Nota: Se muestra los resultados del agua sintética y de la corrida por las torres con diferentes medios de contacto propuestos en la investigación.

Figura 2.*Polipropileno reciclado*

Nota. Imagen del material PP utilizado como medio de contacto en esta investigación.

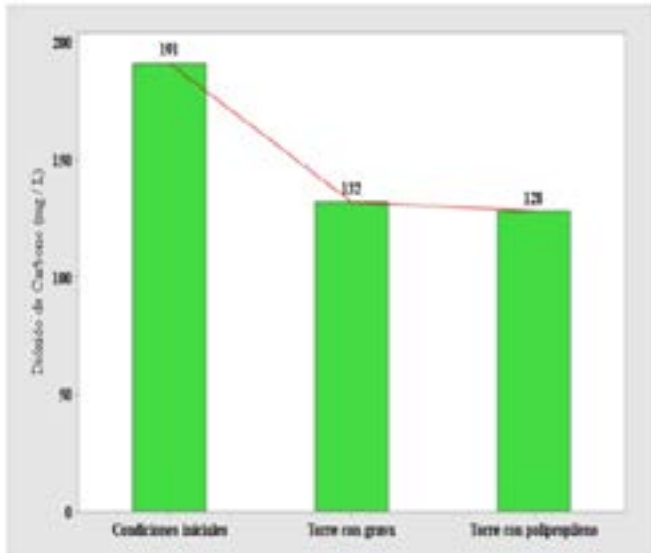
Figura 3.*Torres de aireación con PP y grava*

Nota. Proceso del paso de agua sintética por las torres con los medios de contacto producto de la investigación.

Para los parámetros complementarios, sus resultados reflejan que el rango de eficiencia de remoción de DQO, depende del metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios que, a través de

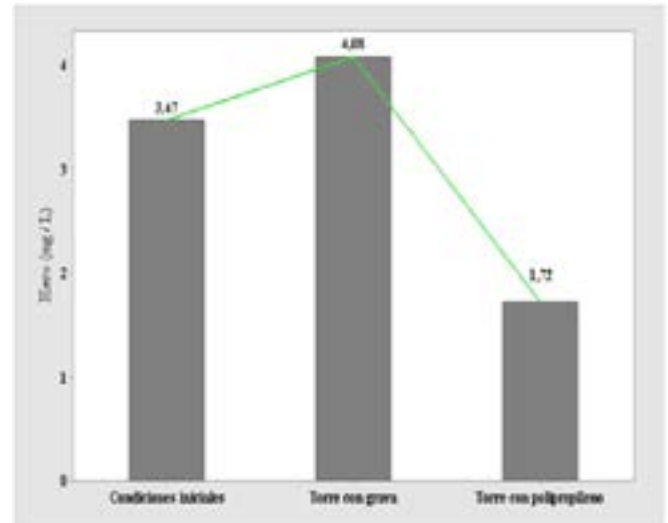
compuestos orgánicos del agua producen biomasa, así como reacciones químicas de óxido reducción. La grava es un material con estructura molecular más compacta y de mayor densidad, lo que brinda la posibilidad de atrapar los sedimentos de mayor tamaño.

Figura 4.
Torres de aireación con PP y grava



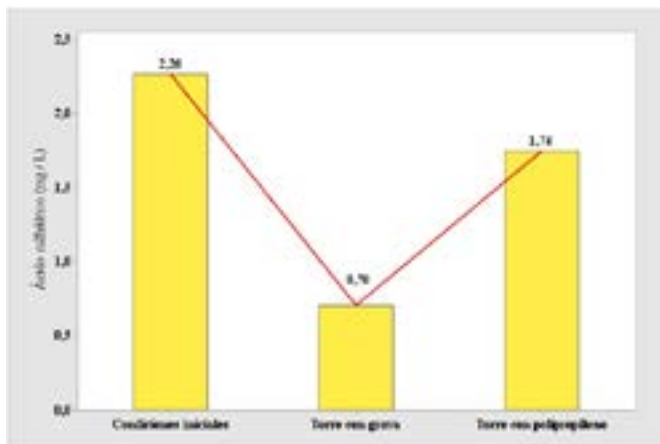
Nota. Gráfica comparativa de remoción de CO₂ en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

Figura 5.
Eficiencia de remoción de hierro del agua tratada con las diferentes torres de aireación



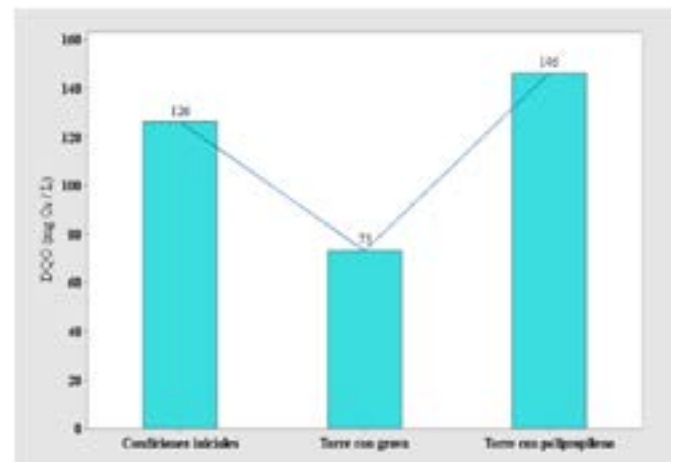
Nota. Gráfica comparativa de remoción de CO₂ en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

Figura 6.
Eficiencia de remoción de ácido sulfhídrico del agua tratada con las diferentes torres de aireación



Nota. Gráfica comparativa de remoción de H₂S en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

Figura 7.
DQO del agua tratada



Nota. Gráficas comparativas de remoción de DQO y DBO en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

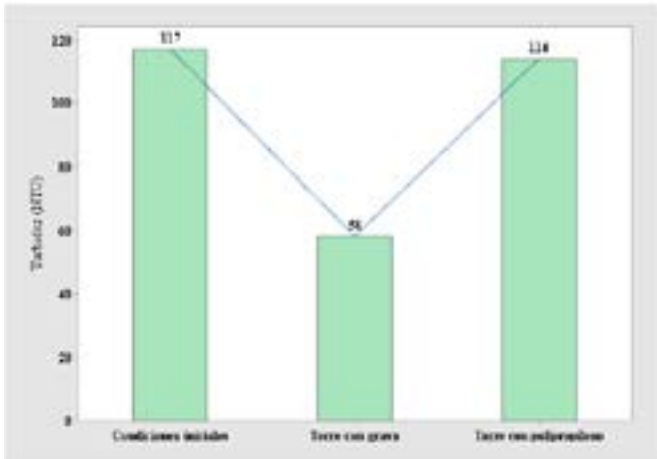
En el caso de la grava al ser un material más irregular y con porosidad alta se produce mayor turbulencia y una mejor oxigenación del agua, en el caso del polipropileno presenta una menor oxigenación debido el aumento de temperatura y su superficie lisa.

El aumento del pH está asociado al aumento de temperatura que se produce en el material de contacto en este caso el polipropileno posee un coeficiente de absorción de radiación solar mayor por lo cual se evidencia un aumento en la temperatura del agua y a su vez un pH más elevado; mientras que con la grava se evidencia una

disminución de temperatura debido a la baja conductividad térmica que esta posee, se produce un enfriamiento por convección natural.

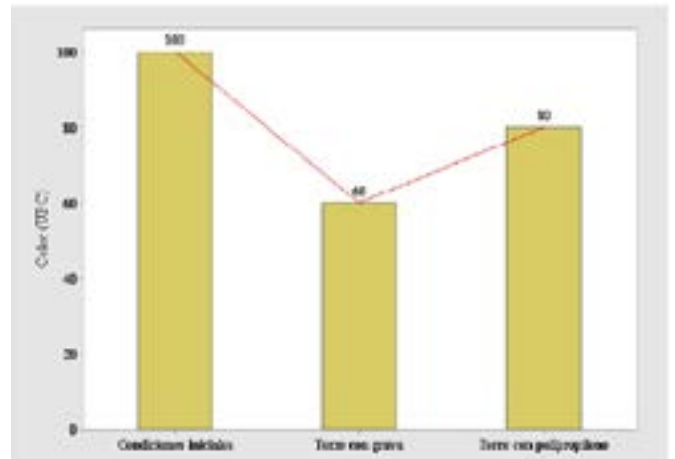
La eficiencia total de la torre con polipropileno es mayor en un 62,7%; en consecuencia, la alternativa de utilizar la torre con polipropileno es más viable en cuanto a la inversión y beneficio que se pretende obtener.

Figura 8.
Gráfico comparativo de remoción de DQO y DBO



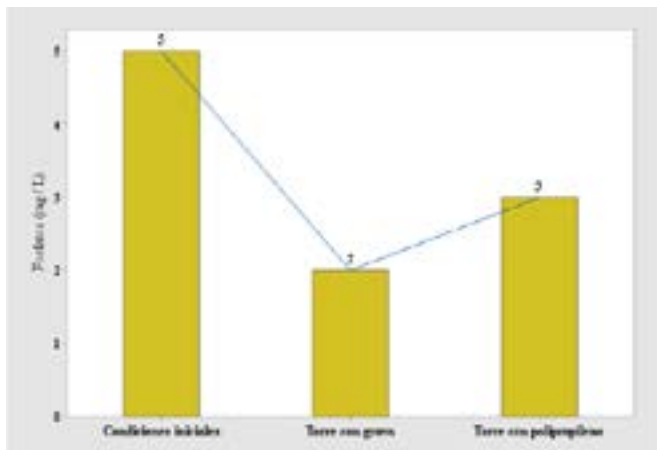
Nota. Comparativo de remoción de DQO y DBO en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

Figura 9.
Color del agua tratada



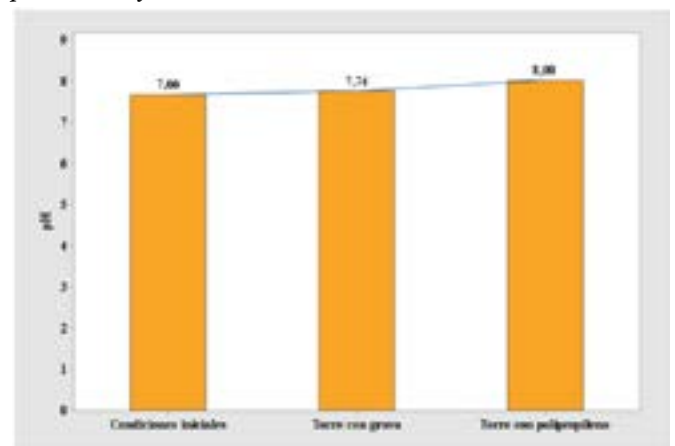
Nota. Comparativo de remoción de color y fosfatos en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

Figura 10.
Turbidez del agua tratada



Nota. Comparativo de remoción de color y fosfatos en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

Figura 11.
pH con las diferentes torres de aireación.



Nota. Comparativo de remoción de pH en las torres con los medios de contacto propuestos en la investigación, tomando como partida las condiciones iniciales del agua sintética.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, hemos respondido nuestra pregunta de investigación sobre el hecho de que el PP remueve los contaminantes considerados como prioritarios en el estudio, estos son el CO₂, H₂S y Fe; de la misma forma validamos nuestra hipótesis que planteaba el hecho de afirmar la funcionalidad que tendrá el PP como medio de contacto en aireadores de bandeja.

Se diseñaron torres de aireación cumpliendo con las recomendaciones y criterios hidráulicos respectivos, a fin de poder brindar un escenario real al proceso de transferencia de gases; a partir de esto nacen nuevas interrogantes sobre si el aumento de caudal o el cambio del material

de fabricación de las torres tendría alguna influencia en los procesos de remoción de los contaminantes susceptibles a eliminación con este proceso, así como de condiciones climáticas adversas o distintas a las que se tuvieron durante las pruebas de esta investigación.

El medio de contacto con el cual se obtuvo una mayor eficiencia de remoción de CO₂ y Fe fue el polipropileno con valores de 33% y 50,4%, respectivamente, respecto a la remoción de H₂S se obtuvo una eficiencia de remoción del 69% con grava, esto se debe a que las moléculas de dióxido de carbono y hierro son de mayor tamaño y el polipropileno, como se indicó anteriormente, es capaz de retener estas partículas por el tamaño de las ramificaciones

en su estructura interna; a diferencia del ácido sulfhídrico que sus moléculas son más pequeñas y la grava al tener una estructura interna más compacta permite retener estas partículas.

Evidentemente existe una disminución menor en la remoción de H_2S del PP frente a la grava, por las características físicas del material tradicional, para esta investigación se cumple con la premisa de que sí existe remoción, pero consideramos importante analizar posibilidades de aumentar esta remoción usando como base el PP y ciertas técnicas que ayudarían con este parámetro; por lo que, en futuras investigaciones, ya se está trabajando sobre este particular.

La aireación por gravedad mediante torres ha demostrado su eficiencia a lo largo del tiempo en la remoción de gases y oxidación de metales en el tratamiento de aguas. En la actual investigación, se obtuvo un alto rango de eficiencia de remoción de metales del 50,4% al utilizar un medio de contacto alternativo como el polipropileno, plástico que está presente en envases, botellas, juguetes, recipientes de alimentos, entre otros, y cuya posible utilización dejaría un cierre adecuado al producto y que no se convierta en un pasivo ambiental.

El material granular es de tipo coluvial, con un tamaño de aproximadamente 2 cm, este material presentó un porcentaje de grava del 70% y de arena del 30%, lo que genera una mayor cantidad de espacios vacíos, a diferencia del polipropileno que tiene espacios de su estructura interna, separados 2 mm, lo que influye directamente en la remoción del hierro, ya que este al oxidarse exhibe partículas de tamaño muy pequeño que no se mantienen en un medio granular.

El polipropileno tiene una relación área volumen (A/V) mayor; con un valor de 157 para la grava y 501 para el PP. Lo que influye en los resultados obtenidos, debido a que, si el PP es más ligero y pequeño, permite que las gotas de agua se rompan en secciones más pequeñas y realicen un mayor tiempo de recorrido entre sus espacios a diferencia del sistema convencional con grava, lo que permitió que la oxidación de metales como el hierro sea más eficiente.

La utilización del material de contacto polipropileno en las torres de aireación genera mayores beneficios desde el punto de vista ambiental al compararlo con el recurso grava; ya que el polipropileno es un material que puede ser encontrado en vasos de plástico, juguetes para niños, recipientes para alimentos, medicinas o productos químicos, entre otros objetos que se pueden reutilizar, disminuyendo así la generación de residuos plásticos y contribuyendo al reciclaje.

Es importante dejar definido la importancia de ampliar esta investigación a, por ejemplo, el cambio de geometría de las torres de aireación o el uso de plástico reciclado en los lugares de disposición final de residuos sólidos; con el fin de verificar su aplicabilidad, sobre todo

buscando el hecho de generar una alternativa de reúso al material con el aporte ambiental respectivo.

Como limitaciones principales a sortear en nuevas investigaciones del tema, podemos anotar que al trabajar con gases se generan problemas sobre la estabilidad de la muestra; si se quiere mantener un patrón de análisis y tener el insumo al cual se lo removerá, es primordial garantizar que no se produzca su volatilización, se podría partir sobre una base de conservación de la muestra en el tiempo, tal que en las corridas en nuevas torres, estas cuenten con el contaminante en estudio.

En resumen, debido al amplio rango de adsorción, el excelente rendimiento del polipropileno, consideramos que maneja grandes potenciales de aplicación para remoción de dióxido de carbono (CO_2) y hierro (Fe).

REFERENCIAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. Obtenido de No dejar a nadie atrás, 2019. Available: <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>
- [2] Acciona, *Potabilizamos el agua para asegurar la vida*, 2020. Obtenido de Potabilización. Available: https://www.acciona.com/es/soluciones/agua/areas-actividad/potabilizacion/?_adin=02021864894
- [3] M. Orellana, *Diseño de una planta de tratamiento, comunidad Colta*, (tesis de ingeniería), ESPOCH, Riobamba, 2016.
- [4] F. Sal, y O. Merino, *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC (Santa Ana- Corrientes), 2007.
- [5] P. Corso, A. López, C. Caleffi, N. Domínguez, y G. Díaz, «Polipropileno», Universidad José Antonio Páez, 2016.
- [6] C. Hammerschmidt, «Propuesta de mejoramiento para el tratamiento de agua potable y residual en la empresa Palmas del Cesar S. A.», (tesis de ingeniería), UPB, Bucaramanga, 2018.
- [7] R. Yucra, «Influencia del pet reciclado en las características del agua residual doméstica mediante el proceso de filtro percolador para el distrito de Taraco, provincia de Huancane, Región Puno», (tesis de ingeniería civil), Universidad Andina, 2016.
- [8] J. Romero, *Potabilización del agua*, 3.^a ed., México, AlfaOmega, 1999.
- [9] E. Álvarez, «Diseño y análisis de la implementación de plástico polipropileno como material de contacto en aireadores de bandejas cuadradas mediante el uso de agua sintética creada a nivel de laboratorio que contenga concentraciones de hierro, ácido sulfhídrico y dióxido de carbono», (tesis ingeniería civil), Universidad Central del Ecuador, Quito, 2022.
- [10] RAS-2000, *Sistema de potabilización*, Min. Desarrollo,

2000. Available: https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=16483
- [11] CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2006.
- [12] R. Budynas, y K. Nisbett, "Diseño con ingeniería mecánica de Shigley", 8.ª ed., McGraw Hill, 2008.
- [13] V. Fierro y L. Ramírez, "Evaluación del proceso de remoción de hierro por medio de la zeolita clinoptilolita en el tratamiento de aguas residuales industriales", (tesis de ingeniería), U. América, Bogotá, 2016.
- [14] E. Israel y C. Vaca, "Evaluación de la capacidad de captura de dióxido de carbono mediante el uso de *Scenedesmus* sp. utilizando agua residual industrial como medio de cultivo", (tesis de ingeniería), Zamorano, 2020.
- [15] D. Bahamon, M. Abu-Zahra, L. Vega, «Fluid phase equilibria molecular simulations of carbon-based materials for selected CO₂ separation and water treatment processes», 2019.
- [16] P. Yang, X. Hu, Y. Tu, G. Xu, L. Sun, and X. Xie, «The synthesis of a DMPillar [5] arene-based porous polymer with ultrafast adsorption rate and high adsorption capacity for organic micropollutants from water», 2022.