

Baquero- Espinosa Laura Daniela, Tafur-Salinas Jehimmy Carolina, Sánchez-Romero Eduard Guillermo, Botello-Suárez Wilmar A.

¹ Universidad El Bosque, Colombia. Email: magonzalez@unbosque.edu.co

Las aguas grises de lavado (AGL) contienen una gran variedad de productos químicos sintéticos empleados a nivel doméstico, tales como microplásticos, colorantes y detergentes. Por tanto, estos efluentes deben ser tratados apropiadamente antes de su vertimiento, o para el desarrollo de actividades de reúso. El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad y el rendimiento de degradación de compuestos orgánicos en AGL mediante la aplicación de la oxidación de Fenton, analizando el grado de acercamiento verde de esta tecnología. El proceso utilizado removió el 91,7 % de la demanda química de oxígeno (DQO) presente en efluente, y aunque presentó un bajo acercamiento verde con índice de 21%, se evidenció que tiene una alta capacidad de remoción con respecto a otros procesos de tratamiento.

Palabras clave: Demanda química de oxígeno; química verde; Tratamiento de aguas residuales.

Greywater from washing (GWW) contains a wide variety of synthetic chemicals used at the household level, such as microplastics, dyes and detergents. Therefore, these effluents must be properly treated before discharge, or for the development of reuse activities. The objective of this study was to evaluate the capacity and degradation performance of organic compounds in FFA by the application of Fenton oxidation, analyzing the degree of green approach of this technology. The process used removed 91.7% of the chemical oxygen demand (COD) present in the effluent, and although it presented a low green approach with a rate of 21%, it was evidenced that it has a high removal capacity with respect to other treatment processes.

Keywords: Chemical oxygen demand; green chemistry; wastewater treatment.

Introducción

Las aguas grises son consideradas residuos líquidos domésticos que proceden de lavadoras, duchas, bañeras y lavaplatos. Estas aguas suelen contener grandes cantidades de elementos propios de los detergentes y productos de higiene personal (Dominguez et al., 2016; Sánchez et al., 2010). Las aguas grises de lavado doméstico (AGL) pueden descomponerse de manera más rápida debido a los nutrientes que están presentes en ellas. Las propiedades químicas de las AGL se encuentran relacionadas directamente con las actividades domésticas, ubicación socioeconómica de la vivienda y el uso intensivo de los detergentes. Por lo anterior, estas aguas se caracterizan por contener fosfatos, nitratos y agentes tensoactivos (Espinoza, M, 2016).

El agua gris proveniente de la lavadora arrastra altos niveles de contaminantes y detergentes, y es responsable de aportar un gran volumen de agua al sistema de alcantarillado. Adicionalmente, las AGL pueden contener fibras sintéticas y colorantes provenientes de celulosa y polímeros basados en petróleo, lo que incide en sus propiedades químicas, incidiendo en su baja biodegradabilidad (Hallett & Johnston, 2010). Al considerar lo anteriormente mencionado, es necesario desarrollar procesos que posibiliten el tratamiento de las AGL a fin de reducir su carga contaminante.

Dentro de las tecnologías de tratamiento más prometedoras, las estrategias de tratamiento químico surgen como una interesante alternativa. La reacción de Fenton es un proceso de tratamiento químico que involucra la generación de radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) altamente reactivos a partir de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en presencia de iones de metal, generalmente hierro $[(\text{Fe})^{(2+)})$.

Esta reacción es ampliamente utilizada química ambiental y de tratamiento de aguas residuales para degradar contaminantes orgánicos y compuestos tóxicos (Hazal Sinem et al., 2023). Diversos autores han explorado la factibilidad de esta tecnología para el tratamiento de un variado tipo de efluentes (Asghar Anam et al., 2014; Figueroa et al., 2008).

Actualmente, aparte de la eficiencia de procesos de remoción por parte de tecnologías de tratamiento, es esencial establecer su grado de acercamiento verde. Este término hace referencia al desarrollo de prácticas y tecnologías que reduzcan el impacto ambiental y promuevan la sostenibilidad en el proceso de tratamiento y en la gestión de los recursos hídricos. No obstante, en literatura científica ha sido poco explorada la eficiencia del proceso Fenton para tratamiento de AGL, y su grado de acercamiento verde.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la oxidación de Fenton en la remoción de compuestos orgánicos presentes en AGL, con el propósito de analizar su grado de contribución al enfoque de acercamiento verde en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Metodología

Colección de la muestra

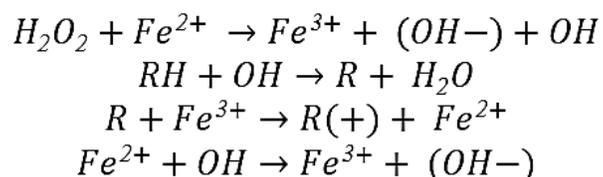
Las muestras de AGL fueron colectadas a partir de efluentes de lavado en recipientes de vidrio de 300 mL. Para ello, los recipientes se ubicaron bajo la descarga de una lavadora de carga frontal de 25 kg de capacidad. Las muestras fueron colectadas por triplicado a partir de la primera descarga realizada. Posteriormente, fueron conducidas hasta el laboratorio de química ambiental de la Universidad El Bosque, manteniendo una temperatura de 3-5°C, evitando el contacto directo con la luz solar.

Análisis físico químico

A fin de establecer las características de las AGL colectadas, inicialmente fue desarrollado el análisis fisicoquímico, estimando los parámetros de turbidez, color, pH, y la demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO5). Todos los procedimientos se realizaron conforme métodos estandarizados establecidos por Rice, E. (2012). Adicionalmente, mediante el uso de un medidor multiparamétrico, fueron determinadas las variables de pH, conductividad eléctrica, salinidad práctica, salinidad NaCl, resistividad y sólidos disueltos totales.

Reacción de Fenton

Para la reacción de Fenton se empleó peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y sulfato de hierro ([FeSO]₄) como agente reductor. Este proceso se basa en que los compuestos orgánicos del agua residual, en presencia de estas especies químicas, experimentan una degradación a moléculas más simples. El proceso de oxidación es resultado en parte de la formación del radical libre de hidroxilo producido en la ruptura catalítica con el H₂O₂, por lo que teóricamente se establece que (Pawar, V., & Gawande, S. (2015):



El proceso fue realizado a partir de 100 ml de AGL, considerando las proporciones y condiciones establecidas por Hazal Sinem (2023). Para ello, inicialmente el pH fue ajustado a 3,0 unidades, empleando HCl 3 M. La relación entre el H₂O₂ con el [FeSO]₄ se estableció de manera que por 5 mL de H₂O₂ al 30% se adicionaran 0,1 g de [FeSO]₄ (Figura 1).

Figura 1. Condiciones iniciales de proceso químico Fenton.



Para las condiciones de estudio se estableció una temperatura de 50°C por 3 h. Una vez completado el tiempo de reacción, las muestras fueron mantenidas en reposo por 1 h, tiempo después del cual fue colectado el sobrenadante, para determinar los parámetros de DQO, turbidez y color, como descrito anteriormente. El porcentaje de remoción fue establecido mediante la siguiente fórmula: $[\% \text{ remoción} = (C_i - C_f / C_i) * 100$. Donde: C_i: Concentración inicial del parámetro; C_f: Concentración final.

Cálculo índice de química verde

Para evaluar el grado de acercamiento verde de la tecnología implementada, fue adaptada la metodología de métrica semicuantitativa de Estrella Verde (EV) establecida por Ribeiro, M. (2010), para la evaluación de la sostenibilidad ambiental de reacciones químicas en el contexto del tratamiento de AGL. El propósito de este método es ayudar a seleccionar las etapas más adecuadas para la implementación de la Química Verde (QV). Para el diseño de la EV se consideraron nueve principios de la QV. La métrica consistió en la evaluación de la sostenibilidad de las etapas y reacciones para cada principio mediante criterios predefinidos, seguido de la representación gráfica de los resultados en un gráfico de radar de Excel, donde una gráfica más completa se relaciona con un mayor grado de sostenibilidad ambiental.

Resultados

La composición del AGL depende de algunas características tales como: cantidad de personas que viven en la casa, diferentes niveles de vida social y cultural, etc. Dichas aguas contienen surfactantes, concentraciones altas de jabones, así como alta concentración en materia orgánica. La composición promedio de las aguas grises en la literatura son: pH = 6-9, turbidez 12-2131 NTU, conductividad 1.4- 703 $\mu\text{S/cm}$, sólidos suspendidos totales (SST) 11-2180 mg / L, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) 23-942 mg / L, demanda química de oxígeno (DQO) 55-2000 mg / L (Ghaidak & Yadav, 2013) (Li et al., 2009).

Características de la muestra colectada

En la Tabla 1 se pueden evidenciar los parámetros determinados en las AGL y del efluente obtenido después del proceso de oxidación de Fenton.

Tabla 1. Resultados obtenidos de la muestra de agua gris de lavado al ser tratada con proceso químico.

AGL		Efluente proceso Fenton
Turbidez (NTU)	663	47
Color (PCU)	2623	468
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	720,1	-
Salinidad práctica (ppt)	0,3839	-
Salinidad NaCl (ppt)	0,3602	-
Resistividad ($\text{K}\Omega - \text{cm}$)	1,446	-
Sólidos disueltos totales (mg/L)	337,4	-
pH	6,58	-
DQO (mg/L O ₂)	1493	122,7
DBO5 (mg/L O ₂)	390	-
Índice de biodegradabilidad	0,26	-

Con base a los parámetros fisicoquímicos de las AGL colectadas, se puede realizar un análisis la calidad del agua residual de lavado con el fin de compararlos con los límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas planteados en la Resolución 631 de 2015 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible:

Turbidez: Es una medida de la claridad visual en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Un valor de 663 NTU indica que la muestra tiene una alta concentración de partículas en suspensión, lo cual puede deberse a la presencia de sedimentos, fibras textiles, u otros materiales suspendidos.

Color: se mide en unidades de Color Platino-Cobalto (PCU) y puede ser indicativo de la presencia de compuestos orgánicos disueltos o suspendidos. Un valor de 2623 PCU sugiere que la muestra tiene un color muy oscuro o intenso, causado principalmente por la presencia de colorantes. El color puede variar dependiendo de varios factores, como los productos químicos utilizados en el detergente, los tintes presentes en la ropa, la suciedad y los residuos de la carga de lavado; el color gris puede significar la existencia de suciedad, restos de tejidos o partículas de polvo en el agua residual. Estos contaminantes pueden provenir de la ropa lavada y pueden estar compuestos por materiales orgánicos e inorgánicos.

Conductividad eléctrica: indica la capacidad del agua para conducir la electricidad, está se vuelve conductora solo a través de sustancias disueltas como cloruros, sulfatos y otros. La pureza de una masa de agua se puede determinar mediante una medición de conductividad, donde cuanto mayor es la conductividad, más sustancias se disuelven en el agua. (STS, 2020). Las aguas con mejor calidad presentan una conductividad de 50-500 $\mu\text{S/cm}$, pero incluso algunas pueden alcanzar valores entre 1000-1500 $\mu\text{S/cm}$.

Una conductividad de 720 $\mu\text{S/cm}$ indica la presencia de iones disueltos en el agua, lo cual puede ser causado por la presencia de sales, minerales u otros contaminantes disueltos en el agua, posiblemente debido a la presencia de sustancias químicas utilizadas en el proceso textil (colorantes) o en el proceso de lavado como el jabón. Se considera que este valor es alto dado que supera el rango mencionado en la literatura por Ghaidak & Yadav en 2013.

Salinidad práctica y salinidad NaCl: la salinidad práctica y la salinidad NaCl indican la concentración de sales presentes en el agua. La diferencia entre estos dos valores puede deberse a la presencia de sales distintas al cloruro de sodio (NaCl) en la muestra. La salinidad en el agua residual puede ser el resultado de los productos químicos utilizados en los procesos de teñido y lavado de textiles. En este caso, un valor de 0,3602 ppt sugiere que la mayoría de la sal presente en la muestra es cloruro de sodio y que únicamente 0,0237 ppt corresponden a otros iones.

Resistividad: la resistividad es el inverso de la conductividad y se utiliza para medir la resistencia del agua al flujo de corriente eléctrica, es decir, una resistividad más baja indica una mayor conductividad y, por lo tanto, una mayor presencia de sustancias disueltas en el agua. En este caso, el valor de resistividad de 1,446 K Ω - cm es relativamente bajo, lo cual es consistente con la alta conductividad eléctrica observada.

Sólidos disueltos totales (SDT): el valor de los sólidos disueltos totales de 337,4 mg/L indica la cantidad de sólidos disueltos en el agua residual. Estos sólidos pueden ser sales, minerales, productos químicos y otros contaminantes que provienen del proceso de lavado.

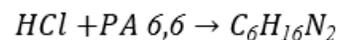
pH: es una medida de la acidez o alcalinidad del agua. Un valor de pH de 6,58 indica que la muestra es ligeramente ácida, como consecuencia de la presencia de ácidos orgánicos u otros compuestos ácidos en el agua residual. Dicho valor se encuentra dentro del rango permitido para el vertimiento de aguas residuales permitido en Colombia (6-9) que es el mismo mencionado por Ghaitidak & Yadav en 2013, lo que indica que el agua residual cumple con los estándares de calidad establecidos para su descarga al medio ambiente o para su tratamiento posterior.

Mantener el pH dentro del rango permitido es importante porque un pH extremadamente alto o bajo puede tener efectos adversos en el medio ambiente y en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Un pH fuera de los límites establecidos puede indicar la presencia de sustancias corrosivas, ácidos o bases fuertes que pueden dañar el medio ambiente, los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los cuerpos receptores.

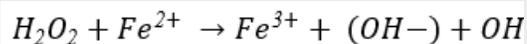
Considerando los valores de DQO y DBO5 obtenidos, se estimó el índice de biodegradabilidad, el cual fue de 0,26 (Tabla 1). Este valor es muy bajo y por tanto justifica la aplicación de alternativas de estabilización química para este tipo de efluentes.

Proceso de tratamiento por oxidación de Fenton

Para el procedimiento realizado por medio de reacción Fenton, inicialmente se hace uso del ácido clorhídrico (HCl) de manera que en términos generales se dé el rompimiento de compuestos orgánicos complejos como los son las poliamidas en formas más simples, para el caso experimental con el AGL se acidifica con de manera que polímeros con enlaces de tipo amida como el nylon 6,6 o el nylon 12, potencialmente presentes, se descompongan en fracciones de hexametildiamina para su posterior tratamiento con el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) (Achhammer et al., 1951), en términos generales se establece la reacción de HCl y nylon 6,6 (PA 6,6) se expresa que:



Posteriormente, se da un proceso de oxidación mencionado previamente en la metodología de manera que la presencia de H₂O₂ para los complejos más simples de las poliamidas en función de sales de hierro da como resultado el rompimiento de estas sustancias en moléculas más pequeñas de dióxido de carbono, se ha demostrado que parte de este proceso de oxidación se da en gran medida al radical de hidroxilo que produce la descomposición catalítica del H₂O₂ (Bai et al., 2019), puesto que este procedimiento se representa más claramente de la forma:



En torno a los análisis obtenidos para el tratamiento del AGL, por medio de la reacción Fenton se estimó inicialmente un valor de turbidez promedio de 663 NTU.

Luego del procedimiento con reacción Fenton aclarado se obtienen valores de turbidez promedio de 47 NTU, logrando una remoción de 92,9 % y de color de 935 PCU, para una remoción de 64,4 % (Figura 2).

Figura 2. Muestra de AGL colectada. (izquierda). Proceso de Fenton después de 1 hora (medio) y Fenton después de 2 horas (derecha).



La demanda Química de Oxígeno es un parámetro que indica la cantidad total de sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en una muestra de agua residual y que representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente dichos compuestos (Durán & Ramírez, 2008).

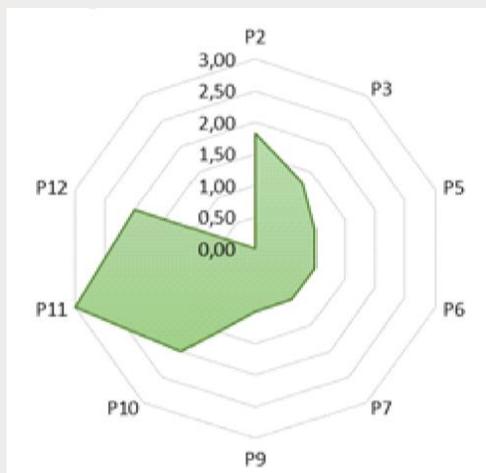
Una lectura de DQO de 1943 indica una alta carga de contaminantes orgánicos en la muestra de agua residual textil doméstica, por lo que es importante considerar que es una cifra alta que indica la presencia de una cantidad significativa de compuestos orgánicos que requieren de oxígeno para su descomposición, los cuales pueden provenir de los productos químicos utilizados en los procesos textiles (colorantes), surfactantes y otros aditivos; demostrando que la muestra de agua residual tiene un impacto significativo en el ambiente, pues el valor de DQO supera el límite máximo (200 mg/L O₂) permitido en Colombia para vertimiento de aguas residuales domésticas.

En este estudio, se obtuvo una remoción promedio de DQO de 91,7%, alcanzando límites aceptables de vertimiento (127,7 mg/l).

Índice de química verde

El proceso implementado tuvo un acercamiento verde de 21% (Figura 3). Este valor fue obtenido considerando las diferentes etapas del proceso, asociadas al uso de energía (uso del agitador orbital y termo reactor), temperatura empleada y reactivos químicos. Así mismo, fueron considerados los residuos o subproductos derivados que pueden llegar a ser tóxicos en el ambiente, así como el uso de sustancias auxiliares. El bajo acercamiento a lo largo de todo el tratamiento con Fenton se debe, adicionalmente, a que desde un principio se utilizaron varios reactivos como el ácido clorhídrico, el peróxido de hierro y el sulfato de hierro.

Figura 3. Estrella verde.



Conclusiones

La oxidación de Fenton removió el 91,7% en el DQO presente en el agua residual tratada, demostrando así que esta alternativa tiene una alta capacidad y efectividad de degradación carga orgánica de AGL. Además, constituye una tecnología relativamente económica y viable con respecto a otros procesos de remoción. No obstante, considerando cada una de las etapas involucradas, el proceso presentó un bajo acercamiento verde (21%), por lo cual es necesario desarrollar estudios para optimizar cada una de las fases a fin minimizar el impacto ambiental de la tecnología, sin comprometer su eficiencia.

Anexos:

En el siguiente enlace se encuentran los diagramas de flujo del proceso químico con sus respectivos principios para la determinación del índice de química verde.

https://miro.com/app/board/uXjVMG_1rYc=?share_link_id=246602496163

Nota: El presente estudio fue desarrollado como parte del proyecto de aula de la asignatura Química ambiental, de tercer semestre del programa de Ingeniería ambiental de la Universidad El Bosque.

Referencias

- Achhammer, B.G., Reinhart, F.W., Kline, G.M.(1951). Mechanism of the degradation of polyamides. J. Res. Natl. Bur. Stand. 46 (5). May 1951. Research Paper 2210
- Asghar, A., Abdul, A. & Ashri, W. (2014). Advanced oxidation process for in-situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for textile wastewater treatment.
- Bai, L., Fan, H., Guo, X., Yan, J. & Chen, Y. (2019). Treatment of microfiber alkali weight reduction wastewater with high salt concentration by Fenton oxidation and bacterial degradation. Water Environ. J. 34 (S1), 309-319.
- Espinoza, E. M. (2016). Caracterización de aguas residuales de lavandería y de la Planta de Poscosecha de Zamorano para el riego de áreas verdes.
- Figueroa, S., Vásquez, L. y Alvarez, A. (2008). Decolorizing textile wastewater with fenton's reagent electrogenerated with solar photovoltaic cell.
- Ghaitidak, D.M, & Yadav, K.D. (2013). Characteristics and treatment of greywater—a review. Environ Sci Pollut Res. (2013) May 2013, Volume 20, Issue 5, pp 2795-2809.
- Hallett, C. & Johnston, A. (2010). Telas para moda, guía de fibras naturales. Inglaterra Blume.
- Hazal, S., Sezgin, H., Yalcin, B. y Yalcin, I. (2023). Optimization of the textile wastewater pretreatment process in terms of organic removal and microplastic detection.
- Pawar, V., & Gawande, S. (2015). An overview of the Fenton process for industrial wastewater. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2, 127-136.



Revista de la Facultad de Ingeniería

Resolución N° 631 de 2015. Colombia. 18 de abril de 2015. <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resolucion-631-2015.pdf>

Ribeiro, M. G. T., Costa, D. A., & Machado, A. A. (2010). "Green Star": a holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3(2), 149-159.

Rice, E. W., Bridgewater, L., & American Public Health Association (Eds.). (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater (Vol. 10)*. Washington, DC: American public health association.

STS. (2020, julio 1). *Medición de conductividad en aguas naturales y otros líquidos*. Switzerland (ES).