

ARTÍCULO 5.3

EVALUACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DE LA VIABILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTES DE LA TECNOLOGÍA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE LA TURBIDEZ Y MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS GRISES

Introducción

Las aguas grises incluyen todas las fuentes de aguas residuales domésticas, tales como las descargas del baño, lavadora, lavavajilla y fregadero de la cocina, excepto los desechos humanos (orina y materia fecal) que se vierten en los inodoros (aguas negras). Los volúmenes típicos diarios de aguas grises domésticas oscilan entre 90 y 120 l por habitante (hasta el 80% de las aguas residuales) [1], por lo que su tratamiento y reutilización puede ser una solución sostenible al aumento generalizado de la demanda hídrica [2]. Además, las aguas grises contienen concentraciones más bajas de contaminantes en comparación con las aguas residuales, por lo que ha aumentado el interés por su reutilización.

La cantidad y las características de las aguas grises dependen en gran medida de la localización, de la fuente de agua gris, actividades y hábitos personales e incluso de la estructura de la población y los ingresos de los

hogares. Las aguas grises contienen detergentes, aceites y grasas y hasta otras 900 posibles sustancias, entre ellas hasta $7.0 \cdot 10^8$ CFU/100 cm³, lo que es determinante en términos de selección del tratamiento, reutilización y eliminación [5].

Todavía no existe una directriz internacional válida general para el tratamiento y la reutilización de aguas grises. La directriz de la OMS se refiere a la reutilización agrícola para riego únicamente [6]. Muchos países han desarrollado sus propias directrices que pueden variar considerablemente [7].



ingeniería de proyectos

El CIDTA de la Universidad de Salamanca ha llevado a cabo en los últimos meses para la empresa Indepro Consultores de Ingeniería una evaluación científico-técnica acerca de la viabilidad de la tecnología de electrocoagulación para la eliminación de la turbidez de aguas grises. El principal objetivo es la posible implementación en el prototipo DRAIN2WC de reutilización de aguas grises, desarrollado por dicha empresa y cofinanciado con fondos FEDER y del Instituto para la Competitividad Empresarial de Castilla y León. Tras llevar a cabo un análisis de sensibilidad de las principales variables y parámetros operacionales del proceso y el correspondiente balance de costes (0.3-0.4 €/m³ de agua tratada), se concluye que la electrocoagulación se muestra como un proceso eficiente para eliminar turbidez, color y materia orgánica de aguas grises (en 20 min eliminación de turbidez del 97% y de materia orgánica 85%).

Se ha investigado una amplia gama de métodos de tratamiento para diferentes tipos de aguas grises y la mayoría de los métodos publicados cumplen con la normativa de la OMS para el riego agrícola. Para cumplir con las más estrictas directrices de la UE, se requiere una desinfección final además del tratamiento fisicoquímico o biológico. Esta desinfección se puede lograr mediante filtración sobre arena o fibra seguida de radiación UV, dosificación de ozono o cloro o mediante una barrera física como membranas de microfiltración o ultrafiltración [2]. De las muchas publicaciones sobre la viabilidad técnica de diferentes sistemas de tratamiento, desde muy simples hasta muy sofisticados, sólo algunos sistemas se describieron en términos de inversión y amortización de una unidad de tratamiento in situ de aguas grises.

Debido a las altas fluctuaciones en la carga contaminante y el flujo de aguas grises, su tratamiento por métodos biológicos podría verse negativamente afectado por posibles cargas de choque que podrían reducir la actividad bacteriana significativamente [3]. Por lo tanto, se recomiendan alternativas físico-químicas para el tratamiento de aguas grises.

Los métodos electroquímicos para el tratamiento de aguas residuales, si bien suponen un coste energético, son seguros y respetuosos con el medio ambiente, así como eficaces en el tratamiento de compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre las tecnologías electroquímicas, la electrocoagulación/electroflotación (EC/EF) puede ser un sustituto eficaz de la coagulación y flotación convencionales, y ha demostrado tener éxito en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales [8].

El objetivo de este estudio es llevar a cabo un análisis preliminar de sensibilidad de los principales factores operacionales (electrodos, carga orgánica e inorgánica del agua, densidad de corriente, tiempo de electrólisis, espacio y disposición de los electrodos, velocidad de agitación, conductividad iónica, pH, T, formación de espumas y sedimentos) [9] de un proceso en batch a escala laboratorio de electrocoagulación (EC) con ánodos de aluminio combinado con electroflotación (EF) directa por desprendimiento de gas hidrógeno en cátodos de grafito, cobre y aluminio. Este proceso ha sido ensayado para la eliminación eficiente de la turbidez y la materia orgánica de aguas grises domésticas, de cara a su posible reutilización para uso humano sin contacto en una vivienda. Asimismo, en este trabajo se lleva a cabo una estimación de costes del agua gris regenerada.

Materiales y Métodos

Este estudio experimental se ha llevado a cabo en los laboratorios del CIDTA de la Universidad de Salamanca con lotes de 4.0 l de aguas grises reales en un reactor de tanque agitado (batch) (15 cm x 15 cm x 18 cm) al que se han incorporado 2 líneas de electrocoagulación monopolar en paralelo, cada línea constituida por 2 ánodos de aluminio y 2 cátodos de diferentes materiales (grafito, cobre o aluminio) y alimentada por corriente continua, a voltaje regulable a efecto de modular, así, la intensidad de corriente medida en un amperímetro que pasa por el circuito eléctrico (Figura 5.3_1).



Figura 5.3_1 Configuración monopolar de los electrodos y del reactor de EC/EF empleados en este trabajo

Las dimensiones de los electrodos han sido: Al (100 mm x 30 mm x 1 mm), Cu y C grafito (100 mm x 30 mm x 2 mm). La distancia de separación entre cada ánodo y cátodo paralelos fue 2 cm. La masa de los electrodos se midió en balanza analítica antes y después de cada experimento, tanto para comprobar la pérdida de masa del ánodo de aluminio como el pasivado. Se eligió una velocidad de agitación de las muestras de aguas grises de 100 rpm. El control de la temperatura se hizo con un equipo termostático Selecta Tectron.

En los experimentos se determinaron en las muestras de aguas los siguientes parámetros fisicoquímicos: conductividad iónica (Conductímetro Crison equipado con sonda polarizada), pH (pHmetro Crison 2002, equipado con sonda de control de temperatura CAT) y temperatura (termopar Crison 638 Pt). La intensidad de corriente en el circuito electroquímico se midió con un Amperímetro Ventus y cada 5 minutos del proceso de EC/EF se midió la turbidez (Turbidímetro HACH 2100 P), la materia orgánica (Método APHA-AWWA 5220 D) y el aluminio residual (Método APHA-AWWA 3500 D) en un espectrofotómetro HACH DR. También se midieron, a tiempo inicial y final, el color y los sólidos en suspensión totales (Método APHA-AWWA 2540 D) en rampa de filtración de los 4 litros de muestras de agua tratados.

PALABRAS CLAVE:

**AGUAS GRISES
REGENERACIÓN
ELECTROCOAGULACIÓN
ELECTROFLOCULACIÓN
TURBIDEZ
MATERIA ORGÁNICA
ANÁLISIS DE COSTES**



Figura 5.3_2 Evolución visual de la turbidez de las aguas grises y formación de una capa de espuma por electroflotación a lo largo del tiempo de EC/EF

Resultados preliminares

Análisis de sensibilidad de variables

Se han llevado a cabo diferentes series de experimentos a fin de delimitar las condiciones operacionales óptimas del proceso de EC/EF para conseguir los mejores rendimientos y cinéticas de eliminación de la turbidez, de la materia orgánica y de sólidos en suspensión (SS) de las aguas grises domésticas tratadas. En este sentido, se han estudiado las variables tiempo de electrolisis (15 min - 2h), densidad de corriente (entre 76 y 198 A/m²), magnitud de carga eléctrica (76-99 y 297 - 801 C/dm³), ratio S/V de 1.6 m²/m³ (relación entre el área de superficie activa de electrodo y el volumen), tasa de dosificación de carga eléctrica en las condiciones operativas óptimas 5.1 C/dm³/min, temperatura de las muestras de aguas grises (12.5°C, 37.5°C y 50.0°C), conductividad iónica de las muestras de aguas grises (230 - 530 μ S/cm), velocidad de agitación (100-200 rpm) y ánodo de Aluminio, cátodos de grafito, aluminio y cobre.

En condiciones óptimas de temperatura (37.5°C), la eliminación de la turbidez por EC (rendimiento $\geq 97\%$ en 15-25 min) y la correspondiente formación de espumas por EF se hizo muy evidente y significativa en todos los experimentos (Figura 5.3_2 y Figura 5.3_3 A), comprobándose, asimismo, que no había efecto Joule y sí un aumento del pH en las muestras de agua gris al aumentar el tiempo de tratamiento (Figura 5.3_3 D), a la vez que disminuía notablemente la materia orgánica (Figura 5.3_3 B) y el Al disuelto remanente de la oxidación del ánodo, al asociarse con las partículas coloidales para provocar su coagulación (Figura 5.3_3 C). El punto de ruptura en la evolución del aluminio disuelto sería indicativo de que la electrocoagulación ha finalizado. El incremento de pH durante el proceso de EC/EF depende del tipo de electrodo y del pH de la disolución inicial. Se sabe que la formación de gas H₂ en el cátodo y la acumulación de OH⁻ en el medio aumentan en el pH durante el proceso de EC/EF [10]. Los sólidos en suspensión (SS) generados al final de la EC con ánodo de Al son función del cátodo utilizado. La variación de color de las aguas grises con ánodo de Al y diferentes cátodos fue: Cu de 1760 mg/l Pt-Co iniciales a 175 mg/l Pt-Co finales (90% eliminación del color) frente a 1075 a 225 mg/l Pt-Co finales del cátodo de aluminio (79% eliminación) y los 1760 mg/l Pt-Co a 83 mg/l Pt-Co del cátodo de grafito (95% eliminación).

Juan Carlos Garcia Prieto
Investigador CIDTA-USAL
jc@usal.es

Manuel Garcia Roig
Catedrático USAL
mgr@usal.es*

Julian Navas Herranz
Director Técnico INDEPRO S.L.
jnavas@indepro.es

José Manuel Ayuso Olmos
Investigador INDEPRO S.L.
ayuso.jm@gmail.com

A modo de ejemplos ilustrativos, se presentan las cinéticas de eliminación de la turbidez y de la materia orgánica, así como la dinámica del Al disuelto y del pH, de las aguas grises tratadas en las condiciones operativas óptimas tras el correspondiente análisis de sensibilidad de las variables llevado a cabo (Figura 5.3_3).

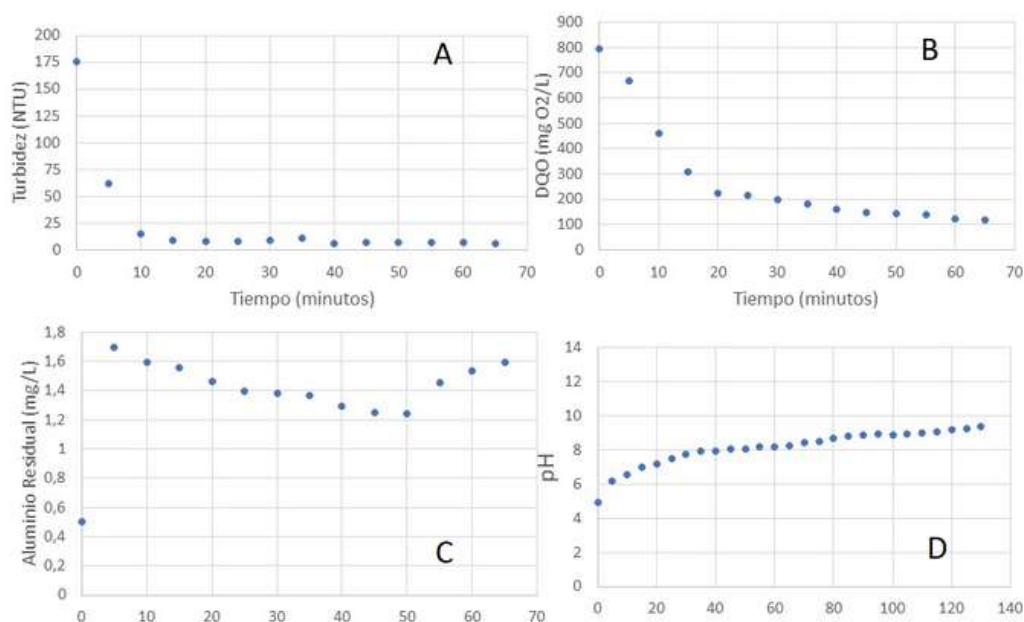


Figura 5.3_3 Cinéticas de eliminación de la turbidez (A) y de la DQO (B) y evolución del Al remanente (C) y del pH (D) por EC/EF de aguas grises con ánodo de aluminio y cátodo de cobre, 100 rpm, 37.5 °C, intensidad de corriente (360 – 290 mA) y conductividad iónica (385 à 250 μ S/cm)

Análisis de costes

Una evaluación económica básica, considerando los costes de los materiales de los electrodos de sacrificio (Aluminio) y la energía eléctrica consumida como principales factores, lleva a la siguiente ecuación:

$$\text{Costes operacionales} = a \text{ CElectrodo} + b \text{ CEnergía}$$

donde $C_{\text{Electrodo}}$ se expresa como el coste de kgAl perdido/m³ y $C_{\text{Energía}}$ como el coste de los kWh/m³ de agua tratada. Se introducen como parámetros a y b los costes en el mercado español antes del 1 Junio 2021 del Al $a=1.87 \text{ €/kg Al}$ y de la energía eléctrica $b=0.130 \text{ €/kWh}$, respectivamente. En cuanto al consumo de los ánodos de sacrificio (Al) en promedio por experimento con una muestra de agua gris de 4.0 litros, supone 0.4492 g Al, es decir 124.8 g Al/m³ lo que equivale a un coste de 0.233€/m³ de agua gris tratada. Conviene indicar que se puede utilizar Aluminio de residuos de chatarra o reciclado como ánodo de sacrificio, lo cual abarataría estos costes.

Para calcular el consumo de energía eléctrica por cada línea operativa se utiliza la siguiente ecuación: Consumo de energía (kWh/m³) = $2.77778 \cdot 10^{-7} V I t / \text{Volumen operativo}$, siendo V el potencial en voltios, I la intensidad de corriente en amperios, t tiempo en segundos, el volumen operativo en m³ y $2.77778 \cdot 10^{-7}$ el factor de conversión de J a kWh.

Considerando un tiempo óptimo de electrocoagulación de 20 min = 1200 s:

$$\text{Consumo de energía (kWh/m}^3\text{)} = 2.77778 \cdot 10^{-7} (12)(0.354)(1200) / 0.004 = 0.354 \text{ kWh/m}^3$$

Suponiendo una franja horaria nocturna (0-8 h), a 0.11€/kWh, el consumo eléctrico por línea operativa supondría un coste de 0.039 €/m³, dado que se ha trabajado con 2 líneas operativas de electrocoagulación, el coste sería de 0.078 €/m³. En franja horaria punta, a 0.22€/kWh, el consumo eléctrico supondría un coste de 0.158 €/m³.

Por ello, los costes operacionales globales, en condiciones óptimas de operación y según la franja horaria de tarifa eléctrica, serían:

$$\text{Franja horario nocturna: Costes operacionales} = a C_{\text{Electrodo}} + b C_{\text{Energía}} = 0.233 + 0.078 = 0.311 \text{ €/m}^3$$

$$\text{Franja horaria punta: Costes operacionales} = a C_{\text{Electrodo}} + b C_{\text{Energía}} = 0.233 + 0.158 = 0.391 \text{ €/m}^3$$

Tras este estudio experimental a escala laboratorio, se confirma que la EC/EF se muestra como una metodología eficiente para eliminar turbidez, materia orgánica y color de aguas grises.

Conclusiones

a) La turbidez de las aguas grises se eliminó desde valores de 160-170 NTU hasta valores de turbidez ≤ 5 NTU al cabo de 15 – 25 minutos de EC/EF, en condiciones experimentales óptimas (37.5 y 50 °C, 100 rpm).

b) La eliminación de materia orgánica en función del cátodo utilizado, y con ánodo de Aluminio, siguió la siguiente serie de rendimientos para los mismos tiempos de EC/EF (20-25 min): Cu (85.06 %) > Al (78.76 %) > C grafito (73.98 %).

c) Los SS generados al final de la EC/EF (20-25 min) utilizando ánodo de Al y diferentes cátodos fueron: cátodo de Al (699.33 mg/L) > cátodo de C grafito (544.45 mg/L) > cátodo de Cu (281.96 mg/L). d) Los costes operacionales entre 0.3 y 0.4 €/m³ agua.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea y a la Junta de Castilla y León, a través del Instituto para la Competitividad Empresarial de Castilla y León (ICE) la financiación a INDEPRO S.L. del proyecto DRAIN2WC, dispositivo sostenible de reutilización de aguas grises para utilización en inodoros, que ha dado origen a este trabajo.

Referencias

1. Li, F. y cols., 2009. Science of the Total Environment, 407, 3439-3449.
2. Jabornig, S., 2013. Urban Water Journal 1-9.
3. Pidou, M. y cols., 2008.. Chemosphere 71 (1), 147-155.
4. Cuba, M., 2020. Tesis de Master, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
5. Eriksson, E. y cols., 2002. Urban Water 4, 85 -104.
6. WHO, 2006. Geneva, Switzerland. World Health Organization.
7. Li, F. y cols., 2009. Science of the Total Environment 407, 3439- 3449.
8. Janpoor, F. y cols., 2011. J. Chem. Technol. Biotechnol. 86, 1113-1120.
9. Karichappan, T. y cols., 2014. J. Environmental Health Science & Engineering 12:29, 1-8.
10. Ghosh, D. y cols., 2008. J. Hazard. Materials 155, 135-143.