



Efectividad de los procesos Fenton y Fenton-like en el tratamiento de efluentes de queso

Effectiveness of Fenton and Fenton-like processes in the treatment of cheese effluents

Oré, Salvador¹ y Guzmán, Leonor²

¹Facultad de Ingeniería Química,
 Universidad Nacional del Centro del Perú,
 Ciudad Universitaria, Huancayo, Perú.

²Facultad de Zootecnia,
 Universidad Nacional del Centro del Perú,
 Ciudad Universitaria, Huancayo, Perú.

Resumen

Con frecuencia, los efluentes de queso se han definido como aguas residuales de alta concentración con valores máximos de Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los catalizadores a base de hierro se han discutido porque la idea principal de los procesos Fenton y Fenton-like se originó utilizando materiales que contienen hierro. Este es un metal que forma complejos estables con los productos de degradación. Bajo estas consideraciones se plantea como objetivo evaluar el proceso homogéneo Fenton y Fenton-like como alternativa para el tratamiento del suero de queso. De acuerdo al diseño experimental aplicando el método de Taguchi y resolviendo con el software estadístico Minitab 18, los factores principales de relación de peróxido de hidrógeno/ion ferroso y pH son significativos para el proceso de Fenton. Para el proceso de Fenton-like los factores principales significativos son temperatura, relación de peróxido de hidrógeno/ion férrico y tiempo. Las interacciones no son significativas para un nivel de significancia de 0.05. Los factores principales están fuera de los límites de decisión, de acuerdo al análisis de medias mediante efectos de la interacción para el proceso Fenton y Fenton-like y estas condiciones indican que la diferencia entre cada una de estas medias y la media general es estadísticamente significativa. La ecuación de regresión en unidades no codificadas para el proceso Fenton fue: $Y_{DQO}^{2+} = (88.83 - 0.045 \times \text{Temperatura} - 1.928H_2O_2) / (Fe^{2+} - 4.66 \times pH - 0.124 \times \text{Tiempo})$ y para el proceso Fenton-like fue: $Y_{DQO}^{3+} = (-6.59 + 1.196 \times \text{Temperatura} + 0.975H_2O_2) / (Fe^{3+} + 1.02 \times pH + 0.215 \times \text{Tiempo})$
Palabras clave: proceso Fenton, Fenton-like, tratamiento suero de queso.

Abstract

Cheese effluents have often been defined as high concentration wastewaters with maximum Chemical Oxygen Demand (COD) values. Iron-based catalysts have been discussed because the main idea of the Fenton and Fenton-like processes originated using iron-containing materials. Iron is a metal that forms stable complexes with the degradation products. Under these considerations, the objective is to evaluate the homogeneous Fenton and Fenton-like process as an alternative for the treatment of cheese whey. According to the experimental design applying Taguchi's method and solving with Minitab 18 statistical software, the main factors of hydrogen peroxide/ferrous ion ratio and pH are significant for the Fenton process. For the Fenton-like process the significant main factors are temperature, hydrogen peroxide/ferrous ion ratio and time. The interactions are not significant at the 0.05 significance level. The main factors are outside the decision limits, according to the analysis of means by interaction effects for the Fenton and Fenton-like process and these conditions indicate that the difference between each of these means and the overall mean is statistically significant. The regression equation in uncoded units for the Fenton process was: $Y_{DQO}^{2+} = (88.83 - 0.045 \times \text{Temperatura} - 1.928H_2O_2) / (Fe^{2+} - 4.66 \times pH - 0.124 \times \text{Tiempo})$ and for the Fenton-like process was: $Y_{DQO}^{3+} = (-6.59 + 1.196 \times \text{Temperatura} + 0.975H_2O_2) / (Fe^{3+} + 1.02 \times pH + 0.215 \times \text{Tiempo})$.

Keywords: Fenton process, Fenton-like, cheese whey treatment.

Cómo referenciar:

Oré, S. y Guzmán, L. (2022). Efectividad de los procesos Fenton y Fenton-like en el tratamiento de efluentes de queso. *Prospectiva Universitaria*, 19(01), 123–130.

1 Introducción

La fabricación de lácteos en el Perú está regulada por el Reglamento de la leche y productos lácteos (MIDAGRI, 2021; MINAGRI, 2017) y constituyen al igual que la producción internacional, una fuente importante de aguas residuales de alimentos que se han asociado cada vez más al rápido consumo de oxígeno (Salas-Vargas et al., 2021), fenómenos de eutrofización (Berton et al., 2021), flotación de grasas, formación de espumas, salinización, acidificación, liberación de olores, presencia de elementos biogénicos, contaminación orgánica e inorgánica (Guerrero-Navarro et al., 2020) cuando se descargan incontrolablemente en el ambiente.

Este problema se presenta en las zonas urbanas del Perú, ya que, solo aproximadamente el 48% de las aguas residuales reciben tratamiento y lo restante es vertido al mar, ríos o lagos. La situación es más crítica en las zonas rurales, donde el porcentaje de efluentes tratados alcanza valores aún menores. Entre las fuentes de contaminación del agua se encuentran algunos efluentes agroindustriales como los de la industria láctea. Esta industria genera efluentes con características muy variadas, que dependen del tipo de producto procesado (leche, yogurt, queso, etc.), del método de operación, entre otros factores.

Un rango que con frecuencia se encuentra en la literatura para la concentración de DQO en estas aguas residuales es de 1 a 9 g/L, lo que se debe principalmente a la presencia de suero de queso. El suero contiene entre 60 y 80 g DQO/L y no solo es importante como fuente contaminante por esta característica sino también por el volumen generado, que es alrededor de un 80 a 90% del volumen de la leche procesada.

La aplicación de procesos de oxidación avanzada (AOP) después de los procesos químicos y/o biológicos de acuerdo a (Kaur, 2021) puede constituir una alternativa viable y prometedora para eliminar esta materia orgánica recalcitrante, principalmente, debido a la formación de radicales hidroxilos ($\text{HO}\cdot$)

El proceso Fenton (Ziembowicz & Kida, 2022), definido como una mezcla de hierro ferroso (catalizador) y peróxido de hidrógeno (agente oxidante) es una tecnología eficaz que depende de varias variables operativas, a saber, complejidad de la matriz, carga y tipo de materia orgánica, temperatura, concentración de $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, concentración de H_2O_2 , pH inicial y tiempo de reacción.

Tabla 1
Estructura de especies reactivas de oxígeno

Compuesto	Especie	Configuración electrónica	$E^\circ(V)$	Periodo
Oxígeno	O_2	$\ddot{\text{O}} :: \ddot{\text{O}}$	1.23	$10^2 - 10^6$
Radical hidroxilo	$\text{HO}\cdot$	$\cdot\text{O} : \text{H}$	2.8	$< 10^{-9}$
Ion hidroxilo	OH^-	$:\text{O} : \text{H}$	-	$1 - 10^6$
Agua	H_2O	$\text{H} : \text{O} : \text{H}$	0.81	∞

Nota. Especies reactivas de oxígeno (ROS), iones hidroxilo y agua. E° energía de oxidación en voltios. Tomado de Yu y Kuzyakov (2021)

En la Tabla 1, el radical hidroxilo ($\text{HO}\cdot$), producido por procesos abióticos, es uno de los oxidantes más potentes del medio ambiente ($E^\circ = 2.8 \text{ V}$) y desempeña un papel esencial en la oxidación del carbono orgánico en la atmósfera, aguas superficiales, espacio interestelar, etc.

La oxidación de Fenton es una cadena compleja de reacciones del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con iones $\text{Fe}(\text{II})$ en solución ácida que genera predominantemente radicales $\text{HO}\cdot$ altamente reactivos.

Este proceso se basa en el trabajo pionero de Fenton, que utilizó una mezcla acuosa de H_2O_2 y sal de $\text{Fe}(\text{II})$ (es decir, el reactivo de Fenton) para oxidar el ácido tartárico. Más tarde, 2022 propusieron un mecanismo radical para este proceso y sugirieron que los radicales $\text{HO}\cdot$ son los oxidantes reales.

Las principales fuentes de $\text{HO}\cdot$ en fase acuosa se producen por irradiación solar sobre iones. En las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios altamente innovadores sobre las reacciones de Fenton en la atmósfera y los ambientes acuáticos, y se ha revisado una comprensión integral de las fuentes y sumideros de los radicales $\text{HO}\cdot$, incluidas sus implicaciones en las aguas naturales y en la atmósfera.

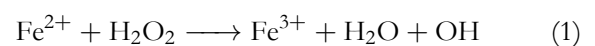
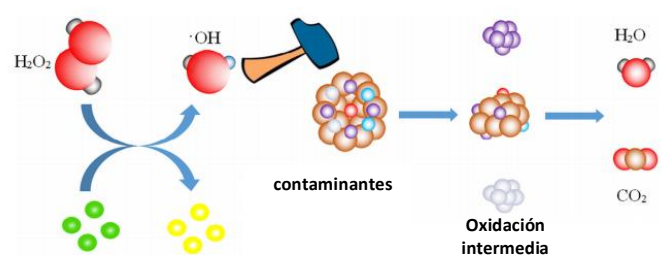


Figura 1
Representación gráfica del comportamiento Fenton homogéneo



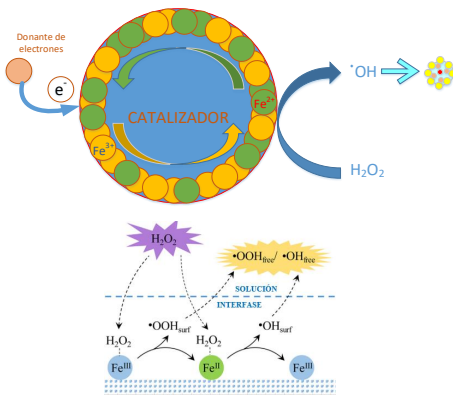
Nota. Tomado de Zhang, Dong, Zhao, Wang, y Meng (2019)

El proceso de Fenton heterogéneo es completamente diferente en comparación con el proceso de Fenton homogéneo porque la adsorción es la principal responsable de determinar la eficiencia del proceso.

Hay tres pasos involucrados en el proceso de Fenton heterogéneo: adsorción de orgánicos sobre la superficie del catalizador, generación in situ y ataque de radicales $\text{OH}\cdot$ sobre los orgánicos y finalmente desorción de productos de oxidación de la superficie del catalizador (figura 2). Las ecuaciones (2)-(5) sugieren claramente que la velocidad de adsorción depende predominantemente de la capacidad de adsorción de la monocapa del catalizador sólido

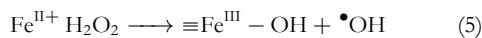
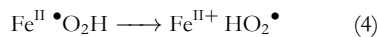
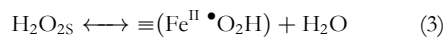
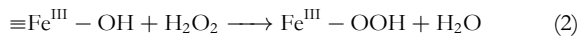
Figura 2

Proceso Fenton-Like heterogéneo



Nota. Tomado de (Wang y Tang, 2021)

El mecanismo de la reacción catalítica heterogénea Fenton-Like propuesta por (Thomas, Dionysiou, y Pillai, 2020) se expresa en el conjunto de las siguientes reacciones:



Ante el problema que se presenta y con los antecedentes de la literatura revisada, se propuso como el objetivo general de la investigación, evaluar el proceso homogéneo Fenton y Fenton-like en el tratamiento del suero de queso y como objetivos específicos determinar la demanda química de oxígeno, en el proceso homogéneo Fenton utilizando Fe^{+2} como catalizador en un reactor batch; también determinar la demanda química de oxígeno, en el proceso homogéneo Fenton-like utilizando Fe^{+3} como catalizador en un reactor batch. Evaluar el comportamiento del proceso homogéneo Fenton y el proceso heterogéneo Fenton-like

2 Materiales y Métodos

2.1 Procedimiento

Las muestras del lactosuero fueron colectadas, etiquetadas y transportadas al laboratorio de microbiología de la UNCP con refrigerante y se almacenaron a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ hasta el momento de su análisis fisicoquímico. Los análisis fisicoquímicos de la muestra de lactosuero se evidencian en la Tabla N° 3

El lactosuero fue pretratado previamente, mediante el método de precipitación ácido-térmico (Canchucaja, 2018), obteniéndose un suero secundario (Mazorra-Manzano et al., 2019) de 30343 mg DQO/L, constituyendo este suero el punto de partida para el tratamiento mediante el método Fenton y el método Fenton-Like.

En el primer paso del proceso de oxidación de Fenton, el pH de las aguas residuales lácteas se ajustó al valor deseado mediante la adición de H_2SO_4 6 N o NaOH 6 N. La cantidad necesaria de sulfatos se complementó con la solución madre y luego se agregó el volumen deseado de soluciones de H_2O_2 para iniciar la reacción de Fenton homogéneo y Fenton-like.

Después de este paso, se usó un aparato de prueba de jarras para una mezcla rápida a 200 rpm durante 5 min, y luego las muestras se agitaron suavemente a 20 rpm durante el tiempo de reacción deseado. Para mejorar las tasas de sedimentación del lodo, el pH se ajustó a 7,0 y mediante la adición de una solución de NaOH 6 N, lo que condujo a la precipitación de iones Fe^{2+} y Fe^{3+} residuales.

Luego, las muestras se asentaron durante 60 min en una columna de sedimentación graduada, se recogieron aproximadamente 200 ml de sobrenadante y el pH de las muestras de sobrenadante se ajustó a 10 y se mezcló a $70\text{ }^\circ\text{C}$ durante 10 min para eliminar el H_2O_2 residual y evitar cualquier interferencia durante las mediciones de la DQO. Las muestras finales de DQO sobrenadante se analizaron utilizando solo productos químicos de grado analítico.

Para el proceso de oxidación de Fenton y Fenton-like, se usaron una solución de H_2O_2 al 30 % con una densidad de 1,13 kg/L y solución madre de Fe^{2+} y Fe^{3+} disolviendo $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ en agua pura. Se utilizaron 500 mL de agua residual para cada ensayo experimental de acuerdo al diseño experimental por el modelo de Taguchi, como se observa en la Tabla 2

Tabla 2. Factores de control para la evaluación del proceso Fenton y Fenton/like.

Tabla 2

Factores de Control para la Evaluación del Proceso Fenton y Fenton/like

Factor de Control	Nivel 1	Nivel 2
Temperatura (°C)	20	40
H_2O_2/Fe^{+N}	5	15
pH	2	4
Tiempo (min)	20	40

2.2 Muestreo

El muestreo empleado fue no probabilístico por conveniencia, en el cual se consideró tomar las muestras accesibles que acepten ser incluidas, en el presente estudio. Se utilizó las aguas residuales de suero de queso procedente de la producción de queso dulce, queso elaborado con leche de ganado vacuno, como resultado de las prácticas experimentales de la obtención de queso en el Laboratorio de Tecnología de lácteos de la Facultad de Zootecnia de la UNCP en la Estación Experimental “El Mantaro”.

2.3 Mediciones

La Demanda Química de Oxígeno se determinó por el método colorimétrico de dicromato, tomando en consideración el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005), teniendo como resultado el valor de 95560 mg/L para la DQO. Para la determinación de las otras propiedades fisicoquímicas del suero que se especifican en la tabla 3, se utilizó el analizador de leche modelo de laboratorio Lactoescan MCCW-V1.

2.4 Análisis

El análisis del estudio se realizó con el método de Taguchi (Hoseinpour-Lonbar et al., 2020; Kumar et al., 2020; Taiwo et al., 2020), que constituye el diseño experimental ortogonal cuyos factores de control se establecen en la Tabla 2, donde la relación peróxido de hidrógeno/ion hierro (H_2O_2/Fe^{+N}) es de acuerdo al sulfato ferroso para el proceso Fenton y sulfato férrico para el proceso Fenton-like. El valor de N en la tabla 2, corresponde al ion hierro(II) o hierro(III) para el proceso Fenton o Fenton-like respectivamente. Los resultados del diseño experimental, de acuerdo al método de Taguchi, se determinaron utilizando el software estadístico Minitab 18, tomando en consideración los fundamentos de Wahyudin et al. (2017).

3 Resultados

Tabla 3

Características Físicas y Químicas del Suero de Queso

Característica	Rango de valor
pH	6.3
Lactosa	55 g/L
Proteínas	6.5 g/L
Grasas	4.3 g/L
Sales minerales	0.41 %
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	95.56 g/L
Sólidos Totales	69 g/L

El alto valor de materia orgánica de las aguas residuales del suero de queso es causado por la lactosa (0.18 - 45 g L⁻¹), la proteína (1.8 - 34 g L⁻¹) y la grasa (0.08 - 6 g L⁻¹), la caracterización de las aguas residuales del suero de queso difiere considerablemente de un lugar a otro, dependen de los productos finales, tipo de sistema y métodos de operación, manejo de aguas residuales, clima y proceso de lavado utilizado en la fábrica de lácteos. El tipo de leche utilizado en la producción láctea también asume un papel principal en el nivel de contaminación de las aguas residuales. El contenido nutricional de la leche es característico y específico de cada especie.

En la tabla 4 se muestra los porcentajes de eficiencia de la remoción de la DQO, realizados mediante los procesos Fenton (Y_{DQO}^{2+}) y Fenton-Like (Y_{DQO}^{3+}) respectivamente. Los porcentajes de eficiencia de la remoción de la DQO se calcularon mediante la Ecuación (6)

$$Y_{DQO} = \frac{DQO^0 - DQO^t}{DQO^0} \times 100 \quad (6)$$

Donde Y_{DQO} es porcentaje de eficiencia de la remoción de DQO, DQO^0 es la Demanda Química de Oxígeno en el tiempo cero y DQO^t es la Demanda Química de Oxígeno en el tiempo t.

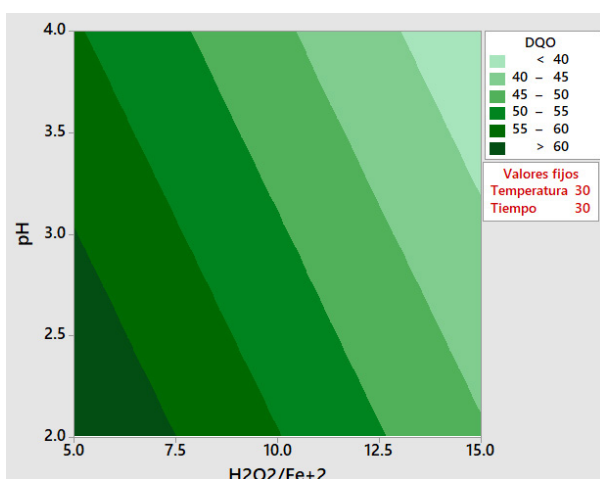
Tabla 4
Porcentaje de Eficiencia de la Remoción de DQO para el Proceso Fenton y Fenton-Like

Proceso Fenton y Fenton-Like	pH	Tiem. ^b	Y_{DQO}^{2+} ^c	Y_{DQO}^{3+} ^c
Proceso a 20 °C				
5	2	20	62.38	28.47
5	2	40	68.15	32.92
15	4	20	38.91	38.67
15	4	40	34.45	46.31
Proceso a 20 °C				
5	4	20	57.66	55.86
5	4	40	52.47	57.45
15	2	20	48.13	62.61
15	2	40	42.07	66.13

Nota. DQO: Demanda Química de Oxígeno.
^aValores en minutos, ^bvalores en porcentaje

El efecto de los factores (variables), sobre los procesos Fenton y Fenton-Like se analizaron con el diagrama de Pareto para un nivel de significancia de 0.05. En la figura 3 se muestra la mayor significancia de los factores relación de peróxido de hidrógeno/ion ferroso y pH, una menor significancia del tiempo y temperatura para el proceso Fenton. Asimismo se muestra una mayor significancia de los factores temperatura, relación de peróxido de hidrógeno/ion férrico y tiempo y una menor significancia para el pH para el proceso Fenton-Like.

Figura 4
Gráfica de Contorno DQO vs pH para el Proceso Fenton



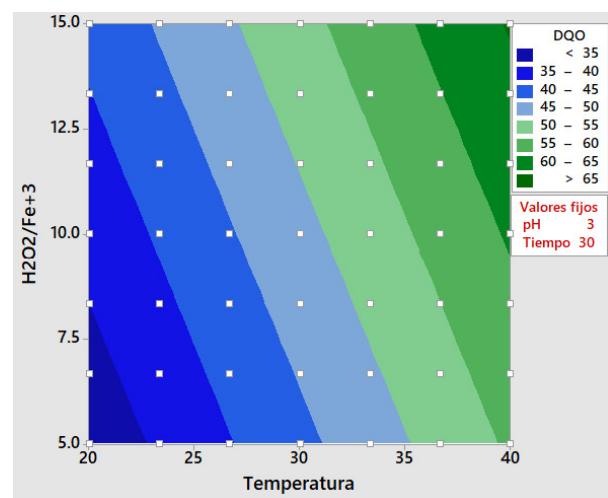
Nota.

Considerando los factores para cada uno de los procesos de Fenton y Fenton-Like, se ha analizado las gráficas de contorno. En la figura 4 se muestra el porcentaje de eficiencia de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno indi-

cada como DQO, con respecto a los factores relación de peróxido de hidrógeno/ion ferroso y el pH, manteniendo constantes los factores temperatura a 30 °C y un tiempo de 30 minutos. El mayor porcentaje de remoción superior al 60% se encuentra comprendida en el área de 5 a 7,5 de relación de peróxido de hidrógeno/ion ferroso y de 2 a 3 de pH, para el proceso Fenton.

En la figura 5 se muestra el porcentaje de eficiencia de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno indicada como DQO, con respecto a los factores temperatura y relación de peróxido de hidrógeno/ion férrico, manteniendo constantes los factores pH en 3 y un tiempo de 30 minutos. El mayor porcentaje de remoción superior al 65 % se encuentra comprendida en el área de 35 °C a 40 °C de temperatura y de relación de peróxido de hidrógeno/ion férrico y de 12,5 a 15, para el proceso Fenton-Like.

Figura 5
Gráfica de Contorno DQO vs Temperatura para el Proceso Fenton-Like

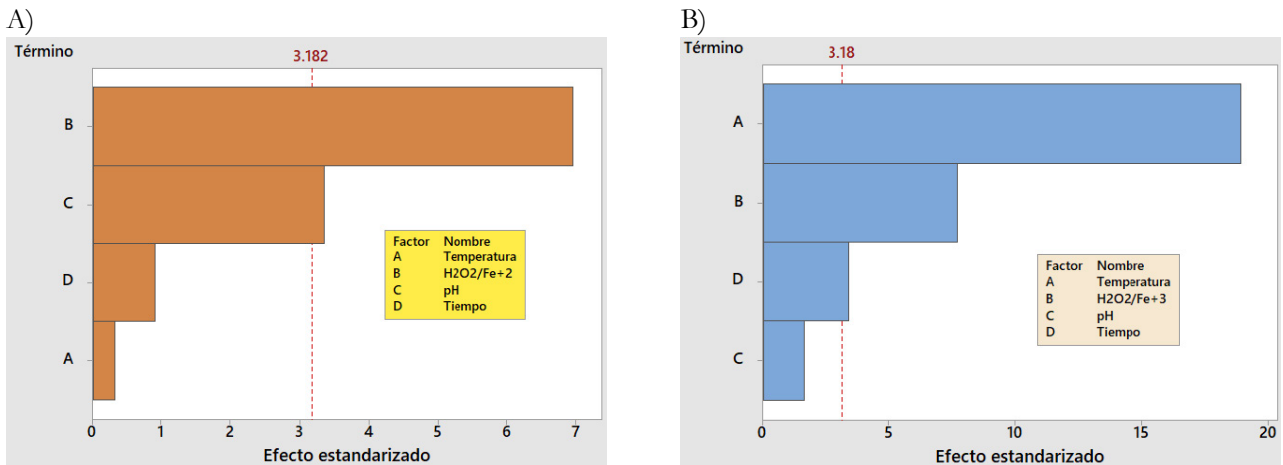


Nota.

La figura 6 muestra los diseños de superficie de respuesta; el panel A corresponde al proceso Fenton manteniendo constante la temperatura y el tiempo, el panel B corresponde al proceso Fenton-like manteniendo constante el pH y el tiempo, en ambos casos los resultados indican que no son significativas las relaciones cuadráticas, por lo que no se generan curvas con la aplicación de ninguna de las variables.

Figura 3

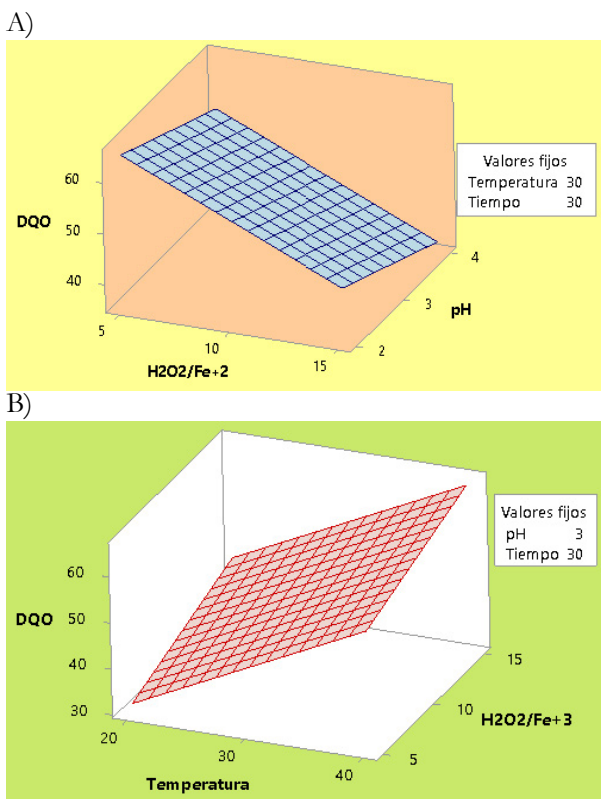
Diagrama de Pareto para Catalizador Ferroso en Proceso Fenton y Fenton-Like



Nota. A: proceso Fenton, B: proceso Fenton-Like

Figura 6

Gráfica de Superficies por Procesos



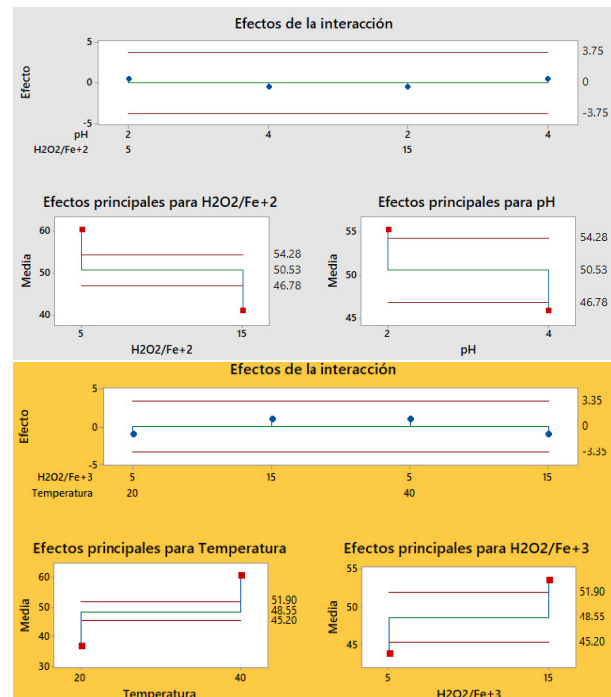
Nota. Panel A: gráfica de superficie de DQO vs H₂O₂/Fe²⁺, pH para el proceso Fenton. Panel B: gráfica de superficie de DQO vs H₂O₂/Fe³⁺, Temperatura para el proceso Fenton-Like.

La Figura 7 muestra que los efectos principales de cada proceso de Fenton y Fenton-Like se encuentran dentro de los límites de decisión, lo que indica que los efectos de interacción no son estadísticamente significativos. Del mis-

mo modo, las gráficas inferiores indican las medias, donde el efecto principal es la diferencia entre la media y la línea central, para el proceso Fenton y Fenton-Like, donde se observa que los factores principales están fuera de los límites de decisión, esta condición indica que la diferencia entre cada una de estas medias y la media general es estadísticamente significativa.

Figura 7

Análisis de Medias por Procesos



Nota.

3.1 Comparación de la eficiencia de ambos procesos

La eficiencia de la remoción de DQO que se tuvo con el proceso Fenton fue de 68.15% a una temperatura de 20°C, con una relación de H_2O_2/Fe^{2+} de 5, un pH igual a 2, tiempo de 40 minutos. La eficiencia de la remoción de DQO que se tuvo con el proceso Fenton-Like fue de 66.13% a una temperatura de 40°C, a una relación de H_2O_2/Fe^{3+} de 15, un pH igual a 2, tiempo de 40 minutos

Para el proceso de Fenton, los factores principales significativos son la relación de peróxido de hidrógeno/ion ferroso y pH. Para el proceso de Fenton-Like los factores principales significativos son, relación de peróxido de hidrógeno/ion férrico y tiempo, y el factor temperatura.

La ecuación de regresión en unidades no codificadas para el proceso Fenton fue: $Y_{DQO}^{2+} = (88.83 - 0.045 \times \text{Temperatura} - 1.928H_2O_2)/(Fe^{2+} - 4.66 \times pH - 0.124 \times \text{Tiempo})$; para el proceso Fenton-Like fue: $Y_{DQO}^{3+} = (-6.59 + 1.196 \times \text{Temperatura} + 0.975H_2O_2)/(Fe^{3+} + 1.02 \times pH + 0.215 \times \text{Tiempo})$.

4 Discusiones

La eficiencia de la remoción de DQO que se tuvo con el proceso Fenton fue de 68.15% a una temperatura de 20°C, una relación de H_2O_2/Fe^{2+} de 5, pH igual a 2 y un tiempo de 40 minutos, resultados que difieren al de [Canchucaja \(2018\)](#), quien con el proceso Fenton determinó la eficiencia de la remoción de DQO de 95.61% a la temperatura de 20°C, utilizando una relación de H_2O_2/Fe^{2+} de 1.0, un pH de 3.4 y un tiempo de 40 minutos.

2018 respecto a la interacción del H_2O_2/Fe^{2+} con el pH en el proceso Fenton, utilizando la metodología Taguchi, manifiesta que existe una asociación estadísticamente significativa con el porcentaje de eficiencia de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno, con un valor de $p = 0.030$ menor al valor de significancia (α) de 0.05, coincidiendo con el presente trabajo, en el que se determinó que la interacción del H_2O_2/Fe^{2+} con el pH, contribuye significativamente a la remoción de la Demanda Química de Oxígeno a un nivel de (α) 0.05 de acuerdo a lo establecido con el diagrama de Pareto empleado con la metodología Taguchi.

Así mismo [Liviac y Vela \(2016\)](#) manifiestan que el

pH afecta principalmente la velocidad de reacción del H_2O_2/Fe^{2+} en el proceso Fenton. Según [Meyerstein \(2021\)](#), en un análisis termodinámico de las reacciones de Fenton y Fenton-like, el autor menciona que las reacciones en ambos procesos, forman un complejo transitorio que depende del pH. Así mismo [Hussain et al. \(2021\)](#); [Ziembowicz y Kida \(2022\)](#), definen el proceso Fenton y Fenton like como una mezcla de hierro ferroso o hierro férrico (catalizadores) respectivamente y el peróxido de hidrógeno (agente oxidante), y manifiestan que puede lograrse una alta remoción de materia orgánica en la etapa de oxidación (96-100%) y que el proceso depende de varias variables operativas, carga y tipo de materia orgánica, temperatura, concentración de Fe^{2+}/Fe^{3+} , concentración de H_2O_2 , pH inicial y tiempo de reacción, por lo que los resultados obtenidos en esta investigación en los procesos Fenton y Fenton Like difieren en la remoción de materia orgánica, precisamente por el tipo de materia orgánica de las muestras empleadas del suero del queso que se utilizó, suero originado de la leche de ganado vacuno empleado en la elaboración de quesos, entonces las variables operativas del proceso tuvieron que adecuarse a estas características.

5 Conclusiones

El mayor porcentaje de eficiencia de la remoción de DQO se obtiene mediante el proceso Fenton correspondiente a un 68.15 % a una temperatura de 20 °C una relación de H_2O_2/Fe^{2+} de 5, un pH igual a 2 y un tiempo de 40 minutos.

El porcentaje de eficiencia de la remoción de DQO con el proceso Fenton-like es, 66.13% a una temperatura de 40°C, a una relación de H_2O_2/Fe^{3+} 15, un pH igual a 2, tiempo de 40 minutos, menor que el obtenido con el Proceso Fenton, pero tiene la ventaja que tiene una menor cantidad de generación de lodos, por lo que se propone una investigación para evaluar este factor.

Agradecimientos

A los diferentes Laboratorios de la Universidad Nacional del Centro del Perú, por haber apoyado en la ejecución de la presente investigación.

Referencias

- APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (21 ed.). American Public Health Association.
- Berton, M., Bovolenta, S., Corazzin, M., Gallo, L., Pinterits, S., Ramanzin, M., Ressi, W., Spigarelli, C., Zuliani, A., & Sturaro, E. (2021). Environmental impacts of milk production and processing in the Eastern Alps: A “cradle-to-dairy gate” LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127056>

- Canchucaya, R. G. (2018). *Aplicación del reactivo fenton al lactosuero pretratado por precipitación ácido-térmico* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional del Centro del Perú. Consultado el 6 de febrero de 2024, desde <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5100>
Accepted: 2019-07-09T20:47:46Z.
- Guerrero-Navarro, A. E., Ríos-Castillo, A. G., Ripolles-Avila, C., Felipe, X., & Rodríguez-Jerez, J. J. (2020). Microscopic analysis and microstructural characterization of the organic and inorganic components of dairy fouling during the cleaning process. *Journal of Dairy Science*, 103(3), 2117-2127. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16957>
- Hoseinpour-Lonbar, M., Alavi, M. Z., & Palassi, M. (2020). Selection of asphalt mix with optimal fracture properties at intermediate temperature using Taguchi method for design of experiment. *Construction and Building Materials*, 262, 120601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120601>
- Hussain, S., Aneggi, E., & Goi, D. (2021). Catalytic activity of metals in heterogeneous Fenton-like oxidation of wastewater contaminants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2405-2424. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01185-z>
- Kaur, N. (2021). Different treatment techniques of dairy wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100640>
- Kumar, T. B., Panda, A., Kumar Sharma, G., Johar, A. K., Kar, S. K., & Boolchandani, D. (2020). Taguchi DoE and ANOVA: A systematic perspective for performance optimization of cross-coupled channel length modulation OTA. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 116, 153070. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153070>
- Liviác, D., & Vela, R. (2016). Tratamiento Anaerobio Del Suero de Queso En Reactores Discontinuos y Uasb a Escala Laboratorio. *Anales Científicos*, 77(2), 147. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i2.484>
- Mazorra-Manzano, M. Á., Ramírez-Montejo, H., Lugo-Sánchez, M. E., González-Córdova, A. F., & Vallejo-Córdoba, B. (2019). Caracterización Del Lactosuero y Requesón Proveniente Del Proceso de Elaboración de Queso Cocido (Asadero) Región Sonora. *Nova Scientia*, 11(23), 220-233. <https://doi.org/10.21640/ns.v11i23.2072>
- Meyerstein, D. (2021). Re-examining Fenton and Fenton-like reactions. *Nature Reviews Chemistry*, 5(9), 595-597. <https://doi.org/10.1038/s41570-021-00310-4>
- MIDAGRI. (2021). Resolución Ministerial N.º 0220-2021-MIDAGRI. plan de acción de intervención sectorial para el fortalecimiento de la cadena productiva de leche y derivados lácteos vinculada a la pequeña ganadería familiar 2021-2024. Consultado el 6 de febrero de 2024, desde <https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/2078313-0220-2021-midagri>
- MINAGRI. (2017). Decreto Supremo N°007-2017-MINAGRI. Reglamento de La Leche y Productos Lácteos. Consultado el 6 de febrero de 2024, desde <https://www.midagri.gob.pe/portal/decreto-supremo/ds-2017/19598-decreto-supremo-n-007-2017-minagri>
- Salas-Vargas, C., Brunett-Pérez, L., Espinosa-Ortiz, V. E., & Martínez-García, C. G. (2021). Environmental impact of Oaxaca cheese production and wastewater from artisanal dairies under two scenarios in Aculco, State of Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127586>
- Taiwo, A. E., Madzimbamuto, T. N., & Ojumu, T. V. (2020). Optimization of process variables for acetoin production in a bioreactor using Taguchi orthogonal array design. *Heliyon*, 6(10), e05103. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05103>
- Wahyudin, Kharisma, A., Murphiyanto, R. D. J., Perdana, M. K., & Kasih, T. P. (2017). Application of Taguchi Method and ANOVA in the Optimization of Dyeing Process on Cotton Knit Fabric to Reduce Re-Dyeing Process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 109, 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/109/1/012023>
- Ziembowicz, S., & Kida, M. (2022). Limitations and future directions of application of the Fenton-like process in micropollutants degradation in water and wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 296, 134041. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134041>