

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS: INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELECTRO-FENTON PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MATADERO MUNICIPAL,
AYAVIRI – PUNO**

PRESENTADA POR:

ROLANDO RODY JARA HUARANCCA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA QUÍMICA
MENCIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**

PUNO, PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS: INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELECTRO-FENTON PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MATADERO MUNICIPAL,
AYAVIRI – PUNO**



PRESENTADA POR:

ROLANDO RODY JARA HUARANCCA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO:

**MAGISTER SCIENTIAE EN INGENIERÍA QUÍMICA
MENCIÓN EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y AMBIENTAL**

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

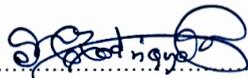
PRESIDENTE


.....
Dr. TEÓFILO DONAIRES FLORES

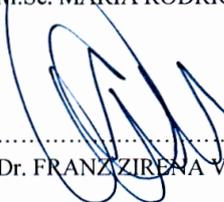
PRIMER MIEMBRO


.....
Dr. NORBERTO SIXTO MIRANDA ZEA

SEGUNDO MIEMBRO


.....
M.Sc. MARÍA RODRÍGUEZ MELO

ASESOR DE TESIS


.....
Dr. FRANZ ZIRENA VILCA

Puno, 10 de octubre de 2019

ÁREA: Investigación.

TEMA: Ingeniería Química.

LÍNEA: Seguridad Industrial y Ambiental.

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir estar conmigo en cada paso, por iluminar mi mente y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos deseados.

A mis padres, por apoyarme incondicional en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mis hermanos (as) por el apoyo moral y material que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Química y Maestría en Seguridad Industrial y Ambiental por brindarme la oportunidad de lograr una especialidad.
- A la Universidad Nacional de Juliaca, por las facilidades para la ejecución de la presente investigación.
- A mis señores Miembros del Jurado de Tesis: Dr. Teófilo Donaires Flores, Dr. Norberto Sixto Miranda Zea y M.Sc. María Rodríguez Melo, por sus acertadas observaciones y sugerencias para el desarrollo y culminación de la presente investigación.
- A mi asesor Dr. Franz Zirena Vilca por compartir su experiencia y conocimiento para la redacción de la presente investigación.
- A mis amigos y todas las personas que me apoyaron y contribuyeron para la realización de la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|--|------|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| ÍNDICE GENERAL | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE ANEXOS | x |
| RESUMEN | xi |
| ABSTRACT | xii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| CAPÍTULO I | |
| REVISIÓN DE LITERATURA | |
| | |
| 1.1. Marco teórico | 3 |
| 1.1.1. Procesos de oxidación avanzada | 3 |
| 1.1.2. La electroquímica y el tratamiento de aguas residuales | 4 |
| 1.1.3. Diagrama de Pourbaix para el hierro y peróxido de hidrógeno | 7 |
| 1.1.4. Proceso de electro-Fenton | 11 |
| 1.1.4.1. Mecanismos de reacción | 11 |
| 1.1.4.2. Parámetros de operación | 14 |
| 1.1.4.3. Ventajas y desventajas | 18 |
| 1.1.5. Matadero y clasificación de sus aguas residuales | 19 |
| 1.1.5.1. Características y composición | 20 |
| 1.1.5.2. Parámetros de vertido | 21 |
| 1.1.5.3. Impactos ambientales | 22 |
| 1.1.6. Normatividad nacional para las aguas residuales de matadero | 23 |
| 1.1.7. Seguridad industrial y ambiental | 27 |
| 1.1.7.1. Seguridad industrial | 27 |
| 1.1.7.2. Seguridad ambiental | 28 |
| 1.1.7.3. Evaluación de riesgo ambiental | 29 |
| 1.2. Antecedentes | 29 |

CAPÍTULO II**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

| | |
|----------------------------------|----|
| 2.1. Identificación del problema | 33 |
| 2.2. Enunciado del problema | 34 |
| 2.3. Justificación | 35 |
| 2.3.1. Justificación social | 35 |
| 2.3.2. Justificación técnica | 35 |
| 2.3.3. Justificación ambiental | 35 |
| 2.4. Objetivos | 36 |
| 2.4.1. Objetivo general | 36 |
| 2.4.2. Objetivos específicos | 36 |
| 2.5. Hipótesis | 36 |
| 2.5.1. Hipótesis general | 36 |
| 2.5.2. Hipótesis específicas | 36 |

CAPÍTULO III**MATERIALES Y MÉTODOS**

| | |
|--|----|
| 3.1. Lugar de estudio | 37 |
| 3.2. Población | 38 |
| 3.3. Muestra | 38 |
| 3.4. Método de investigación | 39 |
| 3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos | 39 |
| 3.5.1. Variables a ser analizadas | 39 |
| 3.5.2. Materiales, equipos, instrumentos, insumos entre otros | 40 |
| 3.5.3. Parte experimental | 40 |
| 3.5.3.1. Riesgo ambiental | 40 |
| 3.5.3.2. Evaluación del método de electro-Fenton para la remoción de DQO | 41 |
| 3.5.4. Aplicación de prueba estadística inferencial | 44 |

CAPÍTULO IV**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

| | |
|--|----|
| 4.1. Determinación del riesgo ambiental de la evacuación de las aguas residuales | 45 |
| 4.1.1. Formulación del problema | 45 |
| 4.1.2. Identificación de peligros (causas y efectos) | 45 |
| 4.1.3. Escenario de riesgos y estimación de probabilidad de ocurrencia | 46 |
| 4.1.4. Estimación de la gravedad de las consecuencias | 47 |

| | |
|--|----|
| 4.1.5. Estimación del riesgo ambiental | 49 |
| 4.1.6. Evaluación del riesgo ambiental | 51 |
| 4.1.7. Caracterización del riesgo | 53 |
| 4.1.8. Prueba de hipótesis para la determinación de los riesgos ambientales | 53 |
| 4.2. Tratamiento por el método de electro-Fenton para la remoción de DQO | 55 |
| 4.2.1. Las aguas residuales rojas | 55 |
| 4.2.2. Evaluación de los parámetros de operación | 55 |
| 4.2.2.1. Efecto del pH | 56 |
| 4.2.2.2. Efecto de la corriente | 57 |
| 4.2.2.3. Efecto de la dosis de H ₂ O ₂ | 58 |
| 4.2.2.4. Efecto del distanciamiento de electrodos | 59 |
| 4.2.2.5. Prueba de hipótesis para la evaluación del método de electro-Fenton | 60 |
| 4.2.3. Análisis estadístico y modelización | 62 |
| 4.2.3.1. Desarrollo de modelo de regresión | 63 |
| 4.2.3.2. Análisis de varianza | 64 |
| 4.2.3.3. Superficie de respuesta y gráfica de contorno para la remoción de DQO | 65 |
| 4.2.3.4. Validación del modelo estadístico | 73 |
| 4.2.3.5. Optimización del porcentaje de remoción de DQO | 74 |
| CONCLUSIONES | 76 |
| RECOMENDACIONES | 77 |
| BIBLIOGRAFÍA | 78 |
| ANEXOS | 84 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| 1. Potencial de oxidación de varios agentes oxidantes | 4 |
| 2. Composición de las aguas residuales de matadero | 21 |
| 3. LMP para la descarga de efluentes de mataderos | 26 |
| 4. LMP para los Efluentes de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales | 27 |
| 5. VMA de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario | 27 |
| 6. Descripción de las variables analizadas | 39 |
| 7. Rangos y niveles de las variables independientes | 42 |
| 8. Peligros potenciales de la evacuación de aguas residuales rojas | 46 |
| 9. Escenario de riesgo y probabilidad de ocurrencia del entorno humano | 46 |
| 10. Escenario de riesgo y probabilidad de ocurrencia del entorno natural | 47 |
| 11. Escenario de riesgo y probabilidad de ocurrencia del entorno socioeconómico | 47 |
| 12. Gravedad de las consecuencias del recurso aire, agua y suelo en el entorno humano | 48 |
| 13. Gravedad de las consecuencias del recurso aire, agua y suelo en el entorno natural | 48 |
| 14. Gravedad de las consecuencias del recurso aire, agua y suelo en el entorno socioeconómico | 49 |
| 15. Valores porcentuales del riesgo ambiental en el entorno humano | 51 |
| 16. Valores porcentuales del riesgo ambiental en el entorno natural | 52 |
| 17. Valores porcentuales del riesgo ambiental en el entorno socioeconómico | 52 |
| 18. Valores porcentuales del riesgo ambiental de la evacuación de aguas residuales rojas | 53 |
| 19. Características del agua residual roja | 55 |
| 20. Valores máximos de remoción de la DQO del tratamiento por electro-Fenton | 60 |
| 21. Matriz del diseño experimental de Box-Behnken para la remoción de DQO | 62 |
| 22. Coeficientes del modelo de regresión de segundo orden | 63 |
| 23. Resultados del análisis de varianza para el modelo de remoción de DQO | 64 |
| 24. Bondad de ajuste del modelo de regresión | 74 |
| 25. Formulación de escenarios | 85 |

| | | |
|-----|---|----|
| 26. | Rangos de estimación probabilística | 85 |
| 27. | Formulario para la estimación de la gravedad de las consecuencias | 86 |
| 28. | Rangos de los límites de los entornos | 86 |
| 29. | Valoración de consecuencias (Entorno humano) | 87 |
| 30. | Valoración de consecuencias (Entorno ecológico) | 87 |
| 31. | Valoración de consecuencias (Entorno socioeconómico) | 88 |
| 32. | Valoración de escenarios identificados | 88 |
| 33. | Estimador del riesgo ambiental | 89 |
| 34. | Establecimiento del riesgo alto en la escala de evaluación de riesgo ambiental | 90 |
| 35. | Cantidades de muestra y reactivos para varios vasos de digestión | 92 |
| 36. | Concentraciones de remoción de DQO del efecto del pH | 93 |
| 37. | Concentraciones de remoción de DQO del efecto de la corriente | 93 |
| 38. | Concentraciones de remoción de DQO del efecto de la dosis de H ₂ O ₂ | 93 |
| 39. | Concentraciones de remoción de DQO del efecto del distanciamiento de electrodos | 93 |
| 40. | Concentraciones finales de DQO en el diseño de Box-Behnken | 94 |
| 41. | Cantidad de Fe ²⁺ generado en el estudio del efecto del pH, dosis de H ₂ O ₂ y distanciamiento de electrodos | 95 |
| 42. | Cantidad de Fe ²⁺ generado en el estudio del efecto de la corriente | 95 |
| 43. | Cantidad de Fe ²⁺ generado en los experimentos del diseño de Box-Behnken | 96 |
| 44. | Consumo de energía en la evaluación del efecto pH | 97 |
| 45. | Consumo de energía en la evaluación del efecto de la corriente | 97 |
| 46. | Consumo de energía en la evaluación del efecto de la dosis de H ₂ O ₂ | 98 |
| 47. | Consumo de energía en la evaluación del efecto del distanciamiento de electrodos | 98 |
| 48. | Consumo de energía en los experimentos del diseño de Box-Behnken | 99 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| 1. Diagrama de un reactor electroquímico | 5 |
| 2. Remoción de contaminantes en los procesos de oxidación electroquímica | 6 |
| 3. Diagrama de Pourbaix para el hierro | 8 |
| 4. Diagrama de Pourbaix para el peróxido de hidrógeno | 9 |
| 5. Diagrama del proceso de Fenton | 11 |
| 6. Electro-generación del reactivo de Fenton | 11 |
| 7. Proceso de oxidación Fenton | 12 |
| 8. Ámbitos de actuación de la seguridad industrial | 28 |
| 9. Ubicación del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | 37 |
| 10. Instalaciones del matadero municipal de Ayaviri y canaleta de evacuación de aguas residuales rojas | 38 |
| 11. Imagen del montaje experimental del proceso del electro-Fenton | 41 |
| 12. Distribución de riesgo en el entorno humano, natural y socioeconómico | 50 |
| 13. Curva de distribución t de Student para las hipótesis $H_0: \mu=42$ y $H_1: \mu \neq 42$ | 54 |
| 14. Reactor electrolítico para el tratamiento de aguas residuales rojas por el método de electro-Fenton | 55 |
| 15. Efecto del pH para la remoción de DQO: $C_e=0.75$ A, $D=12$ mL/L, $d_e=1$ cm, $V_m=500$ mL, $A=200$ rpm y $T=17$ °C | 57 |
| 16. Efecto de la corriente para la remoción de DQO: $pH=5.03$, $D=12$ mL/L, $d_e=1$ cm, $V_m=500$ mL, $A=200$ rpm y $T=17$ °C | 58 |
| 17. Efecto de la dosis de H_2O_2 para la remoción de DQO: $C_e=0.75$ A, $pH=5.02$, $d_e=1$ cm, $V_m=500$ mL, $A=200$ rpm y $T=18$ °C | 58 |
| 18. Efecto del distanciamiento de electrodos para la remoción de DQO: $C_e = 0.75$ A, $pH = 5.03$, $D = 12$ mL/L, $V_m = 500$ mL, $A=200$ rpm y $T=18$ °C | 59 |
| 19. Curva de distribución t de Student para las hipótesis $H_0: \mu=500$ y $H_1: \mu < 500$ | 61 |
| 20. Efecto de la densidad de corriente y pH para la remoción de DQO: $D = 10$ mL/L y $t = 30$ min | 66 |
| 21. Efecto de la dosis de H_2O_2 y pH para la remoción de DQO: $i = 23.81$ mA/cm ² y $t = 30$ min | 67 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 22. | Efecto del tiempo de tratamiento y pH para la remoción de DQO: $i = 23.81$ mA/cm ² y $D = 10$ mL/L | 68 |
| 23. | Efecto de la dosis de H ₂ O ₂ y densidad de corriente para la remoción de DQO: pH = 5 y $t = 30$ min | 69 |
| 24. | Efecto del tiempo de tratamiento y densidad de corriente para la remoción de DQO: pH = 5 y $D = 10$ mL/L | 70 |
| 25. | Efecto del tiempo de tratamiento y dosis de H ₂ O ₂ para la remoción de DQO: pH = 5 y $i = 23.81$ mA/cm ² | 71 |
| 26. | Estimación del riesgo ambiental | 89 |
| 27. | Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | 109 |
| 28. | Canaleta de evacuación de las aguas residuales | 109 |
| 29. | Laguna de tratamiento de las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | 110 |
| 30. | Multiparámetro empleado para la determinación de pH y conductividad | 110 |
| 31. | Celdas electrolíticas y electrodos de hierro para el tratamiento de las aguas residuales rojas | 111 |
| 32. | Celdas electrolíticas durante el tratamiento de las aguas residuales | 111 |
| 33. | Filtración de las muestras después del tratamiento por electro-Fenton | 112 |
| 34. | Muestra de agua residual antes y después del tratamiento por electro-Fenton | 112 |
| 35. | Equipamiento para la digestión de las muestras | 112 |
| 36. | Equipamiento para la titulación de las muestras | 113 |
| 37. | Muestras de agua residual roja tratadas a distintos <i>pH</i> | 114 |
| 38. | Muestra de agua residual roja tratadas a distintas corrientes. | 114 |
| 39. | Muestras de agua residual roja tratadas a distintas dosis de H ₂ O ₂ | 115 |
| 40. | Muestras de agua residual roja tratadas a distintos distanciamientos de electrodos | 115 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|------|
| 1. Metodología para la evaluación de riesgos ambientales | 85 |
| 2. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) | 91 |
| 3. Concentraciones y porcentajes de remoción de la DQO del estudio del efecto de los parámetros de operación | 93 |
| 4. Concentraciones finales de la DQO final del Diseño de Box-Behnken | 94 |
| 5. Cantidad de Fe^{2+} generado en el proceso de electro-Fenton | 95 |
| 6. Consumo de energía en la evaluación de los parámetros operacionales | 97 |
| 7. Consumo de energía en los experimentos del diseño de Box- Behnken | 99 |
| 8. Puntos porcentuales de la distribución t | 100 |
| 9. Puntos porcentuales de la distribución F ; $F_{0.05, \nu_1, \nu_2}$ | 101 |
| 10. Informe de ensayo | 102 |
| 11. Normas legales | 105 |
| 12. Evidencias fotográficas | 109 |

RESUMEN

Se evaluó el riesgo ambiental y el tratamiento de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri aplicando el método de electro-Fenton. El nivel de riesgo ambiental se determinó utilizando la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del Ministerio del Ambiente (2010), la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas se realizaron en un reactor electrolítico construido de material acrílico provistas con un par de electrodos de hierro para el tratamiento de 500 mL de muestra de agua residual en la cual se evaluaron el efecto de los parámetros como el *pH*, corriente eléctrica, dosis de H_2O_2 , distanciamiento de electrodos y tiempo de tratamiento; y también se evaluaron las variables empleando el diseño experimental de Box-Behnken. El nivel de riesgo de la evacuación de las aguas residuales rojas fue moderado en los entornos humano, natural y socioeconómico; en la evaluación del efecto del *pH*, corriente, dosis de H_2O_2 y distanciamiento de electrodos se removió la DQO hasta concentraciones de 384.00, 256.00, 320.00 y 448.00 mg/L las que estuvieron por debajo del Límite Máximo Permisible establecidos en el Decreto Supremo 2009-MINAM; y en los tratamientos realizados mediante el diseño experimental se obtuvo un máximo porcentaje de remoción de la DQO del 94.70% a *pH* 5, densidad de corriente de 23.81 mA/cm², dosis de H_2O_2 de 10 mL/L y tiempo de tratamiento de 30 minutos donde los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente al modelo de regresión de segundo orden con un nivel de confianza del 95%.

Palabras clave: Celda electrolítica, DQO, efluente líquido, materia orgánica, tratamiento electroquímico, remoción.

ABSTRACT

The environmental risk and the treatment of red wastewater from the municipal slaughterhouse in Ayaviri city was assessed using the electro-Fenton method. The level of environmental risk was determined using the Environmental Risk Assessment Guide of the Ministry of Environment (2010). The removal of the COD from the red wastewater was performed in an electrolytic reactor built of acrylic material provided with a pair of iron electrodes for the treatment of 500 mL of wastewater sample in which the effect of parameters such as *pH*, electric current, H_2O_2 dose, electrode spacing and treatment time were evaluated; and variables were also evaluated using the Box-Behnken experimental design. The risk level of red sewage disposal was moderate in the human, natural, and socioeconomic environments; in the evaluation of the effect of *pH*, current, H_2O_2 dose, and electrode spacing, COD was removed to concentrations of 384.00, 256.00, 320.00, and 448.00 mg/L which were below the Maximum Allowable Limit established in Supreme Decree 2009-MINAM; and in the treatments carried out by means of the experimental design, a maximum COD removal percentage of 94.70% at *pH* 5, current density of 23.81 mA/cm², H_2O_2 dose of 10 mL/L and treatment time of 30 minutes were obtained, where the experimental data were satisfactorily adjusted to the second order regression model with a 95% confidence level.

Keywords: COD, electrolytic cell, electrochemical treatment, liquid effluent, organic matter, removal.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital que posee propiedades únicas que lo hacen insustituible para los seres vivos, fundamentalmente para el hombre, los animales y vegetales (Prieto, 2004). Pero el vertido incontrolado de las aguas residuales urbanas e industriales ha ocasionado el deterioro de su calidad afectando la vida normal existente en los ecosistemas acuáticos, la que es considerado hoy en día uno de los principales problemas ambientales (Fernández, 2012; Nemerow y Dasgupta, 1998). Por lo tanto, es importante el tema de la protección ambiental para el crecimiento y desarrollo industrial sostenible (Jüttner, Galla y Schemieder, 2000).

La industria cárnica, en especial la industria de matadero de animales genera residuos sólidos y líquidos. Los residuos sólidos están constituidos por estiércol, huesos, trozos de pieles, etc. y los residuos líquidos se caracterizan por su alto contenido de carga orgánica debido a la presencia de sangre, grasa o mezcla de ambas las que tienen un alto contenido de nitrógeno, fósforo y sales (Bugallo, Cristóbal, Agrelo y Torres, 2014; Elías, 2009) provenientes de los establos y procesos de matanza son considerados los principales contaminantes de la industria cárnica (Marcos, Al-kassir, López, Cuadros y Brito, 2012).

La contaminación del agua con aguas residuales de mataderos ocasiona una transmisión hídrica de enfermedades, pérdida de los ecosistemas acuáticos y pérdida de la capacidad productiva de los suelos regados con dichas aguas (Fernández, 2012). La alta carga en nutrientes como el nitrógeno y fósforo presentes en estas aguas al ser vertidas ocasionan la eutrofización de los cuerpos de agua receptores generando un fuerte impacto en el ambiente (Carrasquero *et al.*, 2015). Las aguas contaminadas requieren su tratamiento para ser reutilizadas con fines diversos (Raffo, 2013).

Se investigaron y desarrollaron diferentes procesos de oxidación avanzada para la eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales entre las cuales podemos citar al proceso Fenton, proceso foto-Fenton asistido, UV/Fe^{3+} -oxalato/ H_2O_2 , fotólisis del H_2O_2 , O_3/UV y otros. Estos métodos cuando son aplicados correctamente ofrecen una solución completa al problema de los contaminantes (Martínez-Huitle y Ferro, 2006). La principal ventaja de estos tratamientos es su compatibilidad con el ambiente por la utilización del electrón considerada un reactivo limpio (Jüttner *et al.*, 2000).

La reacción entre el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y los iones Fe^{2+} es conocida como la reacción de Fenton (Qiang, Chang y Huang, 2003) para la producción de radicales hidroxilo ($\cdot OH$) considerada un fuerte agente oxidante no selectivo que en años recientes ha sido objeto de estudio para la degradación de diversos contaminantes orgánicos (Chandra, Venkata y Jayarama, 2004). Su metodología consiste en emplear H_2O_2 al 35 o 50% y sales de iones Fe^{2+} habitualmente $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ obteniendo como productos de la degradación de los compuestos orgánicos CO_2 , agua e iones inorgánicos (Barrera, 2014).

Una variante del proceso de electro-Fenton es mediante la producción de H_2O_2 en la superficie del cátodo por la reducción de oxígeno y la generación electroquímica del ion Fe^{2+} (Martínez-Huitle, Rodrigo y Scialdone, 2018). Por lo general, se emplean como material catódico grafito y carbón vítreo; y como ánodos el hierro, platino, titanio con recubrimientos de RuO_2 , SnO_2 , IrO_2 o platinados, grafito, acero inoxidable y electrodos de diamante dopados de boro (Barrera, 2014). La industria de productos farmacéuticos, pesticidas, colorantes, fenoles y compuestos fenólicos emplean estos procesos para la mineralización de sus contaminantes orgánicos (Sillanpää y Shestakova, 2017).

En décadas recientes la conciencia pública en relación a temas ambientales ha inducido a muchos gobiernos a introducir en sus legislaciones, prescripciones y limitaciones para la emisión de contaminantes (Panizza y Cerisola, 2009). En nuestro país la Ley de Recursos Hídricos, Ley 29338 es la encargada de promover la mitigación de la contaminación de las aguas ocasionadas por las actividades domésticas e industriales (Raffo, 2013). Específicamente en el Decreto Supremo 2009-MINAM se establece los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las actividades de plantas de caiales y plantas de beneficio cuya finalidad es la mitigación de los efectos negativos del vertimiento de los efluentes al ambiente.

Los objetivos del presente trabajo de investigación están orientados a la evaluación de los riesgos ambientales que implica la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri al ambiente que se realizó según la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del Ministerio del Ambiente (2010); por otro lado, tenemos el tratamiento de estas aguas aplicando el método de electro-Fenton para la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO).

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico

1.1.1. Procesos de oxidación avanzada

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) implica la producción de radicales hidroxilo ($\cdot OH$) (Chandra *et al.*, 2004). Mediante estos radicales es posible descomponer constituyentes orgánicos del agua residual difíciles de degradar biológicamente hasta obtener compuestos finales simples (Barrera, 2014).

Un compuesto no necesariamente se oxida en su totalidad, la oxidación parcial suele ser suficiente para un tratamiento biológico subsecuente o para reducir su toxicidad. El grado de degradación se lleva a cabo de la siguiente manera (Metcalf y Eddy, 2004):

- a) **Degradación primaria.** Cambio estructural del compuesto.
- b) **Desactivación.** Cambio en la estructura del compuesto hasta reducir su toxicidad.
- c) **Mineralización.** Conversión del carbono orgánico a CO_2 .
- d) **Degradación inaceptable.** Cambio estructural del compuesto incrementándose su toxicidad.

El radical $\cdot OH$ no es selectivo siendo capaz de operar a temperaturas y presiones normales. La fuerza de oxidación de varios oxidantes en relación al cloro se muestra en la Tabla 1 (Metcalf y Eddy, 2004).

Tabla 1

Potencial de oxidación de varios agentes oxidantes

| Agente oxidante | Potencial de oxidación electroquímico (POE), V | POE relativo al cloro |
|-----------------------|--|-----------------------|
| Flúor | 3.06 | 2.25 |
| Radical hidroxilo | 2.80 | 2.05 |
| Oxígeno (atómico) | 2.42 | 1.78 |
| Ozono | 2.08 | 1.52 |
| Peróxido de hidrógeno | 1.78 | 1.30 |
| Hipoclorito | 1.49 | 1.10 |
| Cloro | 1.36 | 1.00 |
| Dióxido de cloro | 1.27 | 0.93 |
| Oxígeno (molecular) | 1.23 | 0.90 |

Fuente: Metcalf y Eddy (2004)

1.1.2. La electroquímica y el tratamiento de aguas residuales

La electroquímica como rama de la fisicoquímica desempeña un rol importante en la mayoría de las áreas de la ciencia y tecnología, ofreciendo acercamientos prometedores en la prevención de los problemas de contaminación industrial (Martínez-Huitle y Ferro, 2006). Los procesos electroquímicos pueden ser empleados para la recuperación o tratamiento de efluentes de origen industrial o municipal (Comninellis y Chen, 2010). La ventaja de los tratamientos electroquímicos es su compatibilidad con el ambiente, debido al hecho de que el reactivo principal es el electrón siendo esta un reactivo limpio (Jüttner *et al.*, 2000).

Para la descontaminación de las aguas residuales por procedimiento electroquímicos se introduce en el líquido contaminante dos electrodos metálicos aplicando una adecuada diferencia de potencial o una densidad de corriente (Sarria, Parra, Rincón y Torres, 2005). La corriente (I), es el incremento de la carga dQ que fluye a través de un plano por unidad de tiempo. Otra medida importante es la densidad de corriente (i) siendo esta la corriente que fluye por unidad de área (A) de la sección transversal de un plano (A/m^2) (Rajeshwar y Ibanez, 1997).

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \text{y} \quad i = \frac{I}{A} \quad (1)$$

Un reactor electroquímico puede estar conformado por una fuente de poder, un ánodo, un cátodo y el electrolito para la oxidación electroquímica de aguas residuales (Anglada, Urtiaga, y Ortiz, 2009).

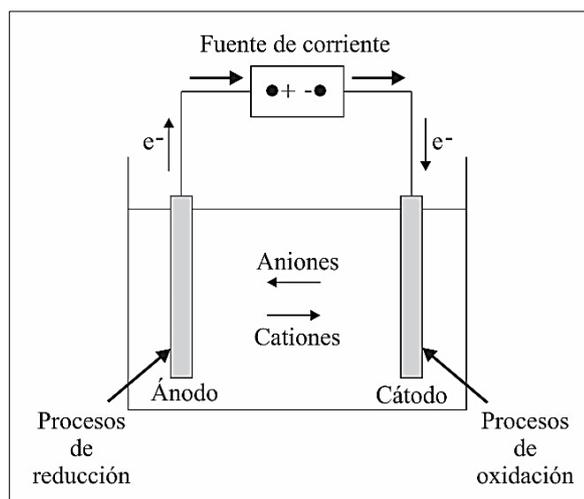


Figura 1. Diagrama de un reactor electroquímico

Fuente: Anglada *et al.* (2009)

La oxidación electroquímica es considerada como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Siendo su objetivo principal la oxidación completa de los compuestos orgánicos a CO_2 o la conversión de los compuestos tóxicos a compuestos biocompatibles (Martínez-Huitle y Ferro, 2006). Este tratamiento para las aguas residuales puede subdividirse en dos categorías (Jüttner *et al.*, 2000):

a) Oxidación directa

Los contaminantes son adsorbidos primero en la superficie del ánodo y luego destruidos por la reacción de transferencia de electrones anódica (Chiang, Chang y Wen, 1995). La velocidad de transferencia del electrón está determinada por la actividad del electrodo y la densidad de corriente. La oxidación anódica de contaminantes orgánicos puede realizarse por dos caminos (Anglada *et al.*, 2009):

- **Conversión electroquímica.** Los contaminantes orgánicos son parcialmente oxidados, requiriendo un tratamiento subsecuente.

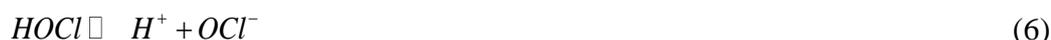
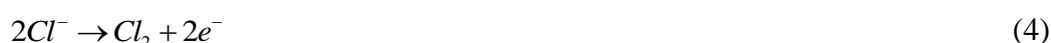


- **Combustión electroquímica.** Los contaminantes orgánicos se transforman en el agua en dióxido de carbono y otros compuestos orgánicos.



b) Oxidación indirecta

Se electro-genera un fuerte agente oxidante en la superficie del ánodo y luego destruye los contaminantes en la masa de la solución (Anglada *et al.*, 2009). Los oxidantes generados más usados son el cloro, hipoclorito, peróxido de hidrógeno, reactivo de Fenton, peroxidisulfatos, ozono, etc. (Jüttner *et al.*, 2000). Por ejemplo, si la solución contiene cloruro de sodio, se genera in situ en el ánodo gas cloro seguidamente reacciona con el agua para la formación de ácido hipocloroso e hipocloritos dependiendo del *pH* y estos pueden oxidar la materia orgánica en medio básico (Comninellis y Chen, 2010; Sillanpää y Shestakova, 2017).



Además de las reacciones de oxidación o reducción de contaminantes o de especies que pueden actuar sobre los contaminantes. También ocurrirán reacciones de oxidación anódica y reducción catódica del agua residual consumiendo una parte importante de la energía eléctrica suministrada a la celda (Barrera, 2014).

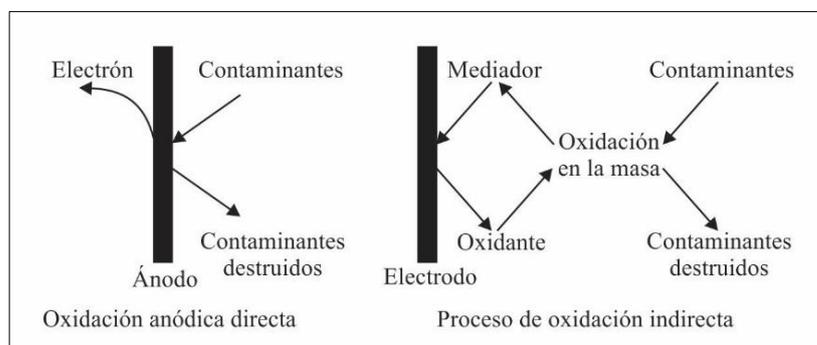


Figura 2. Remoción de contaminantes en los procesos de oxidación electroquímica
Fuente: Chiang *et al.* (1995)

Las principales ventajas del tratamiento electroquímico que lo hacen más atractivo para la prevención y remediación de los problemas de contaminación son los siguientes (Jüttner *et al.*, 2000):

- **Versatilidad.** Son utilizados para la oxidación directa o indirecta de diversos contaminantes en gases, líquidos y sólidos en el tratamiento de pequeños y grandes volúmenes.
- **Eficiencia de la energía.** Emplean temperaturas más bajas que la incineración térmica, por tanto, los electrodos y la celda puede diseñarse para evitar pérdidas de potencia.
- **Docilidad para la automatización.** Las variables de los procesos electroquímicos como el potencial del electrodo y corriente de la celda son convenientes para la automatización.
- **Rentabilidad.** El equipamiento en general es simple y diseñados correctamente son de bajo costo.

1.1.3. Diagrama de Pourbaix para el hierro y peróxido de hidrógeno

Los cambios en el pH del medio reaccionante ocasionan variaciones significativas en el potencial redox del sistema lo cual se verifica mediante la ecuación de Nerst (Carriazo, Uribe y Hernández, 2007):

$$E = E^0 - \left(\frac{RT}{nF} \right) \ln \left[\frac{[productos]}{[reactantes]} \right] \quad (9)$$

En la cual la concentración del ion H^+ , dependiendo de la reacción, podría estar incluida en los reactivos o en los productos. Dichos cambios de pH y potencial pueden ocasionar variaciones en los resultados de los procesos redox que se desarrollan, originando la formación de especies químicas diferentes entre las que pueden existir cationes simples, polihidroxocaciones, hidruros, aniones, oxoaniones, oxoácidos, hidróxidos, óxidos o la especie en estado elemental (Carriazo *et al.*, 2007).

En el diagrama de Pourbaix del hierro se representa las regiones en que termodinámicamente es favorable la formación de un óxido o hidróxido.

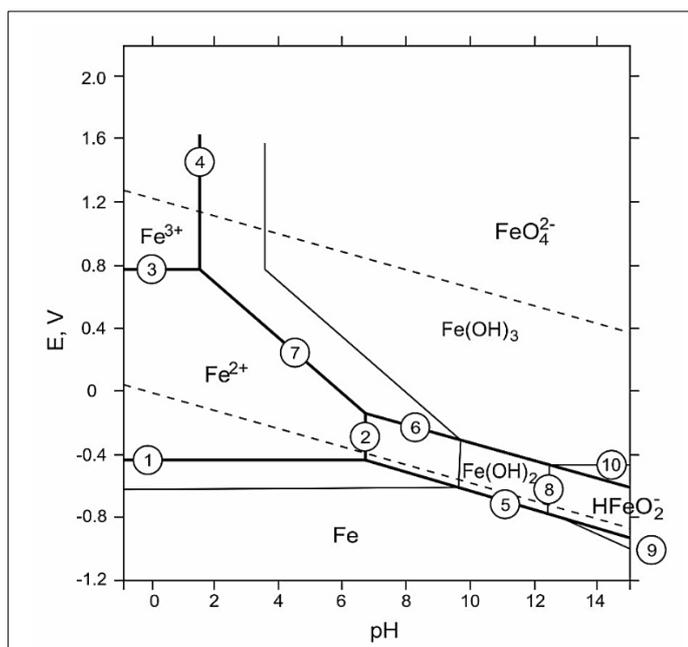
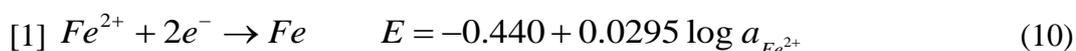


Figura 3. Diagrama de Pourbaix para el hierro
Fuente: Delahay, Pourbaix y Van Rysselberghe (1950)

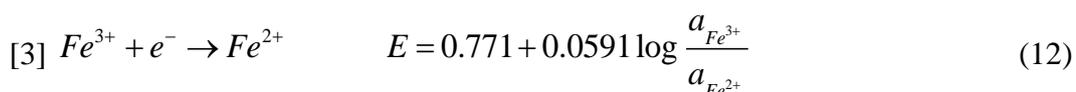
En el diagrama de Pourbaix, las líneas horizontales resultan del proceso redox son independientes del pH (Carriazo *et al.*, 2007). El Fe^{2+} puede pasar a hierro metálico (Fe) según la siguiente ecuación (Delahay *et al.*, 1950):



La línea vertical resulta de un equilibrio tipo ácido-base entre las dos especies en cuestión y por lo tanto es dependiente solo del pH (Carriazo *et al.*, 2007). Para el caso del hierro se tiene el equilibrio $Fe^{2+}/Fe(OH)_2$. El paso de $Fe(OH)_2$ a Fe^{2+} en solución acuosa se consigue disminuyendo el pH por debajo de 7.



El ion Fe^{3+} es reducido a Fe^{2+} mediante la siguiente reacción y potencial correspondiente:



El equilibrio $Fe^{3+}/Fe(OH)_3$ solo es dependiente del pH según la ecuación de equilibrio:



Las líneas diagonales del diagrama de Pourbaix se verifican mediante la ecuación de Nerst puesto que separan procesos dependientes tanto del potencial redox como del pH del medio reaccionante (Carriazo *et al.*, 2007). En este caso, el paso de $Fe(OH)_2$ a Fe , $Fe(OH)_3$ a $Fe(OH)_2$ y de $Fe(OH)_3$ a Fe^{2+} se representan según las ecuaciones (Delahay *et al.*, 1950):

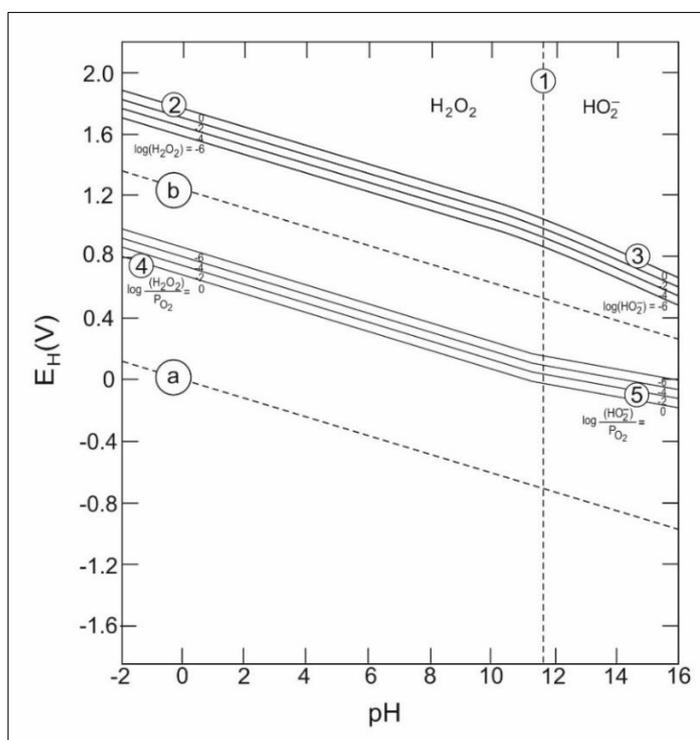
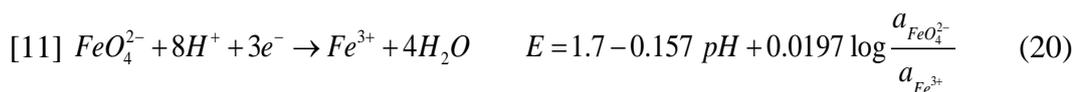
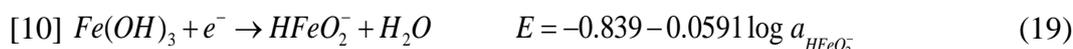
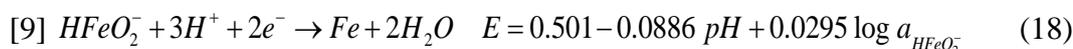
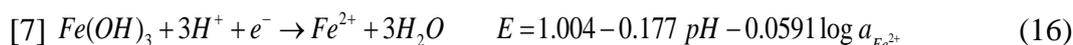
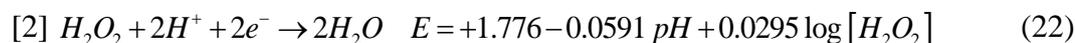


Figura 4. Diagrama de Pourbaix para el peróxido de hidrógeno

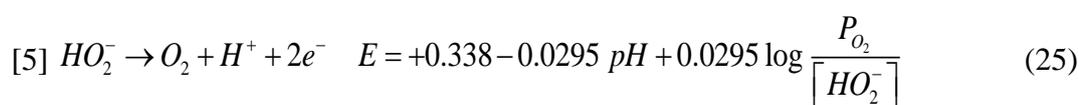
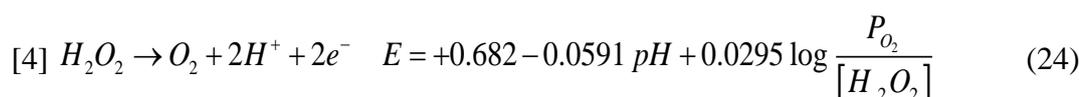
Fuente: Pourbaix (1973)

Las reducciones y oxidaciones del peróxido de hidrógeno y su ion HO_2^- , corresponde a los siguientes equilibrios (Pourbaix, 1973):

Reducciones con formación de agua



Oxidaciones con formación de oxígeno



Estos equilibrios permiten establecer la Figura 4, que representa las condiciones de equilibrio electroquímico de las soluciones de peróxido de hidrógeno. Las dos familias de líneas (2,3) y (4,5) trazadas en esta figura representan respectivamente los equilibrios de la oxidación por el peróxido de hidrógeno (o reducción del peróxido de hidrógeno en agua) y los equilibrios de la reducción por el peróxido de hidrógeno (u oxidación del peróxido de hidrógeno en oxígeno) para diferentes valores de la actividad de la solución de $H_2O_2 + HO_2^-$ (2,3) y para diferentes valores del término $P_{O_2}/([H_2O_2] + [HO_2^-])$ (4,5). Debajo de la familia de líneas (2,3), el peróxido de hidrógeno en solución puede teóricamente reducirse a agua; sobre la familia de líneas (4,5) teóricamente puede ser oxidada a oxígeno; por lo tanto, las soluciones de peróxido de hidrógeno son siempre inestables termodinámicamente a 25 °C, para los valores de pH y potencial. En la región entre las dos familias de líneas se considera que el peróxido de hidrógeno es doblemente inestable tiende a reducirse a H_2O_2 según la ecuación [2] y ser oxidada a O_2 de acuerdo con la ecuación [4], es decir para descomponerse en H_2O y O_2 de acuerdo a la reacción:



En el diagrama de Pourbaix las líneas diagonales punteadas representan los límites en las que son estables las soluciones acuosas, fuera de estas líneas los valores de potencial por encima de la línea superior o por debajo de la línea inferior el agua se oxida o reduce formando O_2 e H_2 respectivamente (Delahay *et al.*, 1950).

1.1.4. Proceso de electro-Fenton

1.1.4.1. Mecanismos de reacción

La reacción de Fenton es un proceso de oxidación propuesto por H.J.H Fenton en el año 1894, que consiste en la generación química de radicales hidroxilo ($\cdot OH$) por la reacción de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sales de hierro (Fe^{2+}) (Salas, 2010):

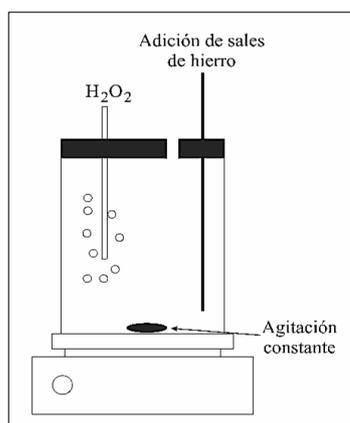


Figura 5. Diagrama del proceso de Fenton
Fuente: Barrera (2014)

En el método de electro-Fenton, bajo condiciones ácidas el ion Fe^{2+} y el H_2O_2 son electrogenerados, al reaccionar producen radicales $\cdot OH$ e iones Fe^{3+} según la reacción (Comminellis y Chen, 2010):

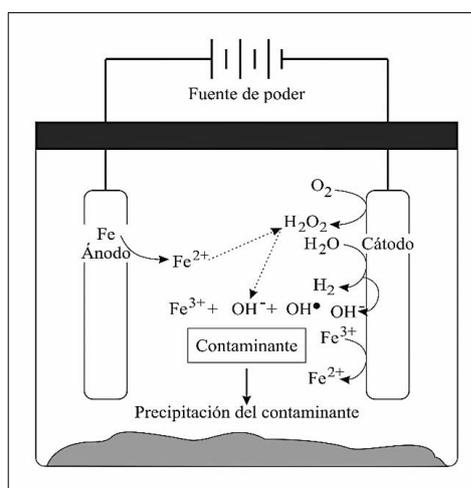


Figura 6. Electro-generación del reactivo de Fenton
Fuente: Barrera (2014)

Los radicales hidroxilos reaccionan indiscriminadamente y de forma no selectiva con la materia orgánica (RH) por hidroxilación (oxidación de dobles enlaces). La hidroxilación de los compuestos orgánicos es un paso necesario para la degradación biológica, e incrementa la solubilidad de estos (se pasa de las moléculas con dobles enlaces difíciles de romper-degradar a moléculas con grupo fácilmente saliente, un grupo hidroxilo, OH) y la biodegradabilidad de los efluentes tratados, facilitando así los tratamientos biológicos posteriores (Elías, 2009):

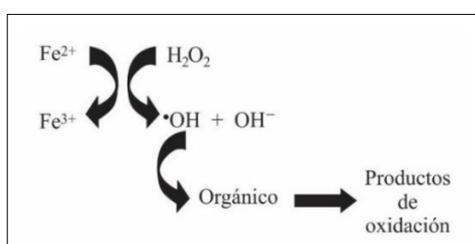
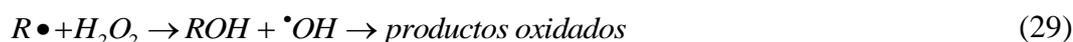


Figura 7. Proceso de oxidación Fenton
Fuente: Barrera (2014)

La generación electroquímica del ion Fe^{2+} con la reacción de disolución del material anódico o la reducción catódica de los iones Fe^{2+} , las reacciones puede realizarse de la siguiente manera (Sillanpää y Shestakova, 2017):

- a) **Proceso de Electro-Fenton convencional:** En la generación catódica in situ de H_2O_2 y adición externa de iones Fe^{2+} , los procesos catódicos y anódicos son:

Ánodo:



Cátodo:



- b) **Generación catódica in situ de Fe^{2+} y adición externa de H_2O_2 :** Los procesos se describen como siguen:

Ánodo:



Cátodo:



- c) **Peroxidación electroquímica:** Generación anódica in situ de Fe^{2+} y adición externa de H_2O_2 :

Ánodo:



Cátodo:



- d) **Procesos de peroxicoagulación:** Electrogenación anódica de Fe^{2+} y generación catódica de H_2O_2 .

Ánodo:



Cátodo:



Los iones Fe^{2+} pueden ser regenerados por la reducción de Fe^{3+} en el cátodo, en menor grado con H_2O_2 , con el radical HO_2^\bullet y con radicales orgánicos intermedios R^\bullet (Comninellis y Chen, 2010):



Una parte del radical $\bullet OH$ oxida al ion Fe^{2+} y descompone al H_2O_2 siendo no accesible para la oxidación de la materia orgánica (Rajeshwar y Ibanez, 1997):



La velocidad de reacción en el proceso de Fenton puede disminuir al oxidarse el ion Fe^{2+} con el radical hidropéroxido (HO_2^\bullet) y la reacción en el ánodo de la siguiente manera (Comninellis y Chen, 2010):



La reacción de formación catódica de H_2O_2 en condiciones ácidas puede competir con la reducción del oxígeno a agua. Por otra parte, el peróxido de hidrógeno electrogenerado puede experimentar la reducción adicional en la superficie del cátodo o la deprotonación a gas oxígeno y agua en concordancia con las siguientes reacciones (Sillanpää y Shestakova, 2017):



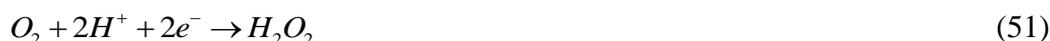
En una celda sin divisiones, el H_2O_2 también puede ser consumido por reacciones anódicas parásitas como sigue:



1.1.4.2. Parámetros de operación

a) pH

El pH es el parámetro más importante en el proceso de electro-Fenton (Martínez-Huitle *et al.*, 2018). Un pH bajo es favorable para la producción de H_2O_2 a partir de O_2 disuelto las que consumen los protones de la solución ácida (Wang, Hu, Chou y Kuo, 2008).



También un pH ácido promueve la formación de hidrógeno y reduce la eficiencia de la corriente (Qiang, Chang y Huang, 2002).



A pH bajos los iones Fe^{2+} no pueden descomponer al H_2O_2 (Jiang y Zhang, 2007) y esta se estabiliza como ion peroxonio ($H_3O_2^+$) por capturar un ion H^+ reduciendo la actividad con los iones Fe^{2+} y produciéndose menos radicales $\bullet OH$ (Panizza y Cerisola, 2009).

Por otra parte, a valores de pH altos se forma el $Fe(OH)_3$ la cual se precipita disminuyendo la concentración de Fe^{3+} , también inhibe la regeneración de Fe^{2+} parcialmente cubriendo la superficie del electrodo (Qiang *et al.*, 2003) y a estos pH también es posible la formación de complejos de $Fe(II)$ (Bautista, Mohedano, Gilarranz, Casas y Rodríguez, 2007).

La mayoría de los estudios realizados reportaron que el pH óptimo en el tratamiento de diferentes efluentes estuvo alrededor de 3 (Bautista *et al.*, 2007; Panizza y Cerisola, 2009; Salas, 2010; Wang *et al.*, 2008). En los tratamientos se debe tener un control estricto del pH para tener buenos resultados (Barrera, 2014).

b) Electrolito de soporte

El electrolito mejora la conductividad de la solución y acelera la transferencia del electrón, de esta manera se beneficia la reacción de electro-Fenton. Es favorable el uso de electrolitos de soporte para soluciones que presentan baja conductividad. En el proceso de electro-Fenton, el sulfato de sodio (Na_2SO_4) es el electrolito de soporte más usado (Jiang y Zhang, 2007).

Como electrolitos de soporte también se utiliza el cloruro de sodio ($NaCl$), cloruro de potasio (KCl), perclorato de sodio ($NaClO_4$), nitrato de sodio ($NaNO_3$) y carbonato de sodio (Na_2CO_3). La naturaleza del electrolito de soporte puede afectar en gran manera la cinética de degradación puesto que la presencia de algunos iones puede llevar a la formación de oxidantes fuertes (Moreira, Boaventura, Brillas y Vilar, 2017). La utilización de sales de cloruro lleva a la formación de especies de cloro activos que pueden afectar la eficacia de los procesos de oxidación/mineralización (Martínez-Huitle *et al.*, 2018).

c) Velocidad de agitación

La velocidad de agitación depende del diseño y volumen de la celda (Martínez-Huitle *et al.*, 2018). En reactores de tanque y celdas se debe regular para obtener una homogeneización rápida de la solución tratada, evitando la deposición de los sólidos asegurando una apropiada transferencia de masa de los contaminantes hacia los electrodos y el catalizador (Moreira *et al.*, 2017).

d) Aireación

El flujo de alimentación de aire se debe fijar para saturar la solución de oxígeno (Martínez-Huitile *et al.*, 2018), por lo que en el proceso de electro-Fenton, el H_2O_2 es electro-generado en el cátodo por la reducción de oxígeno. La eficiencia de la aireación no solo es importante para la generación de H_2O_2 ya que representa costos. Para aumentar la producción de H_2O_2 , se debe seleccionar un cátodo con una superficie grande (Jiang y Zhang, 2007).

e) Temperatura

El aumento de temperatura favorece la cinética de la reacción de Fenton asociado con el aumento de la producción de radicales $\cdot OH$ (Barrera, 2014). Comparado con los otros factores, el efecto de la temperatura en la remoción de compuestos orgánicos es relativamente pequeño (Nidheesh y Gandhimathi, 2012). En relación a ello Panizza y Cerisola (2009) observaron que la degradación de un tinte se vio favorecida con el aumento de la temperatura de 25 a 35 °C, la cual puede asociarse con un incremento en la velocidad de reacción de la materia orgánica con los radicales $\cdot OH$ siendo la temperatura óptima para la electrolisis de 35 °C.

La temperatura también ejerce efectos conflictivos en la generación de H_2O_2 . Un aumento de la temperatura disminuirá la solubilidad del oxígeno disuelto e incrementará la velocidad de descomposición del H_2O_2 (Qiang *et al.*, 2002). Su efecto negativo en la producción de H_2O_2 se puede explicar por las bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Wang *et al.*, 2008).

La temperatura de la solución afecta la velocidad de transferencia del electrón y la transferencia de masa afectando la velocidad de regeneración del ion Fe^{2+} . Al final de un tratamiento electrolítico los porcentajes de regeneración de Fe^{2+} pueden ser del 48 y 80% a 10 y 46 °C respectivamente donde la regeneración de los iones Fe^{2+} se vio favorecida a altas temperaturas (Qiang *et al.*, 2003).

f) Corriente o densidad de corriente

La densidad de corriente es un parámetro importante para el control de la velocidad de reacción en la mayoría de los procesos electroquímicos como el proceso de electro-Fenton (Akyol, Taner, Demirbas y Kobya, 2013).

La cantidad de metal disuelto o depositado es dependiente de la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución electrolítica y esta puede derivarse de la ley de Faraday (Comninellis y Chen, 2010):

$$w = \frac{itM}{nf} \quad (53)$$

Donde w es la cantidad de material del electrodo disuelto (g de M/cm²), i es la densidad de corriente (A/cm²), t es el tiempo (s), M es la masa molar relativa del electrodo, n es el número de electrones en la reacción de oxidación/reducción y f es la constante de Faraday (96500 C/mol).

La corriente aplicada es la fuerza impulsora para la reducción del O_2 que conduce a la generación de H_2O_2 en el cátodo. Una corriente alta aumenta la producción de H_2O_2 , de esta manera también aumenta el número de radicales $\cdot OH$ en el medio del electrolito son altamente reactivos y responsable de la degradación. Una alta electro-regeneración del ion Fe^{3+} a Fe^{2+} con el aumento de la corriente incrementa la eficiencia de las reacciones (Nidheesh y Gandhimathi, 2012).



Un aumento excesivo de corriente o una alta densidad de corriente disminuye la eficacia de la reacción de electro-Fenton debido a las reacciones competitivas que tienen lugar en los electrodos de la celda electrolítica, generándose una excesiva producción de O_2 en el ánodo e H_2 en el cátodo consumiendo bastante energía. Estas reacciones inhiben las principales reacciones de Fenton (Ghosh, Samanta y Ray, 2011; Nidheesh y Gandhimathi, 2012).



g) Distanciamiento entre electrodos

El distanciamiento entre electrodos es un factor importante ya que de ella dependerá el potencial aplicado. Por consiguiente, una disminución de la distancia entre los electrodos llevará a una reducción de la caída óhmica a través del electrolito provocando un decrecimiento equivalente del voltaje y consumo de energía de la celda (Fockede y Lierde, 2002).

En el proceso de electro-Fenton, el Fe^{2+} es regenerado vía la reducción del Fe^{3+} en el cátodo. Entonces, esto induce a reacciones de Fenton en cadena. Sin embargo, cuando los electrodos están colocados demasiados juntos, el Fe^{2+} electro-generado puede oxidarse fácilmente a ion Fe^{3+} en el ánodo. Una distancia mayor representa una limitante para la transferencia de masa del ion férrico en la superficie del cátodo que gobierna la regeneración del ion ferroso (Zhang, Zhang y Zhou, 2006).



El aumento y la reducción de la distancia entre electrodos representan altos y bajos costos de consumo de energía. En su instalación debe haber una distancia apropiada para evitar cortos circuitos (Atmaca, 2009; Jiang y Zhang, 2007). El efecto de la distancia entre electrodos en el rango de 1.3 a 2.1 cm no tuvo mucha influencia en la remoción de DQO de lixiviados de relleno sanitario (Zhang *et al.*, 2006). Y para el intervalo de distancia entre 1.8 a 2.8 cm provocó un incremento del 10% en la remoción de DQO (Atmaca, 2009).

h) Relación de Fe^{2+}/H_2O_2

El ion Fe^{2+} y el H_2O_2 se encuentran vinculadas entre sí, por lo que no se pueden utilizar independientemente. En el proceso, cuando se tiene concentraciones altas de Fe^{2+} , la velocidad de oxidación de la materia orgánica decrece debido a la cantidad de radicales hidroxilos que pueden reaccionar con los iones Fe^{2+} . Por tales motivos, se debe utilizar una proporción óptima de Fe^{2+}/H_2O_2 , las que son determinados experimentalmente (Barrera, 2014).

1.1.4.3. Ventajas y desventajas

El proceso electro-Fenton tiene varias ventajas comparados con el Fenton clásico y otros tratamientos convencionales que son los siguientes:

- Producción in situ de H_2O_2 , evitando riesgos relacionados con el transporte, almacenaje y manipulación (Brillas, Sirés y Oturan, 2009).
- Poca formación de lodo comparados con los POA debido a la disolución anódica del electrodo de hierro a pH neutro (Ranade y Bhandari, 2014; Sillanpää y Shestakova, 2017).

- Fácil de implementar, automatizar y mineralización a un costo bajo optimizando los parámetros de operación (Brillas *et al.*, 2009; Sillanpää y Shestakova, 2017).
- Altos niveles de degradación de materia orgánica debido a la generación del radical $\cdot OH$ en el ánodo y regeneración continua del Fe^{2+} en el cátodo y un mejor control del radio molar Fe/H_2O_2 (Brillas *et al.*, 2009; Ranade y Bhandari, 2014; Sillanpää y Shestakova, 2017).
- Eficaz previo a los tratamientos biológicos y como tratamiento autónomo de pequeños volúmenes de aguas residuales (Ranade y Bhandari, 2014).

Entre las principales desventajas del proceso de electro-Fenton se destacan los siguientes:

- La principal desventaja es el excesivo requerimiento de energía eléctrica para su uso a una escala industrial (Brillas *et al.*, 2009).
- Requiere un ajuste de pH antes del tratamiento, luego una neutralización para aumentar el pH del agua tratada, así como de un tratamiento posterior para eliminar el hierro del efluente mediante el uso de productos químicos (Sillanpää y Shestakova, 2017).
- Requieren electrodos resistentes a la corrosión debido al medio ácido en la generación de H_2O_2 ya que en medios alcalinos ocurre la reducción del O_2 (Sillanpää y Shestakova, 2017):



- Las velocidades de generación electroquímica de H_2O_2 son bajas (Sillanpää y Shestakova, 2017).

1.1.5. Matadero y clasificación de sus aguas residuales

Según el Decreto Supremo N° 015-2012-AG un matadero es un establecimiento autorizado por el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) con características higiénico sanitarias apropiadas para la realización de actividades de faenado de animales de abasto.

En las actividades de faenado de animales se generan tres tipos de efluentes que son los siguientes (Martínez, Borzacconi, Mallo, Galisteo y Viñas, 1995):

- Aguas rojas de matadero, su principal contenido son las proteínas y lípidos.
- Agua verde procedente de la limpieza y procesado de las vísceras.
- Aguas residuales de baños y lavatorios.

1.1.5.1. Características y composición

Según las etapas del proceso de sacrificio estas aguas residuales tienen las siguientes características (Lopez y Casp, 2004):

a) Recepción de animales, lavado de camiones y estabulación

Las aguas residuales contienen principalmente restos de productos de limpieza con restos orgánicos procedentes de la orina y deyecciones de los animales las que le confiere al agua residual un contenido en compuestos nitrogenados.

b) Aturdido y sangrado

En esta operación el animal produce una gran cantidad de orina y sangre contaminando el agua con compuestos nitrogenados y una alta carga orgánica.

c) Escaldado y depilado (porcino)

En esta etapa se aportará al agua grasas, sólidos en suspensión, proteínas, sangre, excrementos, restos de pelos y otros compuestos orgánicos.

d) Escaldado y desplumado (aves)

Las aguas residuales de esta operación contendrán grasas, sólidos en suspensión (restos de plumas), proteínas, sangre, excremento y otros compuestos orgánicos.

e) Chamuscado (porcino)

Se generarán aguas residuales con elevada carga orgánica como restos de pelos, escamas de la piel, etc.

f) Eviscerado y lavado

Las aguas residuales contendrán una elevada carga orgánica.

g) Triperías y lavado

Las aguas residuales del lavado de estómagos e intestinos, arrastran una gran cantidad de restos de contenido digestivo, y grasas procedentes del raspado de los intestinos y estómagos.

Las aguas residuales provenientes de los mataderos presentan la siguiente composición como se muestra en la Tabla 2 (Bustillo-Iecompte y Mehrvar, 2015).

Tabla 2

Composición de las aguas residuales de matadero

| Parámetro | Rango | Media |
|---|--------------|-------|
| COT (mg/L) | 70 – 1200 | 546 |
| DBO ₅ (mg/L) | 150 – 4635 | 1209 |
| DQO (mg/L) | 500 – 15 900 | 4221 |
| NT (mg/L) | 50 – 841 | 427 |
| STS (mg/L) | 270 – 6400 | 1164 |
| pH | 4.90 – 8.10 | 6.95 |
| PT (mg/L) | 25 – 200 | 50 |
| Orto-PO ₄ (mg/L) | 20 – 100 | 25 |
| Orto-P ₂ O ₅ (mg/L) | 10 – 80 | 20 |
| K (mg/L) | 0.01 – 100 | 90 |
| Color (mg/L escala de Pt) | 175 – 400 | 290 |
| Turbiedad (FAU*) | 200 – 300 | 275 |

COT: Carbón orgánico total, DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno, DQO: Demanda química de oxígeno, NT: Nitrógeno total, STS: Sólidos totales solubles, PT: Fósforo total, *FAU, unidades de atenuación de formazina,

Fuente: Bustillo-Iecompte y Mehrvar (2015)

1.1.5.2. Parámetros de vertido

a) *pH*

La concentración del ion hidrógeno es un parámetro de calidad importante en aguas naturales y aguas residuales (Metcalf y Eddy, 2004). Es una medida de los iones hidrógeno en una muestra. Su medición nos da informa entre otras cosas, de las reacciones químicas que van ocurrir en la muestra, ya que son controladas por el *pH* (Contreras y Molero, 2009).

b) **Materia en suspensión o sólidos en suspensión (SST/SS)**

Se refiere a la concentración de sólidos orgánicos o inorgánicos heterogéneos (superiores a 1.2 micras) del agua. Expresada en mg/L (Lopez y Casp, 2004).

c) **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)**

Es el parámetro más utilizado de la contaminación orgánica en aguas superficiales y aguas residuales. Su determinación implica la medición del oxígeno disuelto empleada por los microorganismos durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 2004).

d) Demanda química de oxígeno (DQO)

Es la cantidad de dicromato potásico consumida por el agua en medio ácido y en ebullición. Indica la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica del agua. Se expresa en mg O_2/L (Lopez y Casp, 2004).

e) Fósforo total (PT)

Se encuentra en las aguas naturales y residuales casi exclusivamente en forma de fosfatos. Es esencial para el crecimiento de los organismos (APHA, AWWA y WPCF, 1992).

f) Nitrógeno total Kjeldalh (NTK)

Es la suma del nitrógeno orgánico más el nitrógeno amoniacal producto de la descomposición del nitrógeno orgánico (Lopez y Casp, 2004).

g) Carbón orgánico total (COT)

El carbón orgánico de las aguas y aguas residuales corresponde a la diversidad de compuestos orgánicos en varios estados de oxidación. Es una expresión más conveniente y directa del contenido orgánico total (APHA, AWWA y WPCF, 1992).

h) Conductividad

Puede definirse como la facilidad que presenta el agua para que pase la corriente eléctrica a través de ella y depende de la concentración de sales disueltas (Contreras y Molero, 2009).

1.1.5.3. Impactos ambientales

Los mataderos generan grandes cantidades de aguas residuales principalmente por la matanza y la limpieza de las vísceras (Awang, Bashir, Kutty y Isa, 2011). Entre el 80 y 95% del agua empleada en este proceso se evacua como aguas residuales (Bugallo *et al.*, 2014). La que depende del número de animales sacrificados diariamente, la dieta de animal faenado, la recolección de productos y subproductos; y del uso de agua (Carrasquero *et al.*, 2015). El principal contaminante de los efluentes de matadero es la materia orgánica, las que incrementan los niveles de nitrógeno, fósforo, sólidos y DBO de los cuerpos de agua (Awang *et al.*, 2011). Los nutrientes, debido a su alto contenido de nitrógeno y fósforo ocasionan la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que genera un fuerte impacto ambiental que pone en riesgo la vida de los ecosistemas acuáticos (Carrasquero *et al.*, 2015).

El potencial contaminante de los mataderos proviene de los sistemas para la generación de vapor de agua. En los sistemas de reutilización de grasas mediante digestores. Los olores desagradables generados no son tóxicos pero causan malestar y son fuente de denuncias por parte de las personas (Ortiz, Rodríguez y Cárdenas, 1997). El clima y la temperatura del ambiente desempeñan un rol determinante en el desarrollo de los olores. Por otro lado, los olores se generan por la descomposición anaerobia de la materia orgánica en donde los sulfatos en combinación con el ácido láctico bajo condiciones anaerobias dan lugar a ácido acético y sulfuro que más tarde formarán ácido sulfhídrico (Elías, 2009).

1.1.6. Normatividad nacional para las aguas residuales de matadero

Todas las actividades humanas susceptibles a ocasionar impactos negativos en el ambiente, están sujetas a leyes y normas. En el Perú, las normatividades relacionadas con la descarga de efluentes líquidos en los cuerpos receptores están establecidos en las siguientes Leyes y Decretos Supremos:

Ley General del Ambiente, Ley N° 28611, en el Título Preliminar Derechos y Principios en los Artículos I y IX señala lo siguiente en relación al derecho, deberes y principios de responsabilidad ambiental:

Artículo I.- Del derecho y deber fundamental

Toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país.

Artículo IX.- Del principio de responsabilidad ambiental

El causante de la degradación del ambiente y de sus componentes, sea una persona natural o jurídica, pública o privada, está obligado a adoptar las medidas para su restauración, rehabilitación o reparación según corresponda o, cuando lo anterior no fuera posible, a compensar en términos ambientales los daños generados sin perjuicio de otras responsabilidades administrativas, civiles o penales a que hubiera lugar.

En el Título II: De los Sujetos de la gestión Ambiental, Capítulo 4: Empresa y Ambiente en los Artículos 74 y 75 refiere lo siguiente en relación a las responsabilidades, manejos y prevenciones:

Artículo 74.- De la responsabilidad general

Todo titular de operaciones es responsable por las emisiones, efluentes, descargas y de demás impactos negativos que se generan sobre el ambiente, la salud y los recursos naturales, como consecuencia de sus actividades. Esta responsabilidad incluye los riesgos y daños ambientales que se generen por acción u omisión.

Artículo 75.- Del manejo integral y prevención en la fuente

75.1. El titular de operaciones debe adoptar prioritariamente medidas de prevención del riesgo y daño ambiental en la fuente generadora de los mismos, así como las demás medidas de conservación y protección ambiental que corresponda, bajo el concepto de ciclo de vida de los bienes que produzca o los servicios que provea, de conformidad con los principios establecidos en el Título Preliminar de la presente Ley y de las demás normas legales vigentes.

En el Título III: Integración de la Legislación Ambiental, Capítulo: Calidad Ambiental en los Artículos 120, 121 y 122 indican lo siguiente:

Artículo 120.- De la protección de la calidad de las aguas

120.2.- El estado promueve el tratamiento de las aguas residuales con fines de su reutilización, considerando como premisa la obtención de la calidad necesaria para su reúso, sin afectar la salud humana, el ambiente o las actividades en las que se reutilizarán.

Artículo 121.- Del vertimiento de aguas residuales

El estado emite en base a la capacidad de carga de los cuerpos receptores, una autorización previa para el vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales o de cualquier otra actividad desarrollada por personas naturales o jurídicas, siempre que dicho vertimiento no cause deterioro de la calidad de las aguas como cuerpo receptor, ni se afecte su neutralización para otros fines, de acuerdo a lo establecido en los ECA y las normas legales vigentes.

Artículo 122.- Del tratamiento de residuos líquidos

122.3.- Las empresa o entidades que desarrollan actividades extractivas, productivas, de comercialización u otras que generen aguas residuales o servidas, son responsables de su tratamiento, a fin de reducir sus niveles de contaminación hasta niveles compatibles con los LMP, los ECA y otros estándares establecidos en instrumentos de gestión ambiental, de conformidad con las normas legales vigentes. El manejo de las aguas residuales de origen industrial puede ser efectuado directamente por el generador a través de terceros debidamente autorizados o a través de las entidades responsables de los servicios de saneamiento, con sujeción al marco legal vigente sobre la materia.

En la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338 en su Artículo 79 indica lo siguiente:

Artículo 79.- Vertimiento de agua residual

La Autoridad Nacional autoriza el vertido del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.

En el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM en su Artículo 1° establece la aprobación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, cuyo objetivo es establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente.

Los ECA para el agua, clasifican las aguas nacionales en cuatro categorías:

1. Categoría I: Poblacional y recreacional
2. Categoría II: Actividades marino-costeras.
3. Categoría III: Riego de vegetales y bebidas de animales.
4. Categoría IV: Conservación del ambiente acuático.

Según el Código del Medio Ambiente y de Los Recursos Naturales, Decreto Legislativo N° 613, Capítulo IV: De las medidas de seguridad en los Artículos 14 y 15 indica:

Artículo 14.- Prohibición de descargar sustancias contaminantes

Está prohibida la descarga de sustancias contaminantes que provoquen degradación de los ecosistemas o alteren la calidad del ambiente, sin adoptar las precauciones para la depuración.

Artículo 15.- Prohibición de verter o emitir residuos que alteren las aguas

Queda prohibido verter o emitir residuos sólidos, líquidos o gaseosos u otras formas de materia, o de energía que alteren las aguas en proporción capaz de hacer peligrosa su utilización. La autoridad competente efectuará muestreos periódicos de las aguas para velar por el cumplimiento de esta norma.

Según el Decreto Supremo 2009-MINAM en su artículo 1° establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de las actividades agroindustriales como plantas de canales y plantas de beneficio cuya finalidad es la mitigación de los efectos negativos.

Tabla 3

LMP para la descarga de efluentes de mataderos

| | Parámetros | Unidad | LMP |
|------------|--|---------------|------------|
| I | Generales | - | |
| 1 | pH | - | 6.0 – 9.0 |
| 2 | Sólidos suspendidos totales | mg/L | 300 |
| II | Orgánicos | | |
| 3 | Demanda bioquímica de oxígeno-DBO ₅ | mg/L | 250 |
| 4 | Demanda química de oxígeno-DQO | mg/L | 500 |
| III | Inorgánicos | | |
| 5 | Fósforo total | mg/L | 40 |
| 6 | Nitrógeno total | mg/L | 50 |

Fuente: Decreto Supremo 2009-MINAM (2009)

Según el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM en su artículo 1° decreta la aprobación de los Límites Máximos Permisibles (LMP) para el vertido a cuerpos de agua de los Efluentes de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.

Tabla 4

LMP para los Efluentes de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales

| Parámetro | Unidad | LMP |
|-------------------------------|------------|---------|
| Aceites y grasas | mg/L | 20 |
| Coliformes Termotolerantes | NMP/100 mL | 10 000 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/L | 100 |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | 200 |
| pH | Unidad | 6.5-8.5 |
| Sólidos Totales en Suspensión | mL/L | 150 |
| Temperatura | °C | <35 |

Fuente: Decreto Supremo N° 003-2010 MINAM

En el Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA se aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. La cual regula la descarga de aguas residuales al sistema de alcantarillado sanitario para evitar su deterioro de las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinaria, equipos y asegurar su adecuado funcionamiento.

Tabla 5

VMA de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario

| Parámetro | Unidad | Simbología | VMA |
|-------------------------------|--------|------------------|------|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/L | DBO ₅ | 500 |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/L | DQO | 1000 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | S.S.T. | 500 |
| Aceites y grasas | mg/L | A y G | 100 |

Fuente: Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA

1.1.7. Seguridad industrial y ambiental

1.1.7.1. Seguridad industrial

Es la especialidad profesional encargado de reducir o evitar los accidentes de los trabajadores en su lugar de trabajo. Su objetivo principal es preservar la integridad física y mental de los trabajadores mediante la implementación de normas, métodos y sistemas orientados a la prevención de accidentes (Meza, 2009).

En la industria se desarrolla un gran número de actividades susceptibles de producir daño, por lo que la seguridad industrial es un concepto fundamental y necesario para la supervisión de la industria tanto física, social y económicamente. En la problemática de la seguridad industrial se puede distinguir tres ámbitos de actuación (Bovea, Alberola, García, Mulet y Pérez, 2011):

- Seguridad laboral, destinada a proteger a los individuos expuestos.
- Seguridad del producto, destinada a proteger al usuario de un producto.
- Seguridad frente a accidentes graves, destinada a proteger a la población en general contra riesgos provenientes de situaciones accidentales.

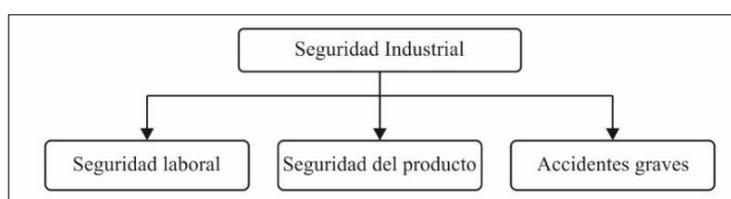


Figura 8. Ámbitos de actuación de la seguridad industrial

Fuente: Bovea *et al.* (2011)

1.1.7.2. Seguridad ambiental

La seguridad ambiental es la seguridad pública relacionada con los peligros ambientales ocasionados por procesos naturales o humanos debido a la ignorancia, accidente o la mala gestión originado dentro o a través de las fronteras nacionales. También puede definirse como el estado de la protección de los intereses vitales del individuo, sociedad, ambiente natural de amenazas resultado de impactos antropogénicos y naturales en el ambiente (Jørgensen y Fath, 2008).

1.1.7.2.1. Los impactos humanos y el riesgo de violencia

Los problemas de seguridad ambiental a menudo son asociados con la explotación del recurso natural y puede emerger debido a los impactos humanos en el ambiente. Se le suele relacionar a menudo con la escasez del recurso y el estrés ecológico transfronterizo (Rwabizambuga, 2007). En ello están incluidos la contaminación del aire y agua, la pérdida de hábitat, la deforestación, la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el peligro de las especies individuales, el agotamiento del ozono y la desestabilización y degradación de una variedad de ecosistemas terrestres y marinos (Elliott, 2015).

Las inseguridades que enfrentan las personas frente a los daños ambientales provienen de una mayor vulnerabilidad a la escasez de recursos, enfermedades y cargas sanitarias; asociadas a la disminución de la capacidad para actividades agrícolas y pesqueras, la inseguridad alimentaria que trae como consecuencia la desnutrición de las personas y los desastres naturales. Estos desafíos se agravan por la pobreza, donde la gente pobre no tienen acceso a servicios básicos, viven en lugares vulnerables a amenazas ambientales y carecen de barreras financieras e institucionales contra los peligros (Elliott, 2015).

Los cambios ambientales pueden aumentar el riesgo de violencia en una sociedad, la violencia puede evitarse mejorando la adaptabilidad de las personas frente al cambio dado. La paz y la seguridad ambiental están relacionadas íntimamente y ninguna de las dos puede lograrse sin la otra. Para evitar la inseguridad ambiental se deben abordar las causas del cambio ambiental, ya que son las que exponen a los grupos los cambios de distribución, la abundancia y la calidad de los recursos de los que dependen (Barnett, 2007).

1.1.7.3. Evaluación de riesgo ambiental

El riesgo ambiental es la probabilidad de ocurrencia que un peligro afecte directamente o indirectamente al ambiente y a su biodiversidad en un lugar y tiempo determinado el cual puede ser de origen natural o antropogénico. La evaluación de riesgo ambiental es el proceso mediante el cual se determina si existe amenaza potencial que comprometa la calidad del agua, aire o suelo poniendo en peligro la salud del ser humano como consecuencia de la exposición a todos los productos tóxicos presentes en un sitio, incluyendo aquellos compuestos tóxicos presentes que son producto de actividades industriales ajenas al sitio o cualquier otra fuente de contaminación y define un rango de magnitud para el riesgo (MINAM, 2010).

1.2. Antecedentes

Panizza y Cerisola (2001), efectuaron pruebas de remoción de la DQO y color de aguas residuales industriales utilizando el reactivo de Fenton electrogenerado mediante el uso de electrodos de grafito para inducir la reducción de O_2 a H_2O_2 . Los porcentajes de remoción de la DQO y color fueron del 87% y 89% respectivamente utilizando soluciones de Fe^{2+} 3 mM.

Qiang *et al.* (2002), llevaron a cabo estudios el cual consistía en la generación de peróxido de hidrógeno mediante procesos electroquímicos a partir de soluciones ácidas. Las condiciones óptimas de operación se dieron a un potencial de 0.5 voltios, velocidad de flujo másico de oxígeno de 8.2×10^{-2} mol/min y pH 2.

Qiang *et al.* (2003), efectuaron pruebas experimentales para la regeneración del ion Fe^{2+} mediante procesos electroquímicos para la oxidación Fenton. El potencial catódico óptimo para dicha regeneración fue de -0.1 voltios a un $pH \leq 1$ y la energía consumida estuvo en el rango de 2.0-3.0 kW/kg.

Zhang *et al.* (2006), reportaron estudios de remoción de la DQO de lixiviados por procesos de electro-Fenton. El porcentaje de remoción estuvieron altamente influenciadas por el tiempo de tratamiento y la distancia entre electrodos no tuvo mucha influencia. La máxima remoción de la DQO fue del 87% la que tuvo lugar a una corriente de 2.5 amperios y concentración de H_2O_2 de 0.34 mol/L.

Bautista *et al.* (2007), estudiaron la oxidación de Fenton para el tratamiento de aguas residuales de la industria de cosméticos. Las máximas capacidades de oxidación tuvieron lugar a un pH inicial de 2.5 a 3.0, dosis de Fe^{2+} de 200 mg/L y la relación en peso inicial H_2O_2 correspondiente al valor de la estequiometría teórica.

Wang *et al.* (2008), efectuaron pruebas para la remoción de color de aguas residuales de teñido mediante el proceso de electro-Fenton para la generación de H_2O_2 e iones Fe^{2+} . Las condiciones óptimas de operación se llevaron a cabo a una densidad de corriente de 68 A/m² y pH 3.

Atmaca (2009), realizó estudios concernientes al tratamiento de lixiviados empleando la tecnología de electro-Fenton para la remoción de la DQO. Se observó que el 72% de la DQO fue removida en un tiempo de tratamiento de 20 minutos, corriente de 3 A, concentración de H_2O_2 de 2000 mg/L y pH 3.

Panizza y Cerisola (2009), efectuaron experimentos de degradación de tintes sintéticos utilizando la tecnología de electro-Fenton. El tratamiento estuvo influenciado por la densidad de corriente, pH de la solución y temperatura. El análisis UV-vis reveló que el tinte se oxidó principalmente en ácidos alifáticos y CO_2 .

Silva, Trujillo, Aguilar y Hincapié (2009), trataron aguas residuales con compuestos orgánicos procedentes de un laboratorio químico mediante procesos de oxidación Fenton con luz artificial. Las concentraciones óptimas para el tratamiento de dichas aguas fueron de 27.5 mg/L de Fe y 300 mg/L de H_2O_2 .

Salas (2010), realizó pruebas para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil por procesos de Fenton. Los contaminantes presentaron su máxima actividad catalítica a un pH 3, a $pH > 3$ los iones Fe^{3+} precipitaron como $Fe(OH)_3$ y se descompuso el H_2O_2 a O_2 y H_2O . Para valores de pH más ácidos, la generación de Fe^{2+} por reacción del Fe^{3+} con el H_2O_2 se vio inhibida.

Ghosh *et al.* (2011), reportaron estudios referentes a la remoción de la DQO de las aguas residuales de la industria de rayón por electro-Fenton y precipitación química. Las condiciones óptimas de remoción fueron a una corriente de 0.2 A y concentración de H_2O_2 de 1530 mg/L. La energía consumida en el proceso para una remoción del 88% fue de 1.7 kWh/kg en un tiempo de 50 minutos.

Akyol *et al.* (2013), realizaron estudios comparativos del tratamiento por electrocoagulación y electro-Fenton de aguas residuales de una planta de fertilizantes orgánicos. Obtuvieron una remoción de la DQO del 83% en la electrocoagulación a una densidad de corriente de 50 A/m², tiempo de 45 minutos y pH inicial 6. Por otro lado, en el tratamiento por electro-Fenton se logró una remoción del 91% a una densidad de corriente de 50 A/m², tiempo de 45 minutos, concentración de H_2O_2 25 mM y pH 3.

Martínez, Ramírez y Toledo (2013), llevaron a cabo estudios experimentales para la remoción de carbón orgánico total de aguas residuales procedentes de un laboratorio químico. Se alcanzaron porcentajes de remoción del 88.8% utilizando una solución de Fe^{2+} 50 mg/L, concentración de H_2O_2 50 mM, pH 2.8 y temperatura 80 °C.

Thirugnanasambandham, Kandasamy, Sivakumar, Kiran y Mohanavelu (2014), utilizaron el diseño experimental de Box-Behnken para el modelado del tratamiento de aguas residuales de aves de corral por el proceso de electro-Fenton. Las concentraciones de la DQO se redujeron al 97% bajo las condiciones óptimas de operación de pH inicial 3, densidad de corriente 10 mA/cm², dosis de H_2O_2 20 mL/L, tiempo 30 minutos y el consumo de energía fue 0.009 kW h/L.

Paramo-vargas, Estrada, Gutierrez-granados, Godinez y Peralta-hernandez (2015), efectuaron estudios empleando distintas combinaciones de electrodos para el tratamiento de efluentes de matadero por electro-Fenton. Los porcentajes de remoción de la DQO para el electrodo de Ti-RuO₂/carbón felt (CF) fue 83.5%, para la combinación Ti-PdPtOx/CF fue 77.9% y para los electrodos BDD/CF fue 74.3% a un *pH* 3.5 y concentración de Fe^{2+} 41.9 mg/L.

Thirugnanasambandham y Sivakumar (2015), reportaron estudios de modelamiento y optimización en el tratamiento por proceso de electro-Fenton de las aguas residuales de una industria de cerveza. Utilizaron el diseño experimental de superficie de respuesta de Box-Behnken para el estudio del efecto de la densidad de corriente, relación molar H_2O_2/Fe^{2+} , tiempo de tratamiento y temperatura. Las condiciones óptimas de operación fueron a una densidad de corriente 9 mA/m², relación molar H_2O_2/Fe^{2+} 1:1, tiempo de tratamiento 10 minutos y temperatura 30 °C en la que se redujo la DQO en un 94%.

Medina, Montero y Cruz (2016), utilizaron el reactivo de Fenton para el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario en época de lluvia y estiaje. Los experimentos fueron realizados mediante el diseño de Box-Behnken. En la época de lluvia los parámetros óptimos de operación fueron: *pH* 3.19, concentraciones de sulfato ferroso 1645.55 mg/L y peróxido de hidrógeno 1096.55 mg/L. Por otro lado, en la época de estiaje las condiciones óptimas fueron: *pH* 3.26, concentraciones de sulfato ferroso 1788.61 mg/L y peróxido de hidrógeno 1180.83 mg/L. El porcentaje de remoción de la DQO en ambas épocas fueron del 42% para un tiempo de tratamiento de 20 minutos

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

Los mataderos generan grandes volúmenes de aguas residuales (Bustillo-lecompte y Mehrvar, 2015) provenientes de la línea de matanza y limpieza de las vísceras (Tezcan, Savas, y Ülker, 2009), siendo la materia orgánica el principal contaminante compuesta por excretas alimento no digerido, sangre, pelo, carne suelta, proteínas solubles, material suspendido y partículas coloidales (Asselin, Drogui, Benmoussa, y Blais, 2008). Por consiguiente, el aumento de nitrógeno y fósforo ocasiona la eutrofización de los cuerpos receptores de agua poniendo en riesgo la vida en los sistemas acuáticos convirtiéndose en un serio problema global (Feng, Sugiura, y Shimada, 2003). En tanto, la protección del ambiente está llevando a la industria cárnica a considerar métodos sostenibles para el tratamiento y reutilización de sus aguas residuales (Bustillo-lecompte y Mehrvar, 2017).

Para el tratamiento de las aguas residuales, una opción atractiva es mediante la aplicación de los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) (Martínez-Huitile y Ferro, 2006), entre las cuales podemos mencionar el proceso Fenton por su efectividad para la degradación de varios contaminantes orgánicos (Neyens y Baeyens, 2003). El proceso de Fenton se basa en el uso de una mezcla de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sales de hierro (Fe^{2+}) para la generación de radicales hidroxilo ($\cdot OH$) a pH ácido y condiciones ambientales (Brillas *et al.*, 2009; Salas, 2010). El radical hidroxilo es un poderoso oxidante no selectivo (Silva *et al.*, 2009) capaz de mineralizar los contaminantes orgánicos a CO_2 , agua e inorgánicos o en productos inofensivos para el ambiente (Andreozzi, Caprio, Insola y Marotta, 1999).

Los métodos electroquímicos son otra alternativa a los tratamientos biológicos tradicionales de las aguas residuales con contaminantes orgánicos (Panizza y Cerisola, 2001). Entre estas tecnologías se encuentra el proceso de electro-Fenton, en la cual se genera in situ en el cátodo peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en un medio ácido catalizado por iones hierro (Fe^{2+}) para producir radicales hidroxilo (Brillas *et al.*, 2009). Este proceso es una tecnología emergente de gran alcance y amigable con el ambiente (Nidheesh y Gandhimathi, 2012). El proceso de electro-Fenton se utilizó exitosamente en el tratamiento de aguas residuales industriales (Panizza y Cerisola, 2001), lixiviados (Atmaca, 2009; Zhang *et al.*, 2006), teñidos (Wang *et al.*, 2008), tintes sintéticos (Panizza y Cerisola, 2009), industria del rayón (Ghosh *et al.*, 2011), planta de fertilizantes orgánicos (Akyol *et al.*, 2013), aves de corral (Thirugnanasambandham *et al.*, 2014) y mataderos (Paramo-vargas *et al.*, 2015).

El matadero municipal de la ciudad de Ayaviri se encuentra ubicado en la provincia de Melgar y región de Puno. Es un establecimiento en el que se sacrifica ganado ovino, vacuno y camélidos sudamericanos para la producción de carne. En esta actividad se utiliza bastante cantidad de agua para el lavado de la carne, vísceras y limpieza de pisos generando cantidades considerables de efluentes líquidos que son evacuados a una laguna para su tratamiento, el cual se realiza deficientemente. Según el problema planteado se requiere realizar investigaciones orientadas a la evaluación de los riesgos ambientales derivados de la evacuación de las aguas residuales y su tratamiento por el método de electro-Fenton considerada una tecnología amigable con el ambiente y de esta manera mitigar sus efectos negativos en los cuerpos receptores.

2.2. Enunciado del problema

Pregunta general de investigación

¿Cómo será el riesgo ambiental y la eficacia del método de electro-Fenton para el tratamiento de las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri, Puno?

Preguntas específicas de la investigación

¿Cómo será el nivel de riesgo ambiental derivado de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri?

¿Será eficaz la aplicación del método de electro-Fenton para la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri?

2.3. Justificación

2.3.1. Justificación social

Las aguas residuales de matadero presentan alta carga orgánica compuesta por excretas, alimento no digerido, sangre, pelo, carne suelta, proteínas solubles, material suspendido y partículas coloidales (Asselin *et al.*, 2008; Elías, 2009); siendo esta propicia para el desarrollo de microorganismos patógenos. Mediante la evaluación de los riesgos ambientales de la evacuación de las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri se establecerán la existencia de riesgos para la salud de las personas. El tratamiento de las aguas residuales contribuirá a la disminución de enfermedades que ocasionan un clima de inseguridad para las personas que habitan a sus alrededores.

2.3.2. Justificación técnica

En nuestra región de Puno la evaluación de riesgos ambientales y las tecnologías de tratamiento de aguas residuales de mataderos han sido escasamente estudiadas y desarrolladas. La evaluación de los riesgos ambientales derivados del vertido de aguas residuales del matadero permitirá conocer si existe contaminación del agua, aire o suelo. La aplicación de esta tecnología electroquímica de electro-Fenton utilizados para la mineralización de diversos contaminantes de las aguas residuales (Sillanpää y Shestakova, 2017) permitirá implementar nuevas tecnologías compatibles con el ambiente debido al uso del electrón como un reactivo limpio (Jüttner *et al.*, 2000).

2.3.3. Justificación ambiental

En nuestro país la normatividad relacionada con la descarga de efluentes líquidos está sujeta a Leyes y Decretos Supremos de las cuales podemos destacar la Ley 29338, Ley de Recursos Hídricos que promueve la mitigación de la contaminación de aguas debido a las actividades domésticas e industriales y en el Decreto Supremo 2009-MINAM se establece los Límites Máximo Permisible para la descarga de efluentes de las actividades en plantas de camales y plantas de beneficio. Por otro lado, la investigación propuesta contribuye a minimizar los riesgos e impactos ambientales del vertido de las aguas residuales de matadero a los cuerpos receptores mediante la evaluación de riesgos y tratamiento por el proceso de electro-Fenton como una tecnología limpia.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

Evaluar el riesgo ambiental y la aplicación del método de electro-Fenton para el tratamiento de las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri, Puno.

2.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el nivel de riesgo ambiental derivado de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri.
- Evaluar la aplicación del método de electro-Fenton para la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

Las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri representan un riesgo ambiental moderado y su tratamiento aplicando el método de electro-Fenton es eficaz.

2.5.2. Hipótesis específicas

- El nivel de riesgo ambiental derivado de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri es moderado en el entorno humano, natural y socioeconómico.
- Mediante la aplicación del método de electro-Fenton se remueve eficazmente la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri hasta niveles establecidos por la normatividad peruana.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

El lugar de estudio es el matadero municipal de la ciudad de Ayaviri que se encuentra ubicada en el distrito de Ayaviri, provincia de Melgar, región Puno, siendo esta un establecimiento autorizado por el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA) para las actividades de faenado de ganado ovino, vacuno y camélidos sudamericanos. Los experimentos para el tratamiento de las aguas residuales fueron realizados en los Laboratorios de Química de la Universidad Nacional de Juliaca ubicada en la ciudad de Juliaca, provincia de San Román, región Puno en las coordenadas UTM 376659.929E/8286618.188N y altitud de 3824 m.s.n.m.

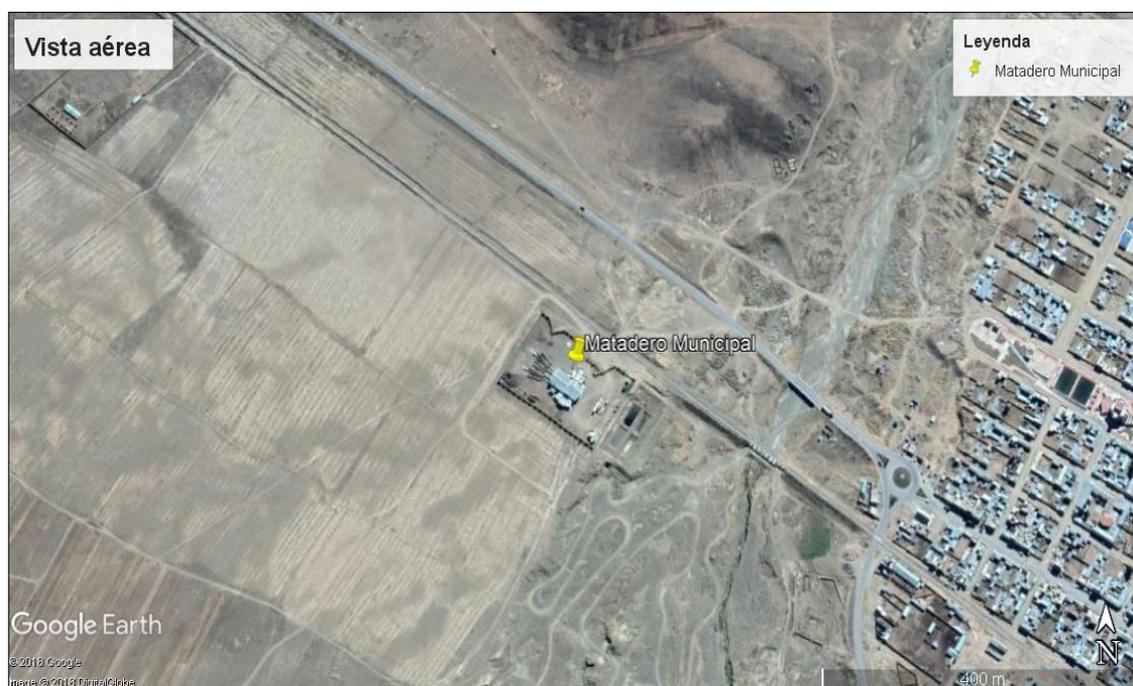


Figura 9. Ubicación del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri

Fuente: Google EARTH (2018).

3.2. Población

Estuvo constituida por las aguas residuales rojas (agua con sangre, grasa, pelo, carne suelta, rumen, etc.) de la etapa de faenado de ganado ovino, vacuno y camélidos sudamericanos del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri.

3.3. Muestra

La muestra en estudio estuvo constituida por las aguas residuales provenientes de la canaleta de evacuación de aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri. La cantidad de agua utilizada para el lavado de la carne por animal sacrificado fue de 10 a 15 litros.



Figura 10. Instalaciones del matadero municipal de Ayaviri y canaleta de evacuación de aguas residuales rojas

El muestreo de las aguas residuales se realizó siguiendo los procedimientos establecidos en la NTP-ISO 5667-10-2012 (2012) (Guía para el muestreo de aguas residuales), para ello el equipo de muestreo utilizado constó de una botella de boca ancha y envases de 20 litros.

Las muestras fueron colectadas de la canaleta de evacuación de agua residuales rojas como se muestra en la Figura 10, el 13 de noviembre del 2018; se tomaron muestras puntuales para la obtención de 20 litros y se almacenaron entre 4 a 6 °C antes de los experimentos. Las coordenadas UTM del punto de muestreo fueron 327034.866E/8354848.916N.

3.4. Método de investigación

El tipo de investigación es cuantitativa explicativo ya que busca establecer la relación causa efecto.

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1. Variables a ser analizadas

En el presente trabajo de investigación se evaluaron las siguientes variables en estudio según los objetivos específicos:

Objetivo específico 1

- Variable independiente (Causa) (V_i) = Aguas residuales rojas.
- Variable dependiente (Efecto) (V_d) = Riesgo ambiental.

Objetivo específico 2

- Variable independiente (Causa) (V_i) = Método de electro-Fenton.
- Variable dependiente (Efecto) (V_d) = Aguas residuales rojas.

Tabla 6

Descripción de las variables analizadas

| Objetivo específico | Variables | Dimensión | Indicadores |
|---|-------------------------------------|---|--|
| Determinar el nivel de riesgo ambiental derivado de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri. | Aguas residuales rojas (V_i). | Evacuación de las aguas residuales rojas. | - Aguas residuales rojas con grasa, pelo, carne suelta, rumen, estiércol, bacterias y parásitos. |
| | Riesgo ambiental (V_d). | Nivel de riesgo ambiental. | - Riesgo en el entorno humano (leve, moderado y significativo). - Riesgo en el entorno natural (leve, moderado y significativo). - Riesgo en el entorno socioeconómico (leve, moderado y significativo). |
| Evaluar la aplicación del método de electro-Fenton para la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri. | Método de electro-Fenton (V_i). | Aplicación del método de electro-Fenton. | - pH , pH . - Corriente, C_e (Amperios). - Dosis de H_2O_2 , D (mL). - Distanciamiento de electrodos, d_e (cm). - Tiempo de tratamiento, t (min). |
| | Aguas residuales rojas (V_d) | Remoción de la DQO de las aguas residuales rojas. | - Concentración porcentual de DQO inicial. - Concentración porcentual de DQO final. |

Fuente: Elaboración propia (2018).

3.5.2. Materiales, equipos, instrumentos, insumos entre otros

- a) **Materiales:** Matraces volumétricos de 100, 250, 500 y 1000 mL; vasos de precipitados de 100, 250, 500 y 1000 mL; matraces Erlenmeyer de 100 mL; probetas de 500 y 1000 mL; pipetas de 1, 2, 5 y 10 mL; buretas de 25 y 50 mL; pinzas y soporte universal; papel filtro Whatman N° 42; cronómetro; termómetro; espátula; frasco lavador; placas de fierro de 2 mm de espesor.
- b) **Equipos:** Fuente de energía eléctrica (HYelec 30 V-3 A), celda electrolítica, balanza digital (Mettler-Toledo ML204T), Multiparámetro (Hach HQ40d), agitador magnético (Velp Scientifica), termoreactor (Rocker 179250-22).
- c) **Reactivos:** Hidróxido de sodio $NaOH$ (Merck, p.a.), sulfato de mercurio $HgSO_4$ (Merck, p.a.), sulfato de plata Ag_2SO_4 (Merck p.a.), dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ (Merck, p.a.), ácido sulfúrico H_2SO_4 (Merck, p.a.), 1,10-fenantrolina monohidratado (Merck, p.a.), sulfato de fierro $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (Merck, p.a.), sulfato ferroso amoniacal $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ (J.T. Baker), óxido de manganeso MnO_2 (Meck), peróxido de hidrógeno H_2O_2 (Evonik) con. 50% (200 vol.) y agua destilada.

3.5.3. Parte experimental

3.5.3.1. Riesgo ambiental

La determinación de los riesgos ambientales de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri se realizó según la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del Ministerio del Ambiente (2010) (Anexo 1); basado en el método propuesto por la Norma UNE 150008-2008. Para ello se siguieron los siguientes pasos:

- Identificación de los peligros potenciales.
- Formulación de los escenarios de riesgo.
- Estimación de la probabilidad de ocurrencia en cada uno de los escenarios.
- Estimación de la gravedad de las consecuencias en el entorno natural, humano y socioeconómico.
- Evaluación del riesgo ambiental.

3.5.3.2. Evaluación del método de electro-Fenton para la remoción de DQO

Los experimentos para la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri se realizaron en una celda electrolítica construido de material acrílico para el tratamiento de 500 mL de muestra equipadas con un par de electrodos de hierro como cátodo y ánodo de 2 mm de espesor y un área efectiva de 42 cm² instaladas en paralelo según la metodología reportada por Thirugnanasambandham *et al.* (2014). Se suministro energía eléctrica a la celda utilizando una fuente de poder de 3 amperios y 30 voltios. El reactivo de Fenton se electro-generó por la producción de iones Fe^{2+} en el ánodo y adicionando peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 50% v/v, y ajustando el *pH* de las muestras con soluciones de H_2SO_4 e $NaOH$ 0.1 N. Finalizado el tiempo de tratamiento las muestras fueron filtradas con papel filtro Whatman N° 42 para la determinación de la DQO siguiendo los procedimientos descritos por APHA, AWWA y WPCF (1992) (Anexo 2). La reacción de Fenton se detuvo y eliminó el H_2O_2 residual siguiendo los procedimientos descritos por Silva *et al.* (2009) y Medina *et al.* (2016) utilizando óxido de manganeso (MnO_2), para ello se tomaron 5 mL de la muestra y adicionó 0.1 g de MnO_2 agitándolos por 15 minutos hasta la desaparición de burbujas y finalmente se filtraron nuevamente. El diagrama esquemático para el tratamiento de las aguas residuales se muestra en la Figura 11.

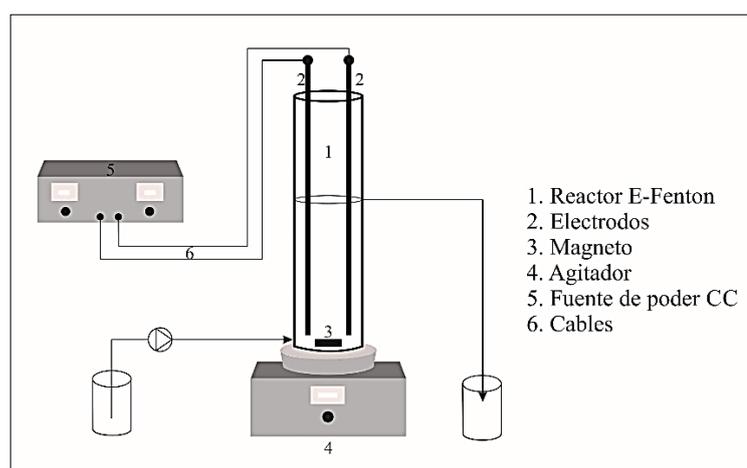


Figura 11. Imagen del montaje experimental del proceso del electro-Fenton

Fuente: Thirugnanasambandham *et al.* (2014)

- a) **Evaluación de los parámetros operacionales.** El efecto de los parámetros operacionales como el *pH* se evaluaron en el rango de 2 a 6, la corriente (C_e) de 500 a 1000 mA, la dosis de H_2O_2 (D) de 6 a 18 mL/L, el distanciamiento de electrodos (d_e) de 0.5 a 2 cm y un tiempo de tratamiento (t) variable manteniendo constante el volumen de muestra (V_m) de 500 mL, velocidad de agitación (A) de 200 rpm y temperatura ambiente (T) de 17 a 18 °C.
- b) **Diseño experimental.** Se utilizó el diseño experimental de Box-Behnken de 4 factores y tres niveles para el estudio de las variables independientes como el *pH* (x_1), densidad de corriente (x_2), dosis de H_2O_2 (x_3) y tiempo de tratamiento (x_4); y la variable dependiente fue el porcentaje de remoción de DQO (y) de las aguas residuales rojas. Las variables independientes y sus respectivos niveles se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Rangos y niveles de las variables independientes

| Variable (unidad) | Factores | | Nivel | |
|---|----------|-------|-------|-------|
| | X | -1 | 0 | 1 |
| <i>pH</i> , <i>pH</i> | x_1 | 3.50 | 5.00 | 6.50 |
| Densidad de corriente, i (mA.cm ⁻²) | x_2 | 17.86 | 23.81 | 29.76 |
| Dosis de H_2O_2 , D (mL/L) | x_3 | 6 | 10 | 14 |
| Tiempo de tratamiento, t (min) | x_4 | 15 | 30 | 45 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

El porcentaje de remoción de DQO fue calculada utilizando ecuación reportada por Paramo-vargas *et al.* (2015):

$$\text{Remoción de DQO (\%)} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100 \tag{60}$$

Donde DQO_i y DQO_f son las concentraciones de la demanda química de oxígeno (mg/L) inicial y final respectivamente. Las variables del proceso fueron codificadas a tres niveles (-1, 0 y +1) con la ecuación:

$$x_i = \frac{X_i - X_z}{\Delta X_i} \quad i = 1, 2, 3 \dots k \tag{61}$$

Donde x_i , es el valor adimensional de la variable independiente; X_i , X_z y ΔX_i es el valor real, en el punto central y la razón de cambio del valor de la variable independiente i respectivamente.

El número total de experimentos a realizarse se determinaron utilizando la ecuación (Thirugnanasambandham *et al.*, 2014):

$$N = 2K(K - 1) + C_0 \tag{62}$$

Donde, K es el número de variables o factores y C_0 es el número de puntos centrales. Se utilizó el modelo de regresión segundo orden para correlacionar los resultados experimentales.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \tag{63}$$

Donde y es la variable respuesta, x son las variables independientes y β_0 , β_i , β_{ii} y β_{ij} son las constantes lineales, cuadráticas y coeficientes de interacción respectivamente. Los regresores x_i , x_i^2 y $x_i x_j$ del modelo se evaluaron mediante el análisis de varianza, para ello se probaron las siguientes hipótesis nula y alterna:

$$H_0: \beta_i = \beta_{ii} = \beta_{ij} = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_{ii} \neq \beta_{ij} \neq 0 \quad \text{para al menos un } ii \text{ o } ij$$

También se verificó el grado de ajuste de los datos experimentales. Para ello se probaron las siguientes hipótesis:

$$H_0: \text{El modelo se ajusta de manera adecuada a los datos}$$

$$H_1: \text{el modelo no se ajusta en forma satisfactorial}$$

Las pruebas de hipótesis se realizaron empleando el estadístico Fisher (F_0). Para la evaluación de los regresores del modelo la regla de decisión es: Se rechazará la hipótesis nula H_0 si se cumple la desigualdad $F_0 > F_{\alpha, f_1, f_2}$ y para la verificación de ajuste al modelo se calculó F_0 con la Ecuación (64) según Montgomery (2004) la regla de decisión es la siguiente: Se aceptará la hipótesis nula H_0 si se cumple la desigualdad $F_0 < F_{\alpha, f_1, f_2}$ para probabilidades del 5%.

$$F_0 = \frac{\frac{SC_{FA}}{m-p}}{\frac{SC_{EP}}{n-m}} \tag{64}$$

Donde SC_{FA} y SC_{EP} son las sumas de cuadrados de la falta de ajuste y del error puro, $m-p$ y $n-m$ son los grados de libertad de la falta de ajuste y del error. El análisis estadístico se realizó con el paquete Design-Expert® Versión 7.0.0 2005.

3.5.4. Aplicación de prueba estadística inferencial

Para la determinación de los riesgos ambientales, las hipótesis se plantearon en relación a los resultados porcentuales de los riesgos ambientales en el entorno humano, natural y socioeconómico. Las hipótesis a probar fueron las siguientes:

$H_0: \mu = \mu_0$ (El nivel de riesgo de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri es moderado).

$H_1: \mu \neq \mu_0$ (El nivel de riesgo de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri no es moderado).

Para la evaluación del método de electro-Fenton, las hipótesis se plantearon en relación a las concentraciones de DQO obtenidas en la evaluación de los parámetros operacionales. Para ello probaron las siguientes hipótesis:

$H_0: \mu = \mu_0$ (Aplicando el método de electro-Fenton se remueve eficazmente la DQO hasta niveles establecido por la normatividad peruana).

$H_1: \mu < \mu_0$ (Aplicando el método de electro-Fenton se remueve eficazmente la DQO hasta niveles por debajo de lo establecido por la normatividad peruana).

La hipótesis nula se evaluó mediante la prueba de t de Student. Si la muestra es pequeña el estadístico de prueba t es la siguiente (Walpole, Myers y Myers, 1999).

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (65)$$

Donde \bar{x} es la media, s es la desviación estándar de la muestra y n el tamaño de muestra. La \bar{x} y s se calcularon con las Ecuaciones (66) y (67) considerando que: x_1, x_2, \dots, x_n representa una muestra aleatoria de tamaño n .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (66)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (67)$$

Regla de decisión: La hipótesis nula H_0 se rechazará si $t < t_{\alpha, n-1}$ (Tablas de distribución t de Student para una probabilidad α y grados de libertad $n - 1$).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación del riesgo ambiental de la evacuación de las aguas residuales

La determinación del nivel de riesgo ambiental de la evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri se realizó según la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del Ministerio del Ambiente (2010) (Anexo 1), para ello se identificaron de los peligros potenciales, se formularon los escenarios de riesgo, se estimaron la probabilidad de ocurrencia en cada uno de los escenarios, se estimaron la gravedad de las consecuencias en el entorno natural, humano y socioeconómico; y se evaluaron el riesgo ambiental.

4.1.1. Formulación del problema

Las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri son generadas en el lavado de la carne y limpieza de los pisos, seguidamente son evacuadas para su tratamiento con óxido de calcio (CaO). En la actualidad dicho tratamiento se realiza de manera deficiente es por ello que viene originando problemas de contaminación ambiental en las zonas aledañas al lugar alterando la calidad del agua, aire y suelo.

4.1.2. Identificación de peligros (causas y efectos)

Los peligros fueron identificados realizando visitas in situ a las instalaciones del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri para realizar la inspección visual a fin de recabar información de los elementos que constituyen peligro. En la Tabla 8 se presentan los peligros potenciales encontrados.

Tabla 8

Peligros potenciales de la evacuación de aguas residuales rojas

| Factor | Humano | Ecológico | Socioeconómico |
|-----------|---|---|--|
| Causas | Evacuación de aguas residuales rojas en el ambiente | Evacuación de aguas residuales rojas en el ambiente | Evacuación de aguas residuales rojas en el ambiente |
| Antrópico | Contaminación del agua, aire y suelo | Contaminación del agua, aire y suelo | Costos de disposición de residuos de tratamiento del agua y restauración del suelo |
| Efectos | Contaminación de aguas subterráneas | Contaminación de aguas subterráneas | Deprecia el valor comercial de las áreas colindantes |
| | Enfermedades de origen hídrico | Enfermedades de origen hídrico | Costos del tratamiento de enfermedades |

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.1.3. Escenario de riesgos y estimación de probabilidad de ocurrencia

Una vez identificados los peligros potenciales de la evacuación de las aguas residuales rojas, se formularon una serie de escenarios de riesgo para cada entorno en estudio, seguidamente se le asignó una puntuación llamada frecuencia de probabilidad según los criterios descritos en la Tabla 26 de la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del MINAM (2010) (Anexo 2). En las Tablas 9, 10 y 11 se muestran los escenarios formulados y la probabilidad de ocurrencia para el entorno humano, natural y socioeconómico.

Tabla 9

Escenario de riesgo y probabilidad de ocurrencia del entorno humano

| Entorno humano (Aire/Agua) | | | | | |
|--|---|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Zona | Sustancia o evento | Escenario de riesgo | Causas | Consecuencias | Frecuencia Probabilidad |
| Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | Sólidos totales suspendidos (STS) (grasa, pelo, carne suelta) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación del agua, aire y suelo | 3 |
| | Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación del agua | 4 |
| | Demanda química de oxígeno (DQO) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación del agua | 4 |
| | Nitrógeno total Kjeldalh (NTK) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación de aguas subterráneas | 4 |
| | Fósforo total (PT) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación de aguas subterráneas | 4 |
| | Turbiedad | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación de aguas subterráneas | 3 |
| | Virus, bacterias y parásitos | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Enfermedades de origen hídrico | 3 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 10

Escenario de riesgo y probabilidad de ocurrencia del entorno natural

| Entorno natural (Aire/Agua/Suelo) | | | | | |
|--|---|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Zona | Sustancia o evento | Escenario de riesgo | Causas | Consecuencias | Frecuencia Probabilidad |
| Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | Sólidos totales suspendidos (STS) (grasa, pelo, carne suelta) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación del agua, aire y suelo | 3 |
| | Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación del agua | 4 |
| | Demanda química de oxígeno (DQO) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación del agua | 4 |
| | Nitrógeno total Kjeldalh (NTK) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación de aguas subterráneas | 4 |
| | Fósforo total (PT) | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación de aguas subterráneas | 4 |
| | Turbiedad | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Contaminación de aguas subterráneas | 3 |
| | Virus, bacterias y parásitos | Evacuación de aguas residuales rojas | Proceso de faenado | Enfermedades de origen hídrico | 3 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 11

Escenario de riesgo y probabilidad de ocurrencia del entorno socioeconómico

| Entorno socioeconómico | | | | | |
|--|--|---|--------------------|--|--------------------------------|
| Zona | Sustancia o evento | Escenario de riesgo | Causas | Consecuencias | Frecuencia Probabilidad |
| Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | Sólidos totales suspendidos (STS) (grasa, pelo, carne suelta) | Formación de lixiviados contaminantes del suelo | Proceso de faenado | Costos de la disposición de residuos | 3 |
| | Focos de emisiones gaseosas como el CH ₄ y H ₂ S | Afectación de la calidad del aire | Proceso de faenado | Deprecia el valor comercial de las áreas colindantes | 4 |
| | Materia orgánica en las aguas residuales rojas | Alteración de la calidad del agua subterránea | Proceso de faenado | Costos de tratamiento del agua | 3 |
| | Materia orgánica en las aguas residuales rojas | Alteración de la disponibilidad de nutrientes y oxígeno del suelo | Proceso de faenado | Costos de restauración del suelo | 3 |
| | Agentes patógenos en las aguas residuales rojas | Afectación de la salud de las personas | Proceso de faenado | Costos del tratamiento de Enfermedades | 3 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.1.4. Estimación de la gravedad de las consecuencias

Se estimó los posibles daños y consecuencias en cada escenario de riesgo asignándolos puntuación para la cantidad, peligrosidad, extensión, población afectada, calidad del medio, patrimonio y capital productivo para los tres entornos según los criterios establecidos en las Tablas 29, 30 y 31 de la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del MINAM (2010) para el cálculo de la gravedad con las fórmulas de la Tabla 27.

Finalmente, para cada escenario se le asignó una puntuación de 1 a 5 a los resultados de la gravedad según la Tabla 32. Los resultados de estas evaluaciones para los tres entornos en estudio se muestran en las Tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12

Gravedad de las consecuencias del recurso aire, agua y suelo en el entorno humano

| ENTORNO HUMANO | | | | | | | |
|----------------|--|----------|--------------|-----------|--------------------|----------|------------------|
| N° | Escenario | Cantidad | Peligrosidad | Extensión | Población afectada | Gravedad | Puntuación total |
| 1 | Evacuación de aguas residuales rojas: STS | 1 | 2 | 1 | 2 | 8 | 2 |
| 2 | Evacuación de aguas residuales rojas: DBO ₅ | 1 | 3 | 2 | 2 | 11 | 3 |
| 3 | Evacuación de aguas residuales rojas: DQO | 1 | 3 | 2 | 2 | 11 | 3 |
| 4 | Evacuación de aguas residuales rojas: NTK | 1 | 3 | 2 | 2 | 11 | 3 |
| 5 | Evacuación de aguas residuales rojas: PT | 1 | 3 | 2 | 2 | 11 | 3 |
| 6 | Evacuación de aguas residuales rojas: Turbiedad | 1 | 2 | 1 | 2 | 8 | 2 |
| 7 | Evacuación de aguas residuales rojas: Virus, bacterias y parásitos | 1 | 4 | 3 | 2 | 14 | 3 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 13

Gravedad de las consecuencias del recurso aire, agua y suelo en el entorno natural

| ENTORNO NATURAL | | | | | | | |
|-----------------|--|----------|--------------|-----------|-------------------|----------|------------------|
| N° | Escenario | Cantidad | Peligrosidad | Extensión | Calidad del medio | Gravedad | Puntuación total |
| 1 | Evacuación de aguas residuales rojas: STS | 1 | 3 | 1 | 2 | 10 | 2 |
| 2 | Evacuación de aguas residuales rojas: DBO ₅ | 1 | 4 | 2 | 3 | 14 | 3 |
| 3 | Evacuación de aguas residuales rojas: DQO | 1 | 4 | 2 | 3 | 14 | 3 |
| 4 | Evacuación de aguas residuales rojas: NTK | 1 | 4 | 2 | 3 | 14 | 3 |
| 5 | Evacuación de aguas residuales rojas: PT | 1 | 4 | 2 | 3 | 14 | 3 |
| 6 | Evacuación de aguas residuales rojas: Turbiedad | 1 | 3 | 2 | 3 | 12 | 3 |
| 7 | Evacuación de aguas residuales rojas: Virus, bacterias y parásitos | 1 | 4 | 3 | 3 | 15 | 4 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 14

Gravedad de las consecuencias del recurso aire, agua y suelo en el entorno socioeconómico

| ENTORNO SOCIOECONÓMICO | | | | | | | |
|------------------------|---|----------|--------------|-----------|---------------------------------|----------|------------------|
| N° | Escenario | Cantidad | Peligrosidad | Extensión | Patrimonio y capital productivo | Gravedad | Puntuación total |
| 1 | Formación de lixiviados: Sólidos totales suspendidos | 1 | 2 | 2 | 2 | 9 | 2 |
| 2 | Afectación de la calidad del aire: Emisiones gaseosas | 1 | 3 | 3 | 3 | 13 | 3 |
| 3 | Alteración de la calidad del agua subterránea: Materia orgánica | 1 | 3 | 2 | 2 | 11 | 3 |
| 4 | Alteración de la disponibilidad de nutrientes y oxígeno del suelo: Materia orgánica | 1 | 3 | 1 | 2 | 10 | 2 |
| 5 | Afectación de la salud de las personas: Agentes patógenos | 1 | 4 | 2 | 3 | 14 | 3 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.1.5. Estimación del riesgo ambiental

Se procedió a elaborar tres tablas de doble entrada para cada uno de los entornos estudiados clasificándolos los escenarios en función de su riesgo. En la Figura 12 se muestra la probabilidad y la gravedad de los escenarios para cada entorno, donde los escenarios de accidente identificados muestran el siguiente riesgo ambiental:

- En el Entorno Humano: 7 de riesgos moderados.
- En el Entorno Natural: 7 de riesgos moderados.
- En el Entorno Socioeconómico: 5 de riesgos moderados.

En el Entorno Humano, los escenarios evacuación de aguas residuales rojas con STS (E1), evacuación de aguas residuales rojas con DBO₅ (E2), evacuación de aguas residuales rojas con DQO (E3), evacuación de aguas residuales rojas con NTK (E4), evacuación de aguas residuales rojas con PT (E5), evacuación de aguas residuales rojas con turbiedad (E6) y evacuación de aguas residuales rojas con virus, bacterias y parásitos (E7) presentan un riesgo moderado debido a que el espacio de influencia del impacto que afectan la calidad del agua y aire del entorno es puntual ya que las aguas residuales son tratadas deficientemente.

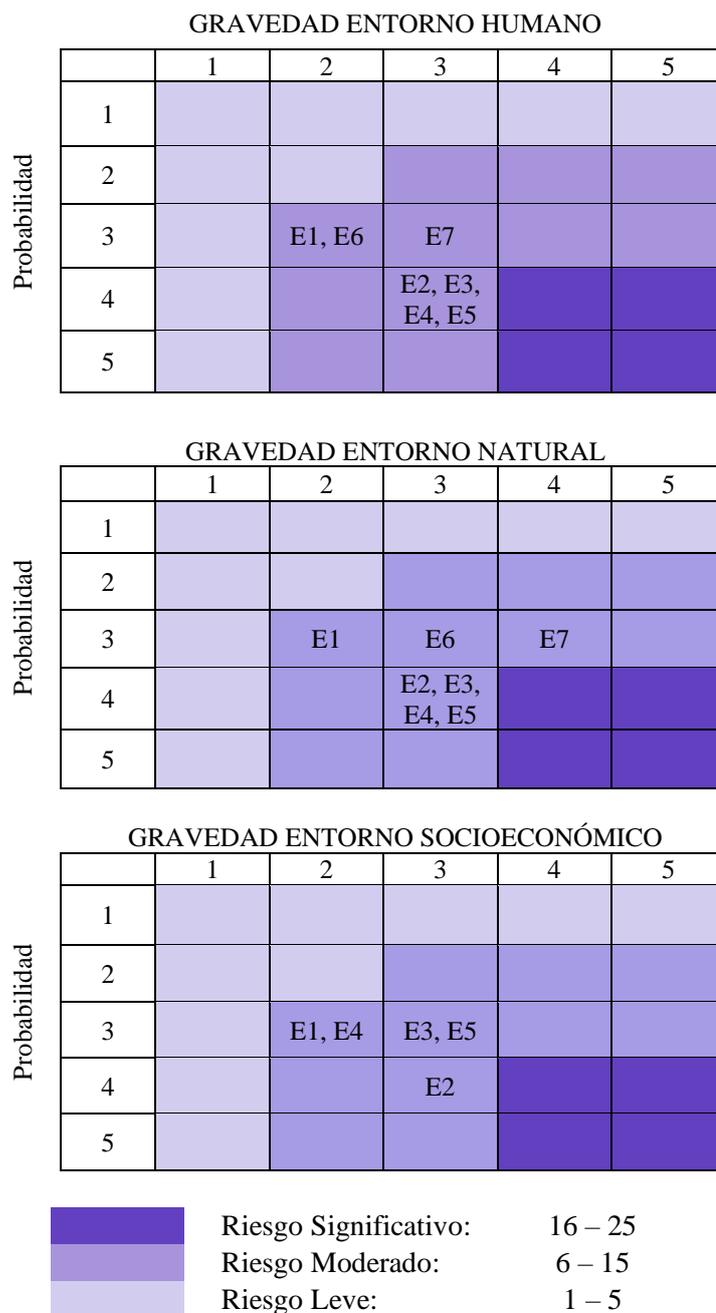


Figura 12. Distribución de riesgo en el entorno humano, natural y socioeconómico

En el Entorno Natural, los escenarios evacuación de aguas residuales rojas con STS (E1), evacuación de aguas residuales rojas con DBO₅ (E2), evacuación de aguas residuales rojas con DQO (E3), evacuación de aguas residuales rojas con NTK (E4), evacuación de aguas residuales rojas con PT (E5), evacuación de aguas residuales rojas con turbiedad (E6) y evacuación de aguas residuales rojas con virus, bacterias y parásitos (E7) al igual que en el entorno natural presentan un riesgo moderado.

En el Entorno Socioeconómico, los escenarios formación de lixiviados con STS (E1), afectación de la calidad del aire con emisiones gaseosas (E2), alteración de la calidad del agua subterránea con materia orgánica (E3), alteración de la disponibilidad de nutriente y oxígeno del suelo con materia orgánica (E4) y afectación de la salud de las personas con agentes patógenos (E5); al igual que los dos anteriores entornos, también presentó un nivel de riesgo moderado.

4.1.6. Evaluación del riesgo ambiental

La evaluación del riesgo ambiental consistió en la determinación del valor matricial como el resultado del producto de la frecuencia y la gravedad de las consecuencias de los escenarios identificados dentro de cada entorno evaluado, luego se le asignó un valor el valor porcentual de riesgo ambiental empleando la regla de equivalencia según las escalas de la Tabla 34 de la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del MINAM (2010). Los niveles de riesgo porcentual en cada uno de los escenarios se muestran en la Tabla 15, 16 y 17.

Tabla 15

Valores porcentuales del riesgo ambiental en el entorno humano

| ENTORNO HUMANO | | | | | |
|--|---|--------------------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Zona | Escenario | Frecuencia probabilidad | Gravedad Escenario humano | Valor matricial | % Riesgo ambiental |
| Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | Evacuación de aguas residuales rojas STS | 3 | 2 | 6 | 24.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas DBO ₅ | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas DQO | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas NTK | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas PT | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas Turbiedad | 3 | 2 | 6 | 24.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas Virus, bacterias y parásitos | 3 | 3 | 9 | 36.00 |
| PROMEDIO | | | | | 39.43 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 16

Valores porcentuales del riesgo ambiental en el entorno natural

| ENTORNO NATURAL | | | | | |
|--|---|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Zona | Escenario | Frecuencia probabilidad | Gravedad escenario natural | Valor matricial | % Riesgo ambiental |
| Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | Evacuación de aguas residuales rojas STS | 3 | 2 | 6 | 24.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas DBO ₅ | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas DQO | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas NTK | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas PT | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas Turbiedad | 3 | 3 | 9 | 36.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas Virus, bacterias y parásitos | 3 | 4 | 12 | 48.00 |
| PROMEDIO | | | | | 42.86 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 17

Valores porcentuales del riesgo ambiental en el entorno socioeconómico

| ENTORNO SOCIOECONÓMICO | | | | | |
|--|--|--------------------------------|--|------------------------|---------------------------|
| Zona | Escenario | Frecuencia probabilidad | Gravedad escenario socioeconómico | Valor matricial | % Riesgo ambiental |
| Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri | Formación de lixiviados Sólidos totales suspendidos | 3 | 2 | 6 | 24.00 |
| | Afectación de la calidad del aire Emisiones gaseosas | 4 | 3 | 12 | 48.00 |
| | Alteración de la calidad del agua subterránea Materia orgánica | 3 | 3 | 9 | 36.00 |
| | Alteración de la disponibilidad de nutrientes y oxígeno del suelo Materia orgánica | 3 | 2 | 6 | 24.00 |
| | Afectación de la salud de las personas Agentes patógenos | 3 | 3 | 9 | 36.00 |
| | PROMEDIO | | | | |

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.1.7. Caracterización del riesgo

La evaluación ambiental efectuada en el matadero municipal de la ciudad de Ayaviri, caracteriza el siguiente riesgo ambiental: Entorno Humano 39.43%, Entorno Natural 42.86% y Entorno Socioeconómico 33.60%.

$$CR = \frac{EH + EN + ES}{3} = \frac{39.43 + 42.86 + 33.60}{3} = 38.63\%$$

La evacuación de las aguas residuales tiene un Riesgo Ambiental del 38.63%, el cual es moderado, que amerita las medidas para mejorar su tratamiento, ya que su entorno poblacional, ambiental y socioeconómica son afectadas.

4.1.8. Prueba de hipótesis para la determinación de los riesgos ambientales

La prueba de hipótesis se realizó utilizando la prueba de *t* de Student para los resultados del porcentaje de riesgo ambiental de los escenarios en el entorno humano, natural y socioeconómico. Los riesgos porcentuales se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18

Valores porcentuales del riesgo ambiental de la evacuación de aguas residuales rojas

| Entorno | Escenario | % Riesgo ambiental |
|----------------|---|--------------------|
| Humano | Evacuación de aguas residuales rojas: STS | 24.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: DBO ₅ | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: DQO | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: NTK | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: PT | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: Turbiedad | 24.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: Virus, bacterias y parásitos | 36.00 |
| Natural | Evacuación de aguas residuales rojas: STS | 24.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: DBO ₅ | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: DQO | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: NTK | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: PT | 48.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: Turbiedad | 36.00 |
| | Evacuación de aguas residuales rojas: Virus, bacterias y parásitos | 48.00 |
| Socioeconómico | Formación de lixiviados: Sólidos totales suspendidos | 24.00 |
| | Afectación de la calidad del aire: Emisiones gaseosas | 48.00 |
| | Alteración de la calidad del agua subterránea: Materia orgánica | 36.00 |
| | Alteración de la disponibilidad de nutrientes y oxígeno del suelo: Materia orgánica | 24.00 |
| | Afectación de la salud de las personas: Agentes patógenos | 36.00 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

El nivel de riesgo moderado promedio según la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del MINAM (2010) es 42. Por consiguiente, se plantearon las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu = 42$$

$$H_1: \mu \neq 42$$

La media y la desviación estándar se determinó utilizando las Ecuaciones (66) y (67) y los resultados son:

$$\text{Datos: } \bar{x} = 39.158 \quad \mu_0 = 42 \quad s = 10.463 \quad n = 19$$

$$\text{El estadístico de prueba según la Ecuación (65) es: } t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{39.158 - 42.000}{\frac{10.463}{\sqrt{19}}} = -1.184$$

Según la tabla de distribución t de Student (Anexo 8) se tiene que para un nivel de probabilidad del $5\%/2$ y grados libertad 18 $t_{0.025, 18} = 2.101$. Realizando las comparaciones se tiene que $t < t_{0.025, 18}$. En la Figura 13 se observa que el t calculado se encuentra en la región de aceptación, entonces la decisión y conclusión fueron:

Decisión: Se acepta la hipótesis H_0 .

Conclusión: Se puede afirmar que el nivel de riesgo ambiental de la evacuación de las aguas residuales rojas es moderado con un nivel de probabilidad $\alpha = 5\%$.

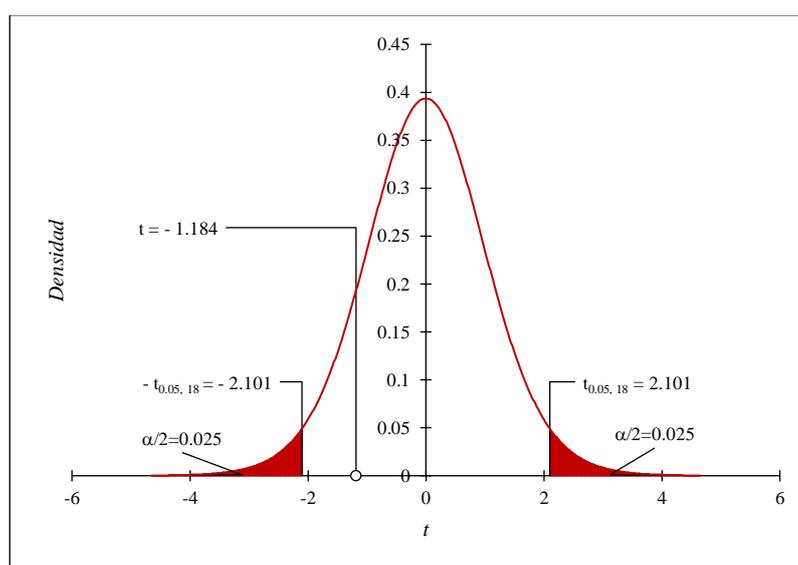


Figura 13. Curva de distribución t de Student para las hipótesis $H_0: \mu=42$ y $H_1: \mu \neq 42$

4.2. Tratamiento por el método de electro-Fenton para la remoción de DQO

4.2.1. Las aguas residuales rojas

Las muestras de agua residual roja del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri fueron analizadas siguiendo los procedimientos descritos por APHA, AWWA y WPCF (1989) “Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales” (Anexo 2), también fueron analizadas en un laboratorio acreditado por INACAL con Registro N° LE-050 (Anexo 10). Los resultados de los análisis realizados se muestran en la Tabla 19 donde existe similitud de ambos resultados.

Tabla 19

Características del agua residual roja

| Parámetro | Unidades | Valor | |
|----------------------------------|----------|-----------------|------------------------|
| | | Análisis propio | Laboratorio acreditado |
| Demanda química de oxígeno (DQO) | mg/L | 7641.60 | 7630.00 |
| Conductividad eléctrica | μS/cm | 1979.00 | 1990.00 |
| <i>pH</i> | - | 7.53 | 7.48 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

4.2.2. Evaluación de los parámetros de operación

En el tratamiento de las aguas residuales rojas por el método de electro-Fenton para la remoción de la concentración de la DQO se evaluaron el efecto del *pH*, corriente, dosis de H_2O_2 y distanciamiento de electrodos bajo condiciones específicas y tiempos de tratamientos variables.



Figura 14. Reactor electrolítico para el tratamiento de aguas residuales rojas por el método de electro-Fenton

En la Figura 14 se muestra el equipo utilizado para el tratamiento de las aguas residuales la cual estuvo compuesta de una celda electrolítica de material acrílico de un volumen de 500 mL, un par de electrodos de hierro como cátodo y ánodo de 2 mm de espesor y con un área efectiva de 42 cm² instaladas paralelamente, agitador magnético y una fuente de poder para la suministración de corriente continua. La muestra de agua residual roja del matadero tuvo una concentración de la DQO de 7641.60 mg/L. Las concentraciones finales de la DQO después del tratamiento por el método por el método de electro-Fenton tanto en la evaluación de los parámetros operacionales y diseño experimental fueron analizadas siguiendo los procedimientos descritos por APHA, AWWA y WPCF (1989) y por un laboratorio acreditado por INACAL (Anexo 10).

En este tratamiento se generó in situ los iones Fe^{2+} y Fe^{3+} por oxidación del ánodo de hierro (Fe^0) y reducción del agua en el cátodo según las siguientes ecuaciones descritas por Sillanpää y Shestakova (2017):

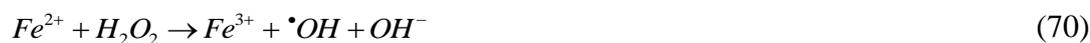
Reacción en el ánodo:



Reacción en el cátodo:



Bajo condiciones ácidas los iones Fe^{2+} y el H_2O_2 adicionada reaccionaron para la formación del radical $\cdot OH$ e iones Fe^{3+} y OH^- (Comninellis y Chen, 2010). Los radicales hidroxilos reaccionan con la materia orgánica hasta mineralizarlos a dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos (Andreozzi *et al.*, 1999).



4.2.2.1. Efecto del pH

El efecto de los *pH* estudiados fueron 2.10, 4.03 y 6.15. En el tratamiento se utilizó una corriente de 0.75 A, dosis de H_2O_2 (50%) de 12 mL/L y tiempos de tratamiento variable. En la Figura 15 a los 60 minutos de tratamiento y *pH* 4.03 se obtuvo una máxima remoción de la DQO de 384.00 mg/L. En relación a este parámetro Martínez-Huitle *et al.* (2018) sostienen que es uno de los más importantes del tratamiento de aguas residuales por electro-Fenton.

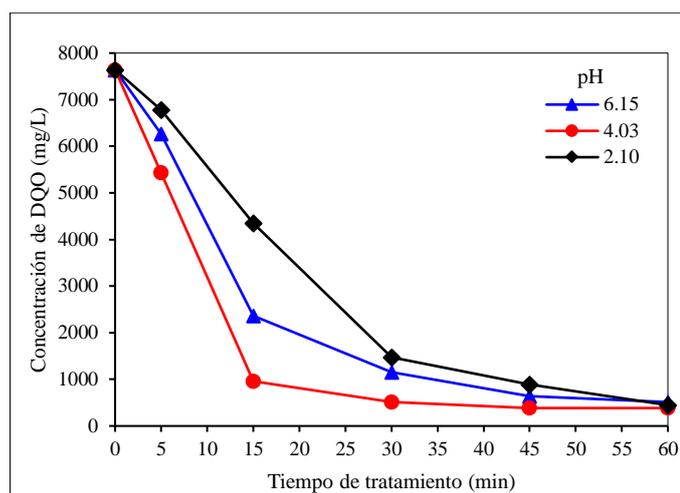


Figura 15. Efecto del pH para la remoción de DQO: $C_e=0.75$ A, $D=12$ mL/L, $d_e=1$ cm, $V_m=500$ mL, $A=200$ rpm y $T=17$ °C

En los tratamientos realizados en medios ácidos, Jiang y Zhang, (2007) señalan que los iones Fe^{2+} no pueden descomponer al H_2O_2 ocasionando baja producción de radicales $\cdot OH$; Bautista *et al.* (2007), Wang *et al.* (2008), Panizza y Cerisola (2009), y Salas (2010) reportaron que en el tratamiento de diferentes efluentes el pH óptimo estuvo alrededor de 3. A pH cercanos o superiores a la neutralidad Qiang *et al.* (2003) señalan que los iones Fe^{3+} precipitan como $Fe(OH)_3$ disminuyendo su concentración e imposibilitan su regeneración en el cátodo. En nuestros experimentos a pH 6.15 se observó bastante producción de espuma debido a la descomposición del H_2O_2 por la catalasa que posee la sangre de las aguas residuales donde hubo una lenta disminución de las concentraciones de la DQO.

4.2.2.2. Efecto de la corriente

El efecto de las corrientes evaluadas fue de 0.50, 0.75 y 1.00 A utilizando una dosis de H_2O_2 (50%) de 12 mL/L, pH 5.03, y tiempos de tratamiento variable. En la Figura 16 se graficaron los resultados obtenidos donde a los 60 minutos de tratamiento la máxima remoción de la DQO fue de 256.00 mg/L utilizando una corriente de 1.00 A. En relación a este parámetro, Akyol *et al.* (2013) sostienen que es un parámetro importante ya que esta controla la velocidad de reacción. Nidheesh y Gandhimathi (2012) afirman que se obtienen altos niveles de mineralización de la materia orgánica con el incremento de la corriente.

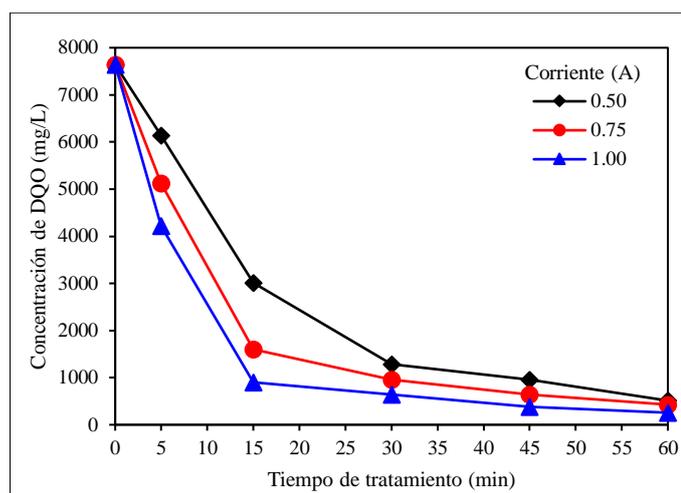


Figura 16. Efecto de la corriente para la remoción de DQO: $pH=5.03$, $D=12$ mL/L, $d_e=1$ cm, $V_m=500$ mL, $A=200$ rpm y $T=17$ °C

En los estudios realizados por Brillas *et al.* (2009) sostienen que la utilización de corrientes altas implica un excesivo consumo de energía eléctrica. En nuestros experimentos realizados se observó que los niveles de remoción de la DQO aumentaron con el incremento de la corriente.

4.2.2.3. Efecto de la dosis de H_2O_2

El efecto de las dosis de H_2O_2 (50%) evaluadas fueron de 6, 12 y 18 mL/L utilizando una de corriente de 0.75 A, pH 5.02 y tiempos de tratamientos variables. Según la Figura 17, a los 60 minutos de tratamiento se obtuvo una máxima remoción de la DQO de 320 mg/L para una dosis de H_2O_2 de 12 mL/L.

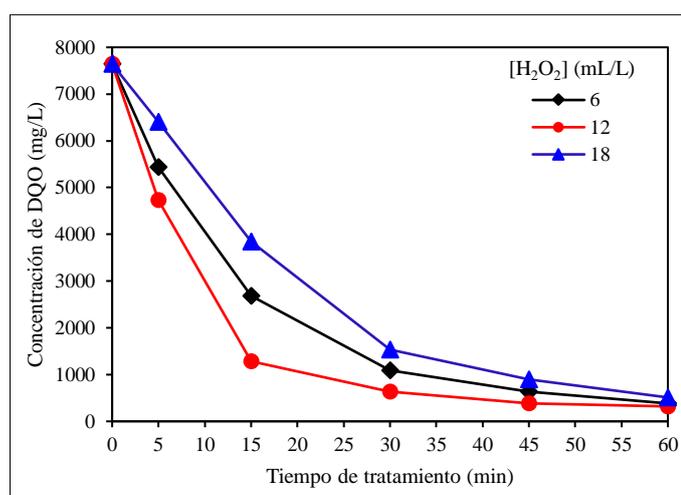


Figura 17. Efecto de la dosis de H_2O_2 para la remoción de DQO: $C_e=0.75$ A, $pH=5.02$, $d_e=1$ cm, $V_m=500$ mL, $A=200$ rpm y $T=18$ °C

La concentración de H_2O_2 es un parámetro que particularmente su utilización está relacionado con su costo (Akyol *et al.*, 2013). Para lograr altas remociones de la DQO Barrera (2014) sostiene que la relación Fe^{2+}/H_2O_2 debe ser óptima. Así mismo, Salas (2010) refiere que el uso excesivo de H_2O_2 conduce a una mayor producción de radicales $\cdot OH$, al respecto Rajeshwar y Ibanez (1997) manifiestan que la producción excesiva de radicales $\cdot OH$ oxidan al ion Fe^{2+} y descomponen al H_2O_2 . En nuestros experimentos una mayor dosis de H_2O_2 no favoreció en la remoción de la DQO. Por consiguiente, Salas (2010) señala que la concentración de H_2O_2 residual aporta toxicidad para el ambiente, lo que obliga a ajustar convenientemente su dosificación empleada de manera que los efluentes tratados no excedan los límites de vertido establecidos.

4.2.2.4. Efecto del distanciamiento de electrodos

El efecto del distanciamiento de electrodos evaluados fue de 0.5, 1.0 y 2.0 cm. En los tratamientos realizados se mantuvieron constante una corriente de 0.75 A, pH 5.03, dosis de H_2O_2 (50%) de 12 mL/L. Los resultados se graficaron en la Figura 18 en la que se destaca que a los 60 minutos de tratamiento tuvo lugar una máxima remoción de la DQO de 448.00 mg/L para un distanciamiento de electrodos de 1.00 cm. Al respecto Fockedey y Lierde (2002) sostienen que este parámetro es importante ya que de ello depende el voltaje aplicado.

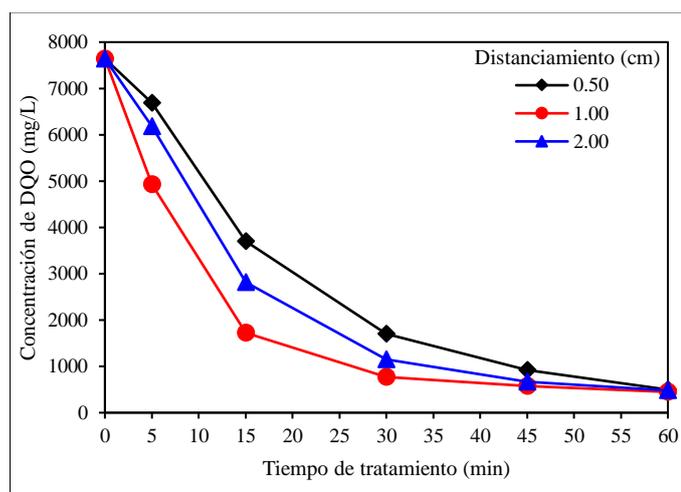


Figura 18. Efecto del distanciamiento de electrodos para la remoción de DQO: $C_e = 0.75$ A, $pH = 5.03$, $D = 12$ mL/L, $V_m = 500$ mL, $A = 200$ rpm y $T = 18$ °C

Para la instalación de los electrodos, Jiang y Zhang (2007) recomiendan que estas deben mantener un distanciamiento apropiado para evitar cortos circuitos. Además, Zhang *et al.* (2006) refieren que a una pequeña separación de estos, los iones Fe^{2+} tienden a oxidarse fácilmente a Fe^{3+} en el ánodo. Así mismo, Atmaca (2009) señala que el aumento o disminución del distanciamiento de electrodos representarán altos y bajos costos de consumo de energía respectivamente y en sus estudios realizados reportó que a un distanciamiento de electrodos de 1 cm el porcentaje de remoción de la DQO fue del 66.5% a pH 3, corriente de 2 A y concentración de H_2O_2 de 0.059 mol/L. Zhang *et al.* (2006) reportaron que a un distanciamiento de 2 cm el porcentaje de remoción de la DQO fue del 81% a un pH 3, corriente de 2 A, concentración de H_2O_2 0.34 mol/L y solución de $Fe(II)$ 0.028 mol/L.

En la evaluación de los parámetros operacionales a los 60 minutos de tratamiento las concentraciones de la DQO estuvieron por debajo del Límite Máximo Permissible (LMP) para la DQO (500 mg/L) para los efluentes de camales y plantas de beneficio según lo establecido en el Decreto Supremo 2009-MINAM.

4.2.2.5. Prueba de hipótesis para la evaluación del método de electro-Fenton

La prueba de hipótesis se realizó al conjunto de resultados de las concentraciones finales de la DQO obtenidos en la evaluación de los parámetros de operacionales del método de electro-Fenton para un tiempo de tratamiento de 60 minutos las que son mostradas en la Tabla 20.

Tabla 20

Valores máximos de remoción de la DQO del tratamiento por electro-Fenton

| Parámetro | Valor | [DQO] _f (mg/L) |
|---------------------------------|-------|---------------------------|
| pH | 2.10 | 448.00 |
| | 4.03 | 384.00 |
| | 6.15 | 512.00 |
| Corriente (A) | 0.50 | 512.00 |
| | 0.75 | 426.67 |
| | 1.00 | 256.00 |
| Dosis de H_2O_2 (mL/L) | 6.00 | 384.00 |
| | 12.00 | 320.00 |
| | 18.00 | 512.00 |
| Distancia entre electrodos (cm) | 0.50 | 497.78 |
| | 1.00 | 448.00 |
| | 2.00 | 480.00 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Para establecer la concentración promedio de la DQO en las aguas residuales, se tomó el valor establecido en el Decreto Supremo 2009-MINAM del cual se tiene las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu = 500$$

$$H_1: \mu < 500$$

La media aritmética y la desviación estándar fueron calculados empleando las ecuaciones (66) y (67) cuyos resultados son los siguientes:

Datos: $\bar{x} = 431.704$ $\mu_0 = 500$ $s = 82.296$ $n = 12$

El estadístico de prueba según la ecuación (65) es:
$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{430.6190 - 500}{\frac{82.5270}{\sqrt{12}}} = -2.875$$

Según la tabla de distribución t de Student (Anexo 8) se tiene que para un nivel de probabilidad (α) 5% y grados libertad (ν) 11 el estadístico $t_{0.05,11} = -1.796$. Realizando las comparaciones $t(-2.875) > t_{0.05,11}(-1.796)$.

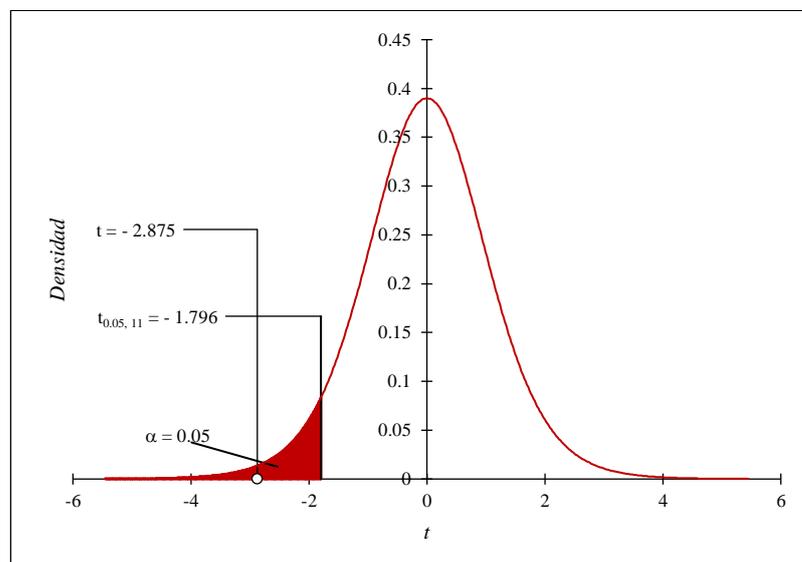


Figura 19. Curva de distribución t de Student para las hipótesis $H_0: \mu=500$ y $H_1: \mu<500$

Gráficamente se observa en la Figura 19 que el t calculado se encuentra en la región de rechazo. Por consiguiente, se tomó la siguiente decisión y conclusión:

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alterna H_1 .

Conclusión: En el Decreto Supremo 2009-MINAM, se establece que el Límite Máximo Permisible para la DQO en efluentes de matadero es igual a 500 mg/L. Por lo tanto, se puede afirmar que la concentración promedio de la DQO de las aguas residuales rojas tratadas por el método de electro-Fenton es menor a 500 mg/L con un nivel de probabilidad $\alpha = 5\%$.

4.2.3. Análisis estadístico y modelización

En la Tabla 21 se muestran los resultados experimentales del porcentaje de remoción de DQO calculados con los resultados de las concentraciones finales de la DQO reportadas en el Anexo 3 utilizando la Ecuación (60).

Tabla 21

Matriz del diseño experimental de Box-Behnken para la remoción de DQO

| N° | pH | i (mA/cm ²) | D (mL/L) | t (min) | Remoción de DQO (%) |
|----|------|---------------------------|----------|---------|---------------------|
| 1 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 93.75 |
| 2 | 6.50 | 23.81 | 10.00 | 15 | 84.26 |
| 3 | 5.00 | 17.86 | 10.00 | 45 | 85.19 |
| 4 | 5.00 | 29.76 | 14.00 | 30 | 91.62 |
| 5 | 3.50 | 17.86 | 10.00 | 30 | 88.20 |
| 6 | 6.50 | 23.81 | 10.00 | 45 | 82.41 |
| 7 | 6.50 | 23.81 | 6.00 | 30 | 81.94 |
| 8 | 5.00 | 29.76 | 6.00 | 30 | 87.32 |
| 9 | 5.00 | 23.81 | 6.00 | 45 | 85.22 |
| 10 | 6.50 | 17.86 | 10.00 | 30 | 86.11 |
| 11 | 3.50 | 29.76 | 10.00 | 30 | 94.42 |
| 12 | 5.00 | 17.86 | 14.00 | 30 | 83.33 |
| 13 | 3.50 | 23.81 | 6.00 | 30 | 88.10 |
| 14 | 3.50 | 23.81 | 10.00 | 15 | 80.86 |
| 15 | 5.00 | 23.81 | 6.00 | 15 | 81.85 |
| 16 | 6.50 | 23.81 | 14.00 | 30 | 88.89 |
| 17 | 3.50 | 23.81 | 14.00 | 30 | 87.50 |
| 18 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 94.23 |
| 19 | 5.00 | 29.76 | 10.00 | 15 | 83.25 |
| 20 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 94.61 |
| 21 | 3.50 | 23.81 | 10.00 | 45 | 93.06 |
| 22 | 5.00 | 23.81 | 14.00 | 15 | 79.17 |
| 23 | 6.50 | 29.76 | 10.00 | 30 | 90.23 |
| 24 | 5.00 | 23.81 | 14.00 | 45 | 88.75 |
| 25 | 5.00 | 17.86 | 10.00 | 15 | 84.17 |
| 26 | 5.00 | 17.86 | 6.00 | 30 | 85.71 |
| 27 | 5.00 | 29.76 | 10.00 | 45 | 93.94 |
| 28 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 94.70 |
| 29 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 92.95 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

En la Tabla 21 se destaca que el mínimo y máximo porcentaje de remoción de la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri fueron del 79.17% (Experimento N° 22) y 94.70% (Experimento N° 28) respectivamente. Los resultados del diseño experimental de Box-Behnken fueron analizados utilizando el paquete estadístico Design-Expert® 7.0.0 2005 considerando el coeficiente de correlación (R^2), análisis de varianza y diagramas de superficie de respuesta y contorno.

4.2.3.1. Desarrollo de modelo de regresión

Los resultados obtenidos del Diseño de Box-Behnken fueron ajustados al modelo de regresión de segundo orden (Ecuación 63). Para el cálculo de los coeficientes del modelo se transformaron las variables naturales a variables codificadas (-1, 0 y 1) mediante la Ecuación (61) y estos se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22

Coefficientes del modelo de regresión de segundo orden

| Factor | Coefficiente estimado |
|-------------|-----------------------|
| Intercepto | 94.05 |
| x_1 : pH | -1.53 |
| x_2 : i | 2.34 |
| x_3 : D | 0.76 |
| x_4 : t | 2.92 |
| x_1x_2 | -0.52 |
| x_1x_3 | 1.89 |
| x_1x_4 | -3.51 |
| x_2x_3 | 1.67 |
| x_2x_4 | 2.42 |
| x_3x_4 | 1.55 |
| x_1^2 | -2.76 |
| x_2^2 | -1.82 |
| x_3^2 | -4.83 |
| x_4^2 | -5.74 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Reemplazando los coeficientes de la Tabla 22 en la ecuación (63) tenemos el modelo empírico final desarrollado para el entendimiento correlacional entre las variables en términos de sus variables codificadas:

$$y = 94.05 - 1.53x_1 + 2.34x_2 + 0.76x_3 + 2.92x_4 - 2.76x_1^2 - 1.82x_2^2 - 4.83x_3^2 - 5.74x_4^2 - 0.52x_1x_2 + 1.89x_1x_3 - 3.51x_1x_4 + 1.67x_2x_3 + 2.42x_2x_4 + 1.55x_3x_4 \quad (71)$$

4.2.3.2. Análisis de varianza

En la Tabla 23 se muestra el análisis de varianza para la evaluación de la significancia de todos los efectos e interacciones del modelo de regresión de segundo orden (Ecuación 71) para un nivel de probabilidad del 5%. Las hipótesis a probar fueron las siguientes:

$$H_0: \beta_i = \beta_{ii} = \beta_{ij} = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_{ii} \neq \beta_{ij} \neq 0 \quad \text{para al menos un } i, ii \text{ o } ij$$

Tabla 23

Resultados del análisis de varianza para el modelo de remoción de DQO

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadrados medios | F_0 | $F_{(0.05,1,14)}$ |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|--------|-------------------|
| Modelo | 627.22 | 14 | 44.80 | 57.54 | |
| $x_1: pH$ | 27.91 | 1 | 27.91 | 35.84 | 4.60 |
| $x_2: i$ | 65.66 | 1 | 65.66 | 84.33 | 4.60 |
| $x_3: D$ | 6.93 | 1 | 6.93 | 8.90 | 4.60 |
| $x_4: t$ | 102.14 | 1 | 102.14 | 131.19 | 4.60 |
| x_1x_2 | 1.10 | 1 | 1.10 | 1.42 | 4.60 |
| x_1x_3 | 14.25 | 1 | 14.25 | 18.30 | 4.60 |
| x_1x_4 | 49.35 | 1 | 49.35 | 63.38 | 4.60 |
| x_2x_3 | 11.16 | 1 | 11.16 | 14.33 | 4.60 |
| x_2x_4 | 23.38 | 1 | 23.38 | 30.02 | 4.60 |
| x_3x_4 | 9.64 | 1 | 9.64 | 12.38 | 4.60 |
| x_1^2 | 49.26 | 1 | 49.26 | 63.26 | 4.60 |
| x_2^2 | 21.41 | 1 | 21.41 | 27.50 | 4.60 |
| x_3^2 | 151.21 | 1 | 151.21 | 194.20 | 4.60 |
| x_4^2 | 213.48 | 1 | 213.48 | 274.19 | 4.60 |
| Residual | 10.90 | 14 | 0.78 | | |
| Falta de ajuste | 8.83 | 10 | 0.88 | 1.71 | |
| Error puro | 2.07 | 4 | 0.52 | | |
| Error | 638.12 | 28 | | | |

$$R^2 = 0.9829 \quad R^2 \text{ ajustada} = 0.9658$$

Fuente: Elaboración propia (2018).

Según la Tabla de puntos porcentuales de la distribución F (Anexo 9) se tiene que para un nivel de confianza del 95%, grados de libertad del numerador (v_1) 1 y grados de libertad del denominador (v_2) 14 el estadístico $F_{0.05,1,14}$ es igual a 4.60. Entonces, comparando el estadístico $F_{0.05,1,14}$ con los resultados de F_0 de la Tabla 23 se observa que las variables como el $pH(x_1)$, densidad de corriente (x_2), dosis de H_2O_2 (x_3), tiempo de tratamiento (x_4) y las interacciones: x_1x_3 , x_1x_4 , x_2x_3 , x_2x_4 , x_3x_4 , x_1^2 , x_2^2 , x_3^2 y x_4^2 fueron significativas ($F_0 > F_{0.05,1,14}$). La interacción x_1x_2 no fue significativa ($F_0 < F_{0.05,1,14}$).

Por lo tanto, según los resultados obtenidos se tomó la siguiente decisión y conclusión:

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alterna H_1 .

Conclusión: Se puede afirmar que la mayoría de los regresores contribuyen de manera significativa al modelo de regresión con un nivel de probabilidad del 5%.

Por consiguiente, el modelo de regresión de segundo orden se reduce a la siguiente expresión en términos de sus variables codificadas (Ecuación 72) y variables codificadas (Ecuación 73):

$$y = 94.05 - 1.53x_1 + 2.34x_2 + 0.76x_3 + 2.92x_4 - 2.76x_1^2 - 1.82x_2^2 - 4.83x_3^2 - 5.74x_4^2 + 1.89x_1x_3 - 3.51x_1x_4 + 1.67x_2x_3 + 2.42x_2x_4 + 1.55x_3x_4 \quad (72)$$

$$\begin{aligned} \text{Remoción de DQO (\%)} = & +5.329 + 12.768 \text{ pH} + 1.323 i + 2.210 D + 1.601 t - 1.225 \text{ pH}^2 \\ & - 0.051 i^2 - 0.302 D^2 - 0.025 t^2 + 0.315 \text{ pH}D - 0.156 \text{ pH}t \\ & + 0.070 iD + 0.027 it + 0.026 Dt \end{aligned} \quad (73)$$

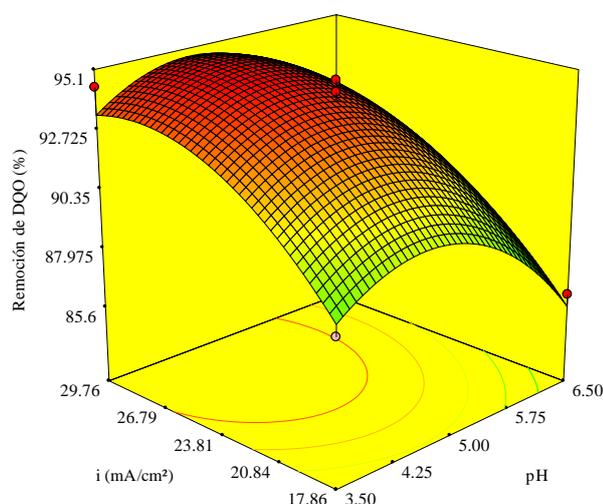
4.2.3.3. Superficie de respuesta y gráfica de contorno para la remoción de DQO

En las Figuras 20 a 25 se representan las superficies de respuesta y gráficas de contorno de la Ecuación (73) para la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas. En la Figura 20 para una dosis de H_2O_2 (50%) de 10 mL/L y el tiempo de tratamiento de 30 minutos los porcentajes de remoción tienden a incrementarse con el aumento de la densidad de corriente y disminuye al aumentar el pH alcanzando remociones superiores al 93.44% en el rango de pH 3.50 a 5.75 y densidades de corriente de 21.43 a 29.76 mA/cm².

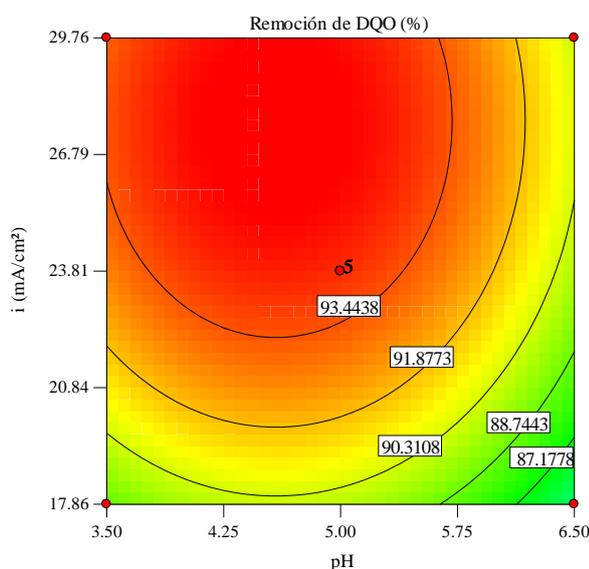
En la Figura 21 a una densidad de corriente de 23.81 mA/cm² y tiempo de tratamiento de 30 minutos existe varias combinaciones de dosis de H_2O_2 y pH que ocasionaron porcentajes de remoción del 92.30% en el intervalo de pH de 3.50 a 5.90 y dosis de H_2O_2 (50%) de 7.60 a 12.80 mL/L.

Según la Figura 22 a una densidad de corriente de 23.81 mA/cm² y dosis de H_2O_2 (50%) de 10 mL/L hay varias combinaciones de tiempo de tratamiento y pH para conseguir porcentajes de remoción del 92.67% en el rango de pH de 3.50 a 5.75 y tiempo de tratamiento de 25 a 45 minutos.

El *pH* es un parámetro muy importante ya que controla la oxidación de los compuestos orgánicos y la producción de los radicales $\cdot OH$ (Davarnejad y Nasiri, 2016). Por otro lado, Brillas *et al.* (2009) señalan que la naturaleza del ácido inorgánico utilizado para el ajuste del *pH* puede desempeñar un rol significativo en la energía de oxidación de la materia orgánica. Según Qiang *et al.* (2003) a *pH* altos el ion Fe^{3+} forma $Fe(OH)_3$ inhibiendo la regeneración de los iones Fe^{2+} , Bautista *et al.* (2007) sostienen que se forman otros complejos de $Fe(II)$ y Davarnejad y Nasiri (2016) señalan que el H_2O_2 no produce radicales $\cdot OH$.

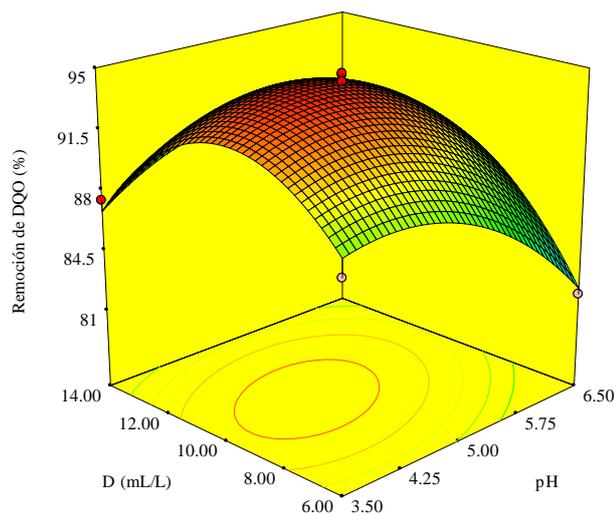


a) Superficie de respuesta

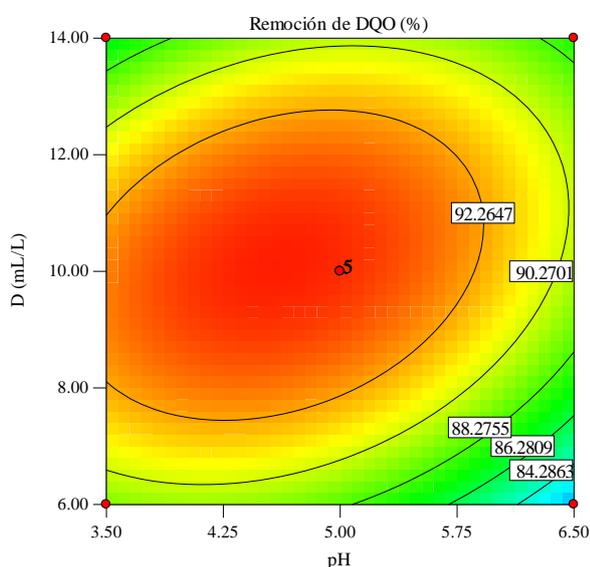


b) Gráfica de contorno

Figura 20. Efecto de la densidad de corriente y *pH* para la remoción de DQO: *D* = 10 mL/L y *t* = 30 min



a) Superficie de respuesta



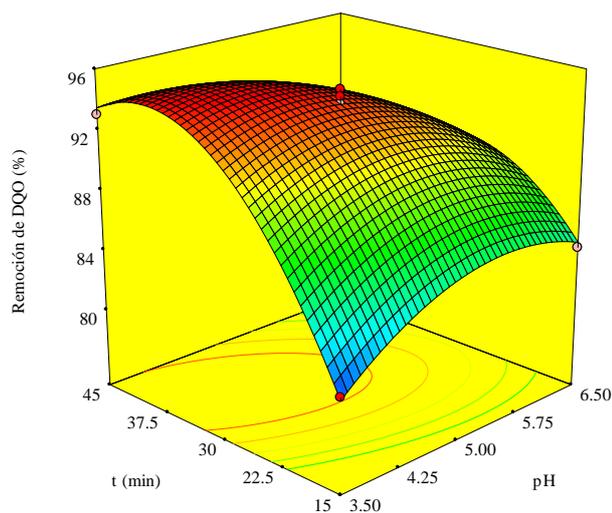
b) Gráfica de contorno

Figura 21. Efecto de la dosis de H₂O₂ y pH para la remoción de DQO: $i = 23.81 \text{ mA/cm}^2$ y $t = 30 \text{ min}$

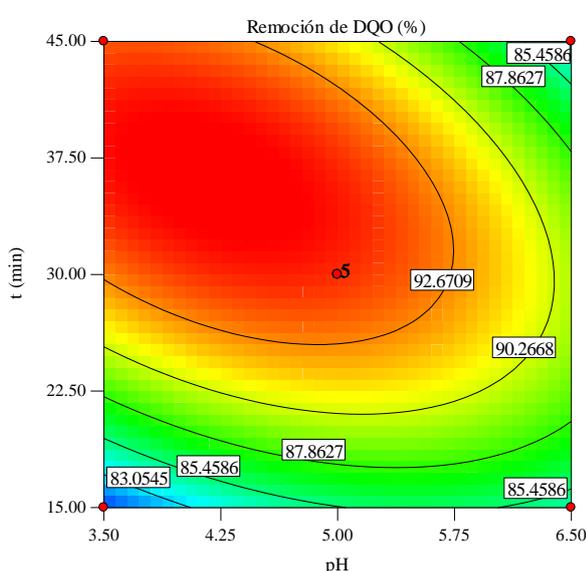
Así mismo, Qiang *et al.* (2002) manifiestan que un *pH* ácido ocasiona la formación de hidrógeno y disminuye la eficacia de la corriente según la siguiente reacción:



Para valores de $pH < 2$ los iones Fe^{2+} no pueden descomponer al H_2O_2 en radicales $\cdot OH$, el H_2O_2 captura un protón y se convierte en $H_3O_2^+$ la cual disminuye la velocidad de reacción entre el H_2O_2 y Fe^{2+} . Además, Davarnejad y Nasiri (2016) señalan que la carencia de radicales $\cdot OH$ disminuye la velocidad de oxidación de la materia orgánica. Por consiguiente, es debido a este fenómeno los bajos y altos porcentajes de remoción de la DQO en nuestros experimentos según las Figuras 20 a 22.



a) superficie de respuesta

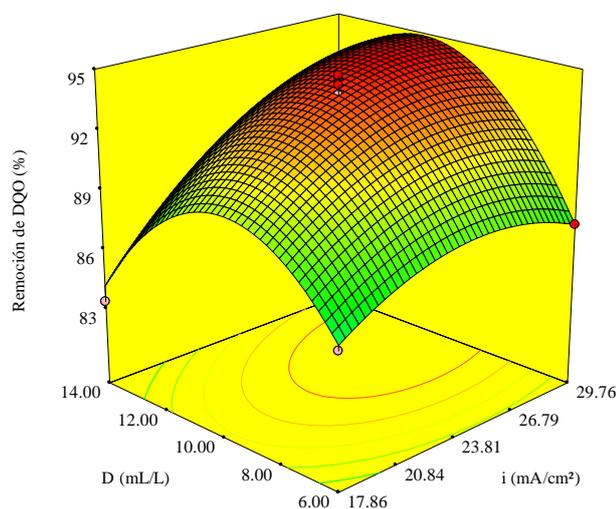


b) Gráfica de contorno

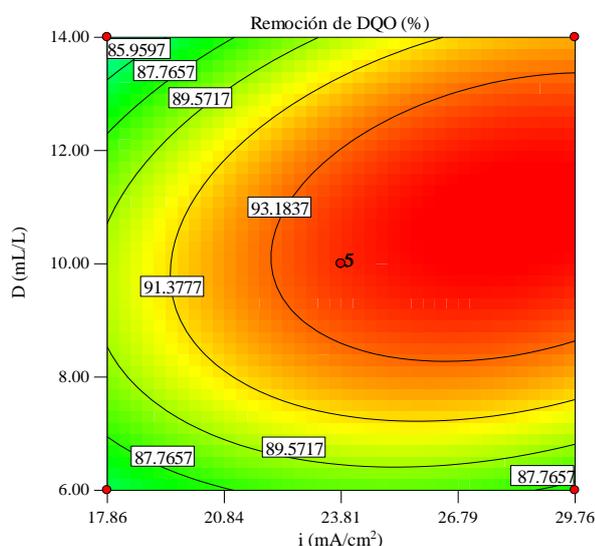
Figura 22. Efecto del tiempo de tratamiento y pH para la remoción de DQO: $i = 23.81 \text{ mA/cm}^2$ y $D = 10 \text{ mL/L}$

A su vez, Atmaca (2009) observó una disminución de la DQO del 64% en 30 minutos a pH 3 y con su incremento la remoción disminuyó en un 50%; Panizza y Cerisola (2009) reportaron que a pH 3 obtuvieron remociones del 93% en 4 horas de tratamiento; Ghosh *et al.* (2011) observaron que al aumentar el tiempo de tratamiento de 10 a 45 minutos el pH se incrementó de 3 a 6 respectivamente debido a la producción de hidrógeno en el cátodo y la concentración de iones hidróxido (OH^-) originados por las reacciones electroquímicas; Thirugnanasambandham *et al.* (2014) descompusieron eficazmente al H_2O_2 en el rango de pH de 1 a 3; y Davarnejad y Nasiri (2016) obtuvieron remociones del 94.14% a pH 4.38.

En la Figura 23 a pH 5.00 y tiempo de tratamiento de 30 minutos hay varias combinaciones de dosis de H_2O_2 y densidad de corriente que producirán porcentajes de remoción de la DQO del 93.18% en el intervalo de densidad de corriente de 22.00 a 29.76 mA/cm^2 y dosis de H_2O_2 de 8.40 a 13.5 mL/L .



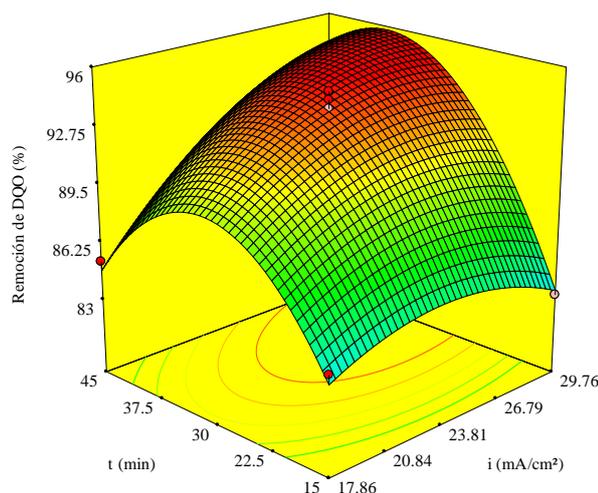
a) Superficie de respuesta



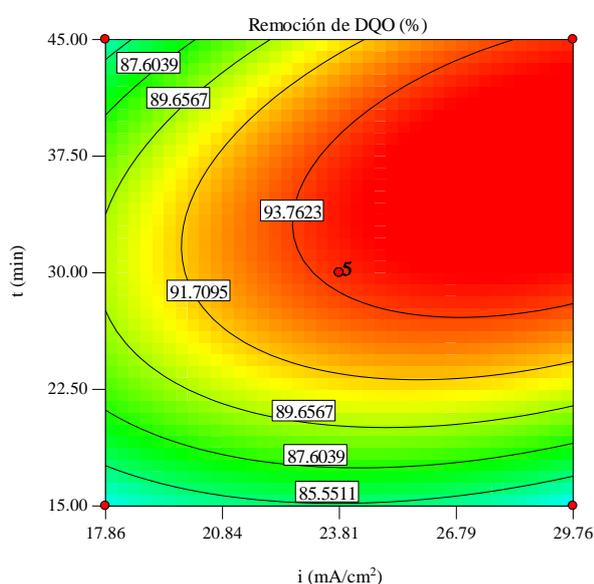
b) Gráfica de contorno

Figura 23. Efecto de la dosis de H_2O_2 y densidad de corriente para la remoción de DQO: $pH = 5$ y $t = 30$ min

La Figura 24 representa la superficie de respuesta y la gráfica de contorno del efecto del tiempo de tratamiento y densidad de corriente para la remoción de la DQO. A pH 5.0 y dosis de H_2O_2 (50%) de 10 mL/L , los porcentajes de remoción fueron del 93.76% en el intervalo de densidad de corriente de 22.85 a 29.76 mA/cm^2 y tiempo de tratamiento de 27.15 a 45.00 minutos.



a) Superficie de respuesta



b) Gráfica de contorno

Figura 24. Efecto del tiempo de tratamiento y densidad de corriente para la remoción de DQO: pH = 5 y D = 10 mL/L

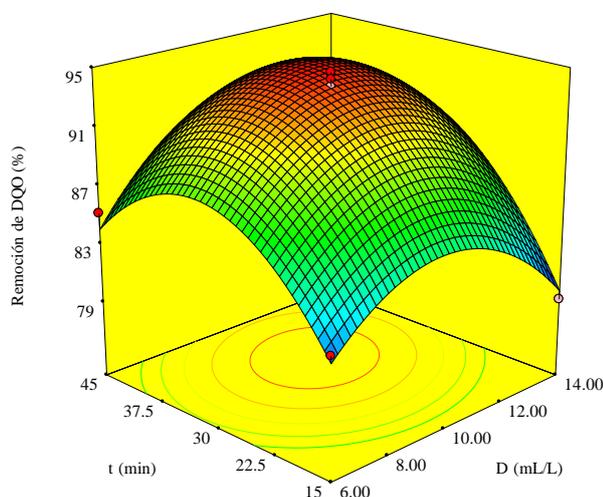
La densidad de corriente controla la velocidad de reacción de la generación del ion metálico y la formación de radicales hidroxilo, afectando directamente a la disolución anódica del electrodo de hierro (Davarnajad y Nasiri, 2016). En relación a este parámetro Ghosh *et al.* (2011) señalan que las elevadas corrientes producen oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. También, Nidheesh y Gandhimathi (2012) manifiestan que el decaimiento de las eficiencias del proceso pueden deberse a una mayor competitividad de reacciones en la celda electrolítica.



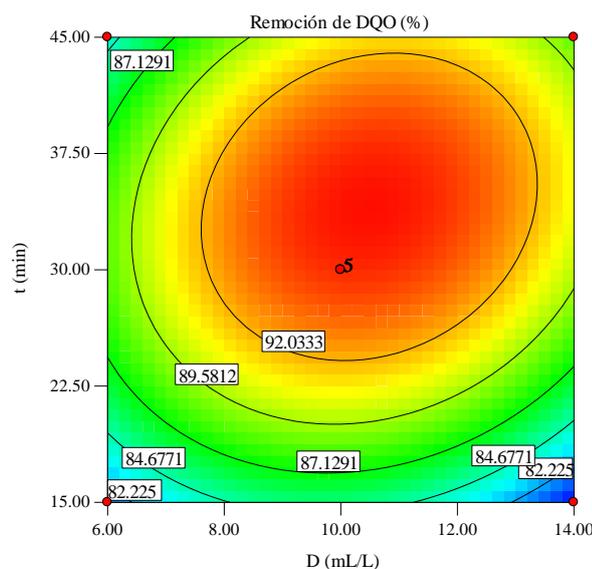
Además, el aumento de la corriente contribuye a la regeneración de los iones Fe^{3+} a Fe^{2+} según el diagrama de Pourbaix (Figura 3) con la cual se incrementa la producción de radicales $\cdot OH$ y la eficiencia de la reacción de Fenton según la ecuación:



En la Figura 25 se muestra la gráfica de la superficie de respuesta y de contorno del efecto del tiempo de tratamiento y dosis de H_2O_2 . A pH 5.0 y densidad de corriente de 23.81 mA/cm^2 se pueden lograr porcentajes de remoción del 92.00% en el intervalo de dosis de H_2O_2 (50%) de 7.60 a 13.30 mL/L y tiempo de tratamiento de 23.35 a 44.18 minutos.



a) Superficie de respuesta



b) Gráfica de contorno

Figura 25. Efecto del tiempo de tratamiento y dosis de H_2O_2 para la remoción de DQO: $pH = 5$ y $i = 23.81 \text{ mA/cm}^2$

En las Figuras 20, 23 y 24 la remoción de la DQO aumenta con el incremento de la densidad de corriente. En el estudio realizado por Atmaca (2009) observó un incremento de los niveles de remoción de la DQO con el aumento de la corriente que ocasionó mayor producción de iones Fe^{2+} siendo la óptima de 1 A y las corrientes altas disminuyeron la remoción de DQO debido a la lenta disolución de los contaminantes orgánicos adsorbidos por los flóculos de $Fe(OH)_n$ antes del muestreo. Además, Ghosh *et al.* (2011) reportaron que la remoción de DQO disminuye con el aumento de la densidad de corriente obteniendo una remoción del 88% a una corriente de 0.2 A (0.90 A/dm²) y a corrientes elevadas los porcentajes de remoción tuvieron una tendencia a seguir disminuyendo. En la investigación realizada por Nidheesh y Gandhimathi (2012) la remoción de DQO se incrementó con el aumento de la densidad de corriente. Así mismo, Thirugnanasambandham *et al.* (2014) reportaron que se redujo eficazmente la DQO de las aguas residuales a una densidad de corriente de 18 mA/cm².

La dosis de H_2O_2 desempeña un papel importante en estos procesos (Nidheesh y Gandhimathi, 2012). Según Neyens y Baeyens (2003) el H_2O_2 requiere de grandes cantidades de iones Fe^{2+} para descomponerse en radicales $\cdot OH$ además la velocidad de degradación de la materia orgánica puede ser mayor a medida que aumenta la concentración del oxidante y del catalizador; Nidheesh y Gandhimathi (2012) señalan que la remoción de los contaminantes se incrementa al aumentar la concentración de H_2O_2 debido a una mayor producción de los radicales hidroxilo como resultado de la adición de H_2O_2 ; y Atmaca (2009) sostiene que el H_2O_2 siendo la principal fuente de los radicales $\cdot OH$ producidos su incremento conlleva a reacciones parásitas según las Ecuaciones (78), (79) y (80) consideradas importantes ya que limitan la eficacia del método de electro-Fenton.



En nuestros experimentos se observó que una mayor dosis de H_2O_2 generó bastante espuma debido a la descomposición del H_2O_2 por la sangre presente en dichas aguas. En las Figuras 21, 23 y 25 se observa que al aumentar la dosis de H_2O_2 aumenta levemente los niveles de remoción de la DQO.

En los estudios realizados por Atmaca (2009), reportó que la remoción aumento hasta en un 74% al incrementar la dosis de 250 mg/L a 2500 mg/L; Ghosh *et al.* (2011) obtuvieron una remoción del 88% al utilizar dosis de 1530 mg/L en 50 minutos y mayores dosis (3825 mg/L) no aumentaron los niveles de remoción; y Thirugnanasambandham *et al.* (2014) reportaron una dosis óptima de 20 mL/L.

El tiempo de tratamiento es un factor que está relacionado con los porcentajes de degradación de la materia orgánica, ya que de ella depende la generación de iones Fe^{2+} según la ley de Faraday (Ecuación 53) para la descomposición del H_2O_2 y producción de radicales $\cdot OH$ (Comninellis y Chen, 2010).



En las Figuras 22, 24 y 25 se aprecia que el porcentaje de remoción de la DQO presentaron un incremento con el tiempo de tratamiento. En estudios realizados por Thirugnanasambandham y Sivakumar (2015), el tiempo represento un factor dominante para la remoción de la DQO siendo el óptimo de 20 minutos y mayores tiempos de tratamiento observaron una caída de los porcentajes de remoción debido a la excesiva producción de H_2O_2 que ocasionó la auto descomposición de esta en oxígeno y agua. Esta descomposición puede llevarse a cabo de acuerdo al diagrama de Pourbaix según la siguiente ecuación (Figura 4):



Davarnejad y Nasiri (2016) reportaron que la remoción de la DQO aumento con el tiempo de tratamiento hasta los 55.60 minutos y a mayor tiempo no hubo incrementos significativos.

4.2.3.4. Validación del modelo estadístico

Se verificó el grado de ajuste de los datos experimentales al modelo de regresión (Ecuación 72). Para ello se probaron las siguientes hipótesis:

H_0 : El modelo se ajusta de manera adecuada a los datos

H_1 : el modelo no se ajusta en forma satisfactoria

La Tabla 24 se elaboró con los resultados de la suma de cuadrados y grados de libertad de la falta de ajuste y el error puro de la Tabla 23 (Análisis de varianza).

Tabla 24

Bondad de ajuste del modelo de regresión

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | F_0 |
|---------------------|-------------------|--------------------|-------|
| Falta de ajuste | 8.83 | 10 | 1.71 |
| Error puro | 2.07 | 4 | |

Fuente: Elaboración propia (2018).

En la Tabla 24 se observa que el estadístico Fisher (F_0) calculado es igual a 1.71. Por otro lado, según la tabla de puntos porcentuales de la distribución F (Anexo 9), para un nivel de confianza del 95%, grados de libertad de la falta de ajuste (v_1) 10 y grados de libertad del error puro (v_2) 4 el estadístico $F_{0.05,10,4}$ es igual a 5.96, comparando estos datos $F_0 < F_{0.05,10,4}$. En consecuencia, analizando la desigualdad de los resultados obtenidos se toma la siguiente decisión y conclusión:

Decisión: Se acepta la hipótesis nula H_0 y se rechaza la hipótesis alterna H_1 .

Conclusión: Se puede afirmar que el modelo de regresión de segundo orden se ajusta a los datos experimentales con una $\alpha = 5\%$ y predice eficazmente la remoción de la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri.

4.2.3.5. Optimización del porcentaje de remoción de DQO

Para la estimación de las condiciones o valores de los parámetros de operación que maximizan el porcentaje de remoción de la DQO de las aguas residuales rojas se realizaron derivando parcialmente la ecuación del modelo de regresión de segundo orden (Ecuación 72) con respecto a las variables de operación.

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = -1.53 - 5.52x_1 + 1.89x_3 - 3.51x_4 = 0 \quad (83)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = 2.34 - 3.64x_2 + 1.67x_3 + 2.42x_4 = 0 \quad (84)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_3} = 0.76 - 9.66x_3 + 1.89x_1 + 1.67x_2 + 1.55x_4 = 0 \quad (85)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_4} = 2.92 - 11.48x_4 - 3.51x_1 + 2.42x_2 + 1.55x_3 = 0 \quad (86)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores, los valores óptimos en escala codificada fueron los siguientes:

$$x_1 = -0.67$$

$$x_2 = 1.29$$

$$x_3 = 0.29$$

$$x_4 = 0.77$$

Finalmente, transformando estos a valores reales, las condiciones óptimas de los parámetros controlables fueron:

$$pH = 3.99$$

$$i = 31.49 \text{ mA/cm}^2$$

$$D = 11.16 \text{ mL/L}$$

$$t = 41.55 \text{ min}$$

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación (73), se obtuvo el máximo porcentaje de remoción de DQO:

$$\text{Remoción de DQO } (\%)_{\text{máx}} = 98.42$$

CONCLUSIONES

Las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri contienen un alto nivel de carga orgánica expresada en una concentración de la DQO de 7641.60 mg/L que sobrepasan ampliamente los Límites Máximos Permisibles (500 mg/L) para efluentes de actividades agroindustriales como plantas de camales y plantas de beneficio establecido en el Decreto Supremo 2009-MINAM y a los Valores Máximos Admisibles (1000 mg/L) para la descarga de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado del Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, constituyendo un riesgo ambiental moderado. Según los resultados obtenidos en el tratamiento por el método de electro-Fenton, esta resultó ser viable para depuración las aguas residuales rojas con altas concentraciones de materia orgánica provenientes de mataderos.

La evacuación de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri presentó un nivel de riesgo ambiental porcentual del 38.63% considerado como moderado según la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales del Ministerio del Ambiente (2010). Los escenarios que mayor riesgo ambiental presentaron en el entorno humano y natural fueron la evacuación de aguas residuales rojas con DBO₅, DQO, nitrógeno y fósforo total; y el escenario afección de la calidad del aire con emisiones gaseosas presentó mayor riesgo en el entorno socioeconómico. El riesgo ambiental en el entorno humano, entorno natural y entorno socioeconómico fueron del 39.43%, 42.86% y 33.69% respectivamente.

En la evaluación del método de electro-Fenton se consiguió remover la DQO de las aguas residuales rojas del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri para el efecto del *pH*, corriente, dosis de H_2O_2 y distanciamiento de electrodos en un tiempo de tratamiento de 60 minutos hasta concentraciones finales de 384.00, 256.00, 320.00 y 448.00 mg/L respectivamente donde estas estuvieron por debajo del Límite Máximo Permissible según el Decreto Supremo 2009-MINAM. En el diseño experimental de Box-Behnken se obtuvo una máxima remoción de la DQO del 94.70% a un *pH* 5, densidad de corriente de 23.81 mA/cm², dosis de H_2O_2 10 mL/L y tiempo de tratamiento 30 minutos; y los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente al modelo de regresión de segundo orden con un nivel de confianza del 95%.

RECOMENDACIONES

Se recomienda estudiar el proceso de electro-Fenton para la electrogeneración de las dos especies involucradas en la reacción de Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) para hacer más factible su aplicación orientados al tratamiento de aguas residuales.

Se recomienda estudiar el efecto de la agitación y la temperatura en el proceso de tratamiento por electro-Fenton de las aguas residuales.

Para el análisis de la DQO se recomienda eliminar el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) residual en las muestras tratadas por procedimientos físicos o químicos.

Se recomienda determinar las concentraciones de hierro y peróxido de hidrógeno residual en las muestras tratadas de manera que estos no excedan ni aporten toxicidad para el ambiente.

Se recomienda realizar estudios referentes al tratamiento y la disposición final de los lodos generados en el proceso de electro-Fenton.

BIBLIOGRAFÍA

- Akyol, A., Taner, O., Demirbas, E., and Kobya, M. (2013). A comparative study of electrocoagulation and electro-Fenton for treatment of wastewater from liquid organic fertilizer plant. *Separation and Purification Technology*, 112, 11–19.
- Andreozzi, R., Caprio, V., Insola, A., and Marotta, R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Catalysis Today*, 53, 51–59.
- Anglada, A., Urriaga, A., and Ortiz, I. (2009). Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications. *J. Chem Technol Biotechnol*, 84, 1747–1755.
- APHA, AWWA, y WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Madrid, España: Ediciones Diaz de Santos.
- Asselin, M., Drogui, P., Benmoussa, H., and Blais, J. (2008). Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells. *Chemosphere*, 72, 1727-1733.
- Atmaca, E. (2009). Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 109–114.
- Awang, Z. B., Bashir, M. J. K., Kutty, S. R. M., and Isa, M. H. (2011). Post-treatment of slaughterhouse wastewater using electrochemical oxidation. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 12(2), 229–237.
- Barnett, J. (2007). Environmental security and peace. *Journal of Human Security*, 3(1), 4–16.
- Barrera, C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. México D.F., México: Editorial Reverté.
- Bautista, P., Mohedano, A. F., Gilarranz, M. A., Casas, J. A., and Rodríguez, J. J. (2007). Application of Fenton oxidation to cosmetic wastewaters treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 143, 128–134.
- Bovea, D., Alberola, M., García, N., Mulet, E., y Pérez, V. (2011). *Manual de seguridad e higiene industrial para la formación en ingeniería*. Castellò de la Plana, España: Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i.
- Brillas, E., Sirés, I., and Oturan, M. (2009). Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chem. Rev.*, 109, 6570–6631.
- Bugallo, P., Cristóbal, L., Agrelo, M., and Torres, R. (2014). Analysis of the slaughterhouses in Galicia (NW Spain). *Science of the Total Environment*, 481, 656–661.
- Bustillo-lecompte, C. F., and Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management*, 161, 287–302.

- Bustillo-lecompte, C. F., and Mehrvar, M. (2017). Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic-aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. *Journal of Cleaner Production*, 141, 278–289.
- Carrasquero, S., Marquina, D., Soto, J., Viloria, S., Pire, M., y Díaz, A. (2015). Remoción de nutrientes de aguas residuales de una matadero de reses usando un reactor biológico secuencial. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 43–60.
- Carriazo, J., Uribe, M., y Hernández, O. (2007). Diagramas de predominancia, de Frost y de Pourbaix: Tres contextos para desarrollar competencias en procesos de óxido-reducción. *Scientia Et Technica*, XIII(34), 569–574.
- Chandra, P., Venkata, S., and Jayarama, S. (2004). Electrochemical processes for the remediation of wastewater and contaminated soil: emerging technology. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63(1), 11–19.
- Chiang, L.-C., Chang, J.-E., and Wen, T.-C. (1995). Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate. *Water Research*, 29(2), 671–678.
- Cominellis, C., and Chen, G. (2010). *Electrochemistry for the environment*. New York, United States: Springer-Verlag New York Inc.
- Contreras, A., y Molero, M. (2009). *Ciencia y Tecnología del Medioambiente* (Segunda Re). Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Davarnejad, R., and Nasiri, S. (2016). Slaughterhouse wastewater treatment using an advanced oxidation process: Optimization study. *Environmental Pollution*, 1–10.
- Decreto Legislativo N° 613 (1990). *Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales*. Disponible en: <http://www.oas.org/dsd/FIDA/laws/legislation/peru/peru.pdf>
- Decreto Supremo 2009-MINAM (2009). *Aprueba Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Actividades Agroindustriales tales como Planta de Camales y Plantas de Beneficio*. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/311089/lmp_camales.pdf
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM (2010). *Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento Residuales Domésticas o Municipales*. Normas legales. Diario Oficial El Peruano. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>
- Decreto Supremo N° 015-2012-AG (2012). *Aprueban el Reglamento Sanitario del Faenado de Animales de Abasto*. Normas legales. Diario Oficial El Peruano. Disponible en: https://www.minagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normas legales/decretossupremos/2012/ds_015-2012-ag_segma.pdf
- Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM (2015). *Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación*. Normas legales. Diario Oficial El Peruano. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/12/Decreto-Supremo-N%C2%B0-015-2015-MINAM.pdf>

- Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA (2019). *Decreto Supremo que Aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las Descargas a Aguas Residuales No Domésticas en el Sistema de Alcantarillado Sanitario*. Normas legales. Diario Oficial El Peruano. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019vivienda>
- Delahay, P., Pourbaix, M., y Van Rysselberghe, P. (1950). Potential-pH diagrams. *Journal of Chemical Education*, 27(12), 683–688.
- Elías, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales - Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora* (2nd ed.). Madrid, España: Díaz de Santos, S.A.
- Elliott, L. (2015). Human security/environmental security. *Contemporary Politics*, 21(1), 11–24.
- Feng, C., Sugiura, N., and Shimada, S. (2003). Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials*, 103, 65–78.
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147–170.
- Fockedey, E., and Lierde, A. Van. (2002). Coupling of anodic and cathodic reactions for phenol electro-oxidation using three-dimensional electrodes. *Water Research*, 36, 4169–4175.
- Ghosh, P., Samanta, A. N., and Ray, S. (2011). Reduction of COD and removal of Zn²⁺ from rayon industry wastewater by combined electro-Fenton treatment and chemical precipitation. *Desalination*, 266, 213–217.
- INDECOPI. (2012). *NTP-ISO 5667-10 2012. Calidad de Agua. Muestreo. Parte 10: Guía para el muestreo de aguas residuales*. Lima.
- Jiang, C., and Zhang, J. (2007). Progress and prospect in electro-Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 8(7), 1118–1125.
- Jørgensen, S. E., and Fath, B. D. (2008). *Encyclopedia de ecology*. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science & Technology.
- Jüttner, K., Galla, U., and Schemieder, H. (2000). Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. *Electrochimica Acta*, 45, 2575–2594.
- Ley N° 28611. *Ley General del Ambiente*, publicado el 15 de octubre del 2005. Perú. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/ley-general-del-ambiente.pdf>
- Ley N° 29338. *Ley de Recursos Hídricos*, publicado el 31 de marzo del 2009. Perú. Disponible en: <http://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/228/ANA0000044.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lopez, R., y Casp, A. (2004). *Tecnología de mataderos*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.

- Marcos, A., Al-kassir, A., López, F., Cuadros, F., and Brito, P. (2012). Environmental treatment of slaughterhouse wastes in a continuously stirred anaerobic reactor: Effect of flow rate variation on biogas production. *Fuel Processing Technology*, 103, 178–182.
- Martínez-Huitle, C., and Ferro, S. (2006). Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes. *Chem. Soc. Rev.*, 35, 1324–1340.
- Martínez-Huitle, C., Rodrigo, M., and Scialdone, O. (2018). *Electrochemical water and wastewater treatment*. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Martínez, J., Borzacconi, L., Mallo, M., Galisteo, M., and Viñas, M. (1995). Treatment of slaughterhouse wastewater. In *Water Science and Technology* (Vol. 32).
- Martínez, O., Ramírez, J., and Toledo, M. (2013). Total organic carbon removal from a chemical lab's wastewater using Fenton's reagent. *Ingeniería e Investigación*, 33(2), 30–35.
- Medina, C., Montero, E., y Cruz, L. (2016). Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 82(4), 454–466.
- Metcalf, and Eddy. (2004). *Wastewater Engineering-Treatment and Reuse* (Fourth). USA: McGraw Hill.
- Meza, S. (2009). *Higiene y seguridad industrial* (Tercera). México: Instituto Politécnico Nacional.
- Ministerio del Ambiente (MINAM) (2010). *Guía de evaluación de riesgos ambientales*. Disponible en: http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/guia_riesgos_ambientales.pdf
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (2nd ed.). México: Editorial Limusa S.A.
- Moreira, F. C., Boaventura, R. A. R., Brillas, E., and Vilar, V. J. P. (2017). Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters. *Applied Catalysis B : Environmental*, 202, 217–261.
- Nemerow, N., y Dasgupta, A. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Neyens, E., and Baeyens, J. (2003). A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique. *Journal of Hazardous Materials*, B98, 33–50.
- Nidheesh, P. V, and Gandhimathi, R. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*, 299, 1–15.
- Ortiz, X., Rodríguez, L., y Cárdenas, J. (1997). *Incidencias ambientales y medidas correctoras en sectores agroalimentarios*. Sevilla: Junta de Andalucía.
- Panizza, M., and Cerisola, G. (2001). Removal of organic pollutants from industrial wastewater by electrogenerated Fenton's reagent. *Water Research*, 35(16), 3987–3992.

- Panizza, M., and Cerisola, G. (2009). Electro-Fenton degradation of synthetic dyes. *Water Research*, 43(2), 339–344.
- Paramo-vargas, J., Estrada, A. M., Gutierrez-granados, S., Godinez, L. A., and Peralta-hernandez, J. M. (2015). Applying electro-Fenton process as an alternative to a slaughterhouse effluent treatment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754, 80–86.
- Pourbaix, M. (1973). *Lectures on electrochemical corrosion*. New York: Plenum Press.
- Prieto, C. (2004). *El Agua-Sus Formas, Abastecimiento, Usos, Daños, Control y Conservación* (2da.). Bogotá: Ecoe.
- Qiang, Z., Chang, J.-H., and Huang, C.-P. (2002). Electrochemical generation of hydrogen peroxide from dissolved oxygen in acidic solutions. *Water Research*, 36, 85–94.
- Qiang, Z., Chang, J.-H., and Huang, C.-P. (2003). Electrochemical regeneration of Fe^{2+} in Fenton oxidation processes. *Water Research*, 37, 1308–1319.
- Raffo, E. (2013). Tratado del agua y la legislación peruana. *Industrial Data*, 16(2), 106–117.
- Rajeshwar, K., and Ibanez, J. (1997). *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Sensors and Abatement*. San Diego, United States: Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Ranade, V., and Bhandari, V. (2014). *Industrial wastewater treatment, recycling and reuse*. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Rwabizambuga, A. (2007). Environmental security and development. *Conflict, Security & Development*, 7(1), 201–225.
- Salas, G. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13(1), 30–38.
- Sarria, V., Parra, S., Rincón, Á., y Torres, R. (2005). Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. *Revista Colombiana de Química*, 34(2), 161–173.
- Sillanpää, M., and Shestakova, M. (2017). *Electrochemical water treatment methods - Fundamentals, methods and full scale applications* (1st ed.). United States: Butterworth-Heinemann.
- Silva, S., Trujillo, J., Aguilar, L., y Hincapié, M. (2009). Tratamiento de contaminantes orgánicos por foto Fenton con luz artificial. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 53–62.
- Tezcan, Ü., Savas, A., and Ülker, B. (2009). Hybrid processes for the treatment of cattle-slaughterhouse wastewater using aluminum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 164, 580–586.
- Thirugnanasambandham, K., Kandasamy, S., Sivakumar, V., Kiran, R., and Mohanavelu, R. (2014). Modeling of by-product recovery and performance evaluation of Electro-Fenton treatment technique to treat poultry wastewater. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 46, 89–97.

- Thirugnanasambandham, K., and Sivakumar, V. (2015). Modeling and Optimization of Advanced Oxidation Treatment of Beer Industry Wastewater Using Electro-Fenton Process. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(4), 1072–1079.
- Walpole, R., Myers, R., y Myers, S. (1999). *Probabilidad y Estadística para Ingenieros* (6th ed.). México: Prentice Hall.
- Wang, C.-T., Hu, J.-L., Chou, W.-L., and Kuo, Y.-M. (2008). Removal of color from real dyeing wastewater by Electro-Fenton technology using a three-dimensional graphite cathode. *Journal of Hazardous Materials*, 152, 601–606.
- Zhang, H., Zhang, D., and Zhou, J. (2006). Removal of COD from landfill leachate by electro-Fenton method. *Journal of Hazardous Materials*, 135, 106–111.



ANEXOS

Anexo 1. Metodología para la evaluación de riesgos ambientales

1. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS POTENCIALES

Los peligros deben identificarse para cada entorno humano, ambiental y socioeconómico.

2. FORMULACIÓN DE ESCENARIOS

Una vez identificado los peligros potenciales, se formulan una serie de escenarios de riesgo para cada uno, en los cuales se estimará la probabilidad de que se materialice y gravedad de las consecuencias.

Tabla 25

Formulación de escenarios

| Ubicación de zona | Tipo de peligro | | Sustancia o evento | Escenario de riesgo | Causas | Consecuencias |
|-------------------|----------------------|-----------|--------------------|---|-------------------------------------|--|
| | Natural | Antrópico | | | | |
| | ↑ | | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ |
| | Identificar Peligros | | Identificar | Posible desencadenante suceso iniciador | Principales causas suceso iniciador | Consecuencias asociadas en primera instancia |

3. ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD

En la evaluación se debe asignar a cada uno de los escenarios una probabilidad de ocurrencia en función a los valores de la escala.

Tabla 26

Rangos de estimación probabilística

| Valor | Probabilidad | |
|-------|--------------------|---|
| 5 | Muy probable | > una vez al mes |
| 4 | Altamente probable | > una vez al año y < una vez al mes |
| 3 | Probable | > una vez al mes y < una vez al año |
| 2 | Posible | > una vez al año y < una vez cada 05 años |
| 1 | Poco probable | > una vez cada 05 años |

4. ESTIMACIÓN DE LA GRAVEDAD DE CONSECUENCIAS

La estimación de la gravedad de consecuencias se realiza de forma diferenciada para el entorno natural, humano y socioeconómico.

Tabla 27

Formulario para la estimación de la gravedad de las consecuencias

| Gravedad | Límites del entorno | Vulnerabilidad |
|------------------------|---|-----------------------------------|
| Entorno natural | = Cantidad + 2 Peligrosidad + Extensión | + Calidad del medio |
| Entorno humano | = Cantidad + 2 Peligrosidad + Extensión | + Población afectada |
| Entorno socioeconómico | = Cantidad + 2 Peligrosidad + Extensión | + Patrimonio y capital productivo |

- **Cantidad:** Es el probable volumen de sustancia emitida al entorno;
- **Peligrosidad:** Es la propiedad o aptitud intrínseca de la sustancia de causar daño (toxicidad, posibilidad de acumulación, bioacumulación, etc.);
- **Extensión:** Es el espacio de influencia del impacto en el entorno;
- **Calidad del medio:** Se considera el impacto y su posible reversibilidad;
- **Población afectada:** Número estimado de personas afectadas;
- **Patrimonio y capital productivo:** Se refiere a la valoración del patrimonio económico y social (patrimonio histórico, infraestructura, actividad agraria, instalaciones industriales, espacios naturales protegidos, zonas residenciales y de servicios).

La valoración conduce a establecer rangos definidos, según lo mostrado en las **Tablas 28, 29, 30 y 31**

Tabla 28

Rangos de los límites de los entornos

| SOBRE EL ENTORNO HUMANO | | | | |
|---------------------------------|----------|----------------|--------------|--------------------|
| Valor | Cantidad | Peligrosidad | Extensión | Población afectada |
| 4 | Muy alta | Muy peligrosa | Muy extenso | Más de 100 |
| 3 | Alta | Peligrosa | Extenso | Entre 25 y 100 |
| 2 | Poca | Poco peligrosa | Poco extenso | Entre 5 y 25 |
| 1 | Muy poca | No peligrosa | Puntual | < 5 personas |
| SOBRE EL ENTORNO NATURAL | | | | |
| Valor | Cantidad | Peligrosidad | Extensión | Población afectada |
| 4 | Muy alta | Muy peligrosa | Muy extenso | Muy elevada |
| 3 | Alta | Peligrosa | Extenso | Elevada |
| 2 | Poca | Poco peligrosa | Poco extenso | Media |
| 1 | Muy poca | No peligrosa | Puntual | Baja |
| SOBRE EL ENTORNO SOCIOECONOMICO | | | | |
| Valor | Cantidad | Peligrosidad | Extensión | Población afectada |
| 4 | Muy alta | Muy peligrosa | Muy extenso | Muy alto |
| 3 | Alta | Peligrosa | Extenso | Alto |
| 2 | Poca | Poco peligrosa | Poco extenso | Bajo |
| 1 | Muy poca | No peligrosa | Puntual | Muy bajo |

Tabla 29

Valoración de consecuencias (Entorno humano)

| Cantidad (Según ERA) (Tn) | | | Peligrosidad (Según caracterización) | | |
|---------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------|--|
| 4 | Muy Alta | Mayor a 500 | 4 | Muy Peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Muy inflamable • Muy toxica • Causa efectos irreversibles inmediatos |
| 3 | Alta | 50 - 500 | 3 | Peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Explosiva • Inflamable • Corrosiva |
| 2 | Muy poca | 5 - 49 | 2 | Poco peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Combustible |
| 1 | Poca | Menor a 5 | 1 | No peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Daños leves y reversibles |
| Extensión (km) | | | Población afectada (personas) | | |
| 4 | Muy extenso | Radio mayor a 1 km | 4 | Muy Alto | Más de 100 |
| 3 | Extenso | Radio hasta 1 km | 3 | Alto | Entre 50 y 100 |
| 2 | Poco extenso | Radio menos a 0.5 km (zona emplazada) | 2 | Bajo | Entre 5 y 50 |
| 1 | Puntual | Área afectada (zona delimitada) | 1 | Muy bajo | < 5 personas |

Tabla 30

Valoración de consecuencias (Entorno ecológico)

| Cantidad (Según ERA) (Tn) | | | Peligrosidad (Según caracterización) | | |
|---------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------|--|
| 4 | Muy Alta | Mayor a 500 | 4 | Muy Peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Muy inflamable • Muy toxica • Causa efectos irreversibles inmediatos |
| 3 | Alta | 50 - 500 | 3 | Peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Explosiva • Inflamable • Corrosiva |
| 2 | Muy poca | 5 - 49 | 2 | Poco peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Combustible |
| 1 | Poca | Menor a 5 | 1 | No peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Daños leves y reversibles |
| Extensión (m) | | | Calidad del medio | | |
| 4 | Muy extenso | Radio mayor a 1 km | 4 | Muy elevada | <ul style="list-style-type: none"> • Daños muy altos: Explosión indiscriminada de RRNN, y existe un nivel de contaminación alto |
| 3 | Extenso | Radio hasta 1 km | 3 | Elevada | <ul style="list-style-type: none"> • Daños altos: Alto nivel de explotación de RRNN y existe un nivel de contaminación moderado |
| 2 | Poco extenso | Radio menos a 0.5 km (zona emplazada) | 2 | Media | <ul style="list-style-type: none"> • Daños moderados: Nivel moderado de explotación de RRNN y existe un nivel de contaminación leve |
| 1 | Puntual | Área afectada (zona delimitada) | 1 | Baja | <ul style="list-style-type: none"> • Daños leves: conservación de los RRNN y no existe contaminación |

Tabla 31

Valoración de consecuencias (Entorno socioeconómico)

| Cantidad | | | Peligrosidad | | |
|---------------|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------|---|
| 4 | Muy Alta | Mayor a 500 | 4 | Muy Peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Muy inflamable • Muy toxica • Causa efectos irreversibles inmediatos |
| 3 | Alta | 50 - 500 | 3 | Peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Explosiva • Inflamable • Corrosiva |
| 2 | Muy poca | 5 - 49 | 2 | Poco peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Combustible |
| 1 | Poca | Menor a 5 | 1 | No peligrosa | <ul style="list-style-type: none"> • Daños leves y reversibles |
| Extensión (m) | | | Patrimonio y capital productivo | | |
| 4 | Muy extenso | Radio mayor a 1 km | 4 | Muy Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Letal: Pérdida del 100% del cuerpo receptor. Se aplica en los casos en que se prevé la pérdida total del receptor. Sin productividad y nula distribución de recursos |
| 3 | Extenso | Radio hasta 1 km | 3 | Alto | <ul style="list-style-type: none"> • Agudo: Pérdida del 50% del receptor. Cuando el resultado prevé efectos agudos y en los casos de una pérdida parcial pero intensa del receptor. Escasamente productiva. • Crónico: Pérdida de entre el 10% y 20% del receptor. Los efectos a largo plazo implican pérdida de funciones que puede hacerse equivalente a ese rango de pérdida del receptor, también se aplica en los casos de escasa pérdida directas del receptor. |
| 2 | Poco extenso | Radio menos a 0.5 km (zona emplazada) | 2 | Bajo | <ul style="list-style-type: none"> • Medianamente productiva |
| 1 | Puntual | Área afectada (zona delimitada) | 1 | Muy bajo | <ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de entre el 1% y 2% del receptor. Esta se puede clasificar los escenarios que producen efectos, pero difícilmente medido o evaluados, sobre el receptor. • Alta productividad |

Finalmente, para cada uno de los escenarios identificados, se asigna una puntuación de 1 a 5 a la gravedad de las consecuencias en cada entorno, según **Tabla 32**.

Tabla 32

Valoración de escenarios identificados

| Valor | Valoración | Valor asignado |
|--------------|------------|----------------|
| Critico | 20 – 18 | 5 |
| Grave | 17 – 15 | 4 |
| Moderado | 14 – 11 | 3 |
| Leve | 10 – 8 | 2 |
| No relevante | 7 – 5 | 1 |

5. ESTIMACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL

El producto de la probabilidad y la gravedad de las consecuencias anteriormente estimadas, permite la estimación del riesgo ambiental. Este se determina para los tres entornos considerados, natural, humano y socioeconómico según se muestra en la fórmula, de la Figura 26.

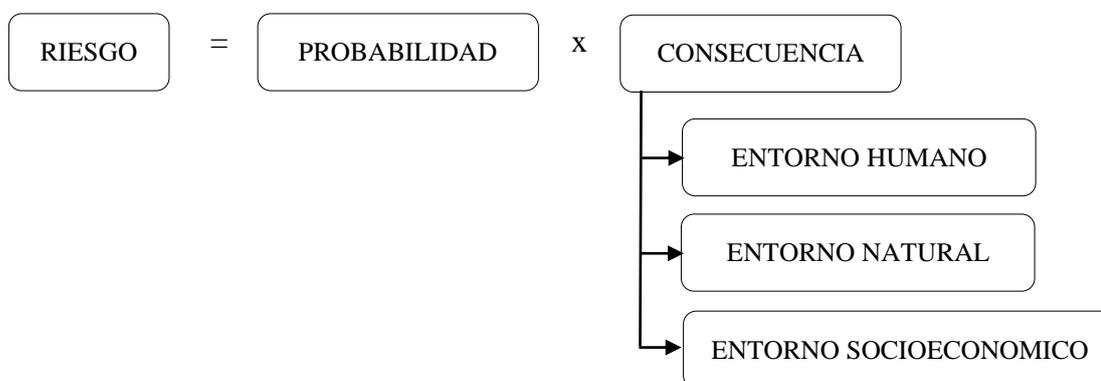


Figura 26. Estimación del riesgo ambiental

Para la evaluación final del riesgo ambiental se elaboran tablas de doble entrada, una para cada entorno (natural, humano y socioeconómico), en las que gráficamente debe aparecer cada escenario teniendo en cuenta su probabilidad y consecuencias, resultado de la estimación del riesgo realizado, ver **Tabla 33**.

Tabla 33
Estimador del riesgo ambiental

| | | Consecuencia | | | | |
|--------------|---|--------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Probabilidad | 1 | | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| | 5 | | | | | |

| | | |
|--|-----------------------|---------|
| | Riesgo Significativo: | 16 – 25 |
| | Riesgo Moderado: | 6 – 15 |
| | Riesgo Leve: | 1 – 5 |

La ubicación de los escenarios en tabla permitirá a cada organización, emitir un juicio sobre la evaluación del riesgo ambiental y plantear una mejora de la gestión para la reducción del riesgo.

6. EVALUACIÓN DE RIESGO AMBIENTAL

Tabla 34

Establecimiento del riesgo alto en la escala de evaluación de riesgo ambiental

| | Valor matricial | Equivalencia Porcentual (%) | Promedio (%) |
|---|--------------------|-----------------------------------|-----------------|
|  Riesgo Significativo: | 16 – 25 | 64 – 100 | 82 |
|  Riesgo Moderado: | 6 – 15 | 24 – 60 | 42 |
|  Riesgo Leve: | 1 – 5 | 1 – 20 | 10.50 |

Anexo 2. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)**REFLUJO CERRADO, MÉTODO TITULOMÉTRICO**

Para la determinación de la DQO en aguas residuales se realizó siguiendo el procedimiento descrito en APHA, AWWA y WPCF (1989).

1. Instrumental

- a) *Vasos de digestión:* Preferiblemente, utilícense tubos de cultivo de borosilicato de 16x100 mm con tapones de rosca.
- b) *Bloque de calentamiento:* Aluminio fundido de 45 a 50 mm de profundidad, con agujeros ajustados al tamaño de los tubos de cultivo o ampollas.

2. Reactivos

- a) *Solución de digestión de dicromato de potasio patrón, 0.0167 M:* Añádanse a unos 500 mL de agua destilada 4.913 g de $K_2Cr_2O_7$, calidad para reactivos primarios, previamente secado a 103 °C durante 2 horas, 167 mL de H_2SO_4 concentrado y 33.3 g de $HgSO_4$. Disuélvase, enfríase a temperatura ambiente y dilúyase hasta 1000 mL.
- b) *Reactivo ácido sulfúrico:* Añádase Ag_2SO_4 , de calidad para reactivos o técnica, en cristales o en polvo, a H_2SO_4 concentrado en la proporción de 5.5 g de Ag_2SO_4/kg de H_2SO_4 . Déjese reposar de 1 a 2 días para disolver Ag_2SO_4 .
- c) *Solución indicadora de ferroína:* Disuélvase 1.485 g de 1,10-fenantrolina monohidratado y 0.695 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ en agua destilada y dilúyase hasta 100 mL.
- d) *Sulfato de amonio ferroso (SAF) patrón para titulación, aproximadamente 0.10 N:* Dilúyanse 39.2 g de $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ en agua destilada. Añádanse 20 mL de H_2SO_4 concentrado, enfríese y dilúyase hasta 1000 mL estandarice la solución a diario frente a la solución de digestión patrón de $K_2Cr_2O_7$, como sigue:

$$\text{Molaridad de la solución de SAF} = \frac{\text{Volumen de solución titulada de } K_2Cr_2O_7 \text{ 0.0167 M, mL}}{\text{Volumen de SAF utilizada en la titulación, mL}} \times 0.10$$

3. Procedimiento

Lávense los tubos de cultivo y los tapones con H_2SO_4 al 20% antes de usarlos por primera vez para evitar la contaminación. Colóquense la muestra en el tubo de cultivo y añádase la solución digestión. Viértase con cuidado el ácido sulfúrico en el vaso, de forma que se cree una capa de ácido debajo de la capa de la solución de digestión de la muestra.

Apriétese bien el tapón de los tubos, e inviértanse varias veces cada uno de ellos para mezclar completamente. Colóquense los tubos en un digestor de bloque a 150 °C por 2 horas. Enfríese a temperatura ambiente y colóquense los tubos en la rejilla de tubos de ensayo. Quítense los tapones de los tubos de cultivo y pásese el contenido en un envase más grande para titulación. Añádase de 0.05 a 0.10 mL (de 1 a 2 gotas) del indicador de ferroína y agítase rápidamente mientras se titula con SAF 0.10 M. El punto final es un marcado cambio de color azul verdoso al marrón rojizo, aunque el azul verdoso puede volver a aparecer en pocos minutos. de la misma forma sométase a digestión y titúlese un blanco que contenga los reactivos y un volumen de agua destilada igual al de la muestra.

Tabla 35

Cantidades de muestra y reactivos para varios vasos de digestión

| Vaso de digestión | Muestra mL | Solución de digestión mL | Reactivo ácido sulfúrico mL | Volumen total final mL |
|----------------------------|------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Tubos de cultivo: | | | | |
| 16 x 100 mm | 2.5 | 1.5 | 3.5 | 7.5 |
| 20 x 150 mm | 5.0 | 3.0 | 7.0 | 15.0 |
| 25 x 150 mm | 10.0 | 6.0 | 14.0 | 30.0 |
| Ampollas estándar de 10 mL | 2.5 | 1.5 | 3.5 | 7.5 |

4. Cálculo

$$DQO \text{ en } mg \frac{O_2}{L} = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{mL \text{ de muestra}}$$

Donde:

A = mL de SAF utilizados para el blanco

B = mL de SAF utilizados para la muestra, y

N = normalidad del SAF

Anexo 3. Concentraciones y porcentajes de remoción de la DQO del estudio del efecto de los parámetros de operación

Tabla 36

Concentraciones de remoción de DQO del efecto del pH

| N° | Tiempo (min) | Concentración de DQO (mg/L)/pH | | | Remoción de DQO (%) | | |
|----|--------------|--------------------------------|---------|---------|---------------------|-------|-------|
| | | 2.10 | 4.03 | 6.15 | 2.10 | 4.03 | 6.15 |
| 1 | 0 | 7641.60 | 7641.60 | 7641.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 5 | 6784.00 | 5440.00 | 6272.00 | 11.22 | 28.81 | 17.92 |
| 3 | 15 | 4352.00 | 960.00 | 2368.00 | 43.05 | 87.44 | 69.01 |
| 4 | 30 | 1472.00 | 512.00 | 1152.00 | 80.74 | 93.30 | 84.92 |
| 5 | 45 | 896.00 | 384.00 | 640.00 | 88.27 | 94.97 | 91.62 |
| 6 | 60 | 448.00 | 384.00 | 512.00 | 94.14 | 94.97 | 93.30 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 37

Concentraciones de remoción de DQO del efecto de la corriente

| N° | Tiempo (min) | Concentración de DQO (mg/L)/C _e (A) | | | Remoción de DQO (%) | | |
|----|--------------|--|---------------|---------|---------------------|-------|-------|
| | | 0.50 | 0.75 | 1.00 | 0.50 | 0.75 | 1.00 |
| 1 | 0 | 7641.60 | 7641.60 | 7641.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 5 | 6144.00 | 5120.00 | 4224.00 | 19.60 | 33.00 | 44.72 |
| 3 | 15 | 3008.00 | 1600.00 | 896.00 | 60.64 | 79.06 | 88.27 |
| 4 | 30 | 1280.00 | 960.00 | 640.00 | 83.25 | 87.44 | 91.62 |
| 5 | 45 | 960.00 | 640.00 | 384.00 | 87.44 | 91.62 | 94.97 |
| 6 | 60 | 512.00 | 426.67 | 256.00 | 93.30 | 94.42 | 96.65 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 38

Concentraciones de remoción de DQO del efecto de la dosis de H₂O₂

| N° | Tiempo (min) | Concentración de DQO (mg/L)/[H ₂ O ₂] (mL/L) | | | Remoción de DQO (%) | | |
|----|--------------|---|---------|---------|---------------------|-------|-------|
| | | 6 | 12 | 18 | 6 | 12 | 18 |
| 1 | 0 | 7641.60 | 7641.60 | 7641.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 5 | 5440.00 | 4736.00 | 6400.00 | 28.81 | 38.02 | 16.25 |
| 3 | 15 | 2688.00 | 1280.00 | 3840.00 | 64.82 | 83.25 | 49.75 |
| 4 | 30 | 1088.00 | 640.00 | 1536.00 | 85.76 | 91.62 | 79.90 |
| 5 | 45 | 640.00 | 384.00 | 896.00 | 91.62 | 94.97 | 88.27 |
| 6 | 60 | 384.00 | 320.00 | 512.00 | 94.97 | 95.81 | 93.30 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 39

Concentraciones de remoción de DQO del efecto del distanciamiento de electrodos

| N° | Tiempo (min) | Concentración de DQO (mg/L)/d _e (cm) | | | Remoción de DQO (%) | | |
|----|--------------|---|---------|---------------|---------------------|-------|-------|
| | | 0.50 | 1.00 | 2.00 | 0.50 | 1.00 | 2.00 |
| 1 | 0 | 7641.60 | 7641.60 | 7641.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 5 | 6684.44 | 4928.00 | 6186.67 | 12.53 | 35.51 | 19.04 |
| 3 | 15 | 3697.78 | 1728.00 | 2816.00 | 51.61 | 77.39 | 63.15 |
| 4 | 30 | 1706.67 | 768.00 | 1152.00 | 77.67 | 89.95 | 84.92 |
| 5 | 45 | 924.44 | 576.00 | 672.00 | 87.90 | 92.46 | 91.21 |
| 6 | 60 | 497.78 | 448.00 | 480.00 | 93.49 | 94.14 | 93.72 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Anexo 4. Concentraciones finales de la DQO final del Diseño de Box-Behnken

Tabla 40

Concentraciones finales de DQO en el diseño de Box-Behnken

| <i>N°</i> | <i>pH</i> | <i>D (mA/cm²)</i> | <i>C (mL/L)</i> | <i>t (min)</i> | <i>Concentración de DQO (mg/L)</i> |
|-----------|-----------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------------|
| 1 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 477.60 |
| 2 | 6.50 | 23.81 | 10.00 | 15 | 1202.84 |
| 3 | 5.00 | 17.86 | 10.00 | 45 | 1132.10 |
| 4 | 5.00 | 29.76 | 14.00 | 30 | 640.00 |
| 5 | 3.50 | 17.86 | 10.00 | 30 | 901.41 |
| 6 | 6.50 | 23.81 | 10.00 | 45 | 1344.36 |
| 7 | 6.50 | 23.81 | 6.00 | 30 | 1379.73 |
| 8 | 5.00 | 29.76 | 6.00 | 30 | 969.04 |
| 9 | 5.00 | 23.81 | 6.00 | 45 | 1129.81 |
| 10 | 6.50 | 17.86 | 10.00 | 30 | 1061.33 |
| 11 | 3.50 | 29.76 | 10.00 | 30 | 426.67 |
| 12 | 5.00 | 17.86 | 14.00 | 30 | 1273.60 |
| 13 | 3.50 | 23.81 | 6.00 | 30 | 909.71 |
| 14 | 3.50 | 23.81 | 10.00 | 15 | 1462.86 |
| 15 | 5.00 | 23.81 | 6.00 | 15 | 1386.67 |
| 16 | 6.50 | 23.81 | 14.00 | 30 | 849.10 |
| 17 | 3.50 | 23.81 | 14.00 | 30 | 955.20 |
| 18 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 440.86 |
| 19 | 5.00 | 29.76 | 10.00 | 15 | 1280.00 |
| 20 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 412.10 |
| 21 | 3.50 | 23.81 | 10.00 | 45 | 530.67 |
| 22 | 5.00 | 23.81 | 14.00 | 15 | 1592.00 |
| 23 | 6.50 | 29.76 | 10.00 | 30 | 746.67 |
| 24 | 5.00 | 23.81 | 14.00 | 45 | 859.68 |
| 25 | 5.00 | 17.86 | 10.00 | 15 | 1209.92 |
| 26 | 5.00 | 17.86 | 6.00 | 30 | 1091.66 |
| 27 | 5.00 | 29.76 | 10.00 | 45 | 463.13 |
| 28 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 405.24 |
| 29 | 5.00 | 23.81 | 10.00 | 30 | 538.83 |

D: Densidad de corriente. *C*: Concentración de H₂O₂. *t*: Tiempo de tratamiento

Fuente: Elaboración propia (2018).

Anexo 5. Cantidad de Fe^{2+} generado en el proceso de electro-Fenton

La cantidad de hierro disuelto se calculó empleando la ley de Faraday según la ecuación reportada por Comninellis y Chen (2010):

$$w = \frac{itM}{nf}$$

Donde w es la cantidad de hierro del electrodo disuelto (g/cm^2), i es la densidad de corriente (A/cm^2), t es el tiempo (s), M es la masa molar relativa del hierro (55.845 g/mol), n es el número de electrones en la reacción de oxidación/reducción (2) y f es la constante de Faraday (96500 C/mol).

Tabla 41

Cantidad de Fe^{2+} generado en el estudio del efecto del pH, dosis de H_2O_2 y distanciamiento de electrodos

| N° | C_e (A) | A_e (cm^2) | i (A/cm^2) | t (min) | t (s) | V_m (L) | w (g/cm^2) | w (mg/cm^2) | $[Fe^{2+}]$ (mg/L) |
|----|--------------|---------------------|---------------------|--------------|------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 5 | 300.00 | 0.50 | 0.0016 | 1.5501 | 3.1002 |
| 2 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 15 | 900.00 | 0.50 | 0.0047 | 4.6503 | 9.3006 |
| 3 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 30 | 1800.00 | 0.50 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| 4 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 45 | 2700.00 | 0.50 | 0.0140 | 13.9509 | 27.9018 |
| 5 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 60 | 3600.00 | 0.50 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |

C_e : Corriente. A_e : Área del electrodo. i : Densidad de corriente. t : Tiempo de tratamiento. V_m : Volumen de la muestra. w : Cantidad de Fe^{2+} . $[Fe^{2+}]$: Concentración de hierro

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 42

Cantidad de Fe^{2+} generado en el estudio del efecto de la corriente

| C_e (A) | A_e (cm^2) | i (A/cm^2) | N° | t (min) | t (s) | V_m (L) | w (g/cm^2) | w (mg/cm^2) | $[Fe^{2+}]$ (mg/L) |
|--------------|---------------------|---------------------|----|--------------|------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------------------|
| 0.50 | 42.00 | 0.0119 | 1 | 5 | 300 | 0.5 | 0.001 | 1.0334 | 2.0668 |
| | | | 2 | 15 | 900 | 0.5 | 0.0031 | 3.1002 | 6.2004 |
| | | | 3 | 30 | 1800 | 0.5 | 0.0062 | 6.2004 | 12.4008 |
| | | | 4 | 45 | 2700 | 0.5 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| | | | 5 | 60 | 3600 | 0.5 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 1 | 5 | 300 | 0.5 | 0.0016 | 1.5501 | 3.1002 |
| | | | 2 | 15 | 900 | 0.5 | 0.0047 | 4.6503 | 9.3006 |
| | | | 3 | 30 | 1800 | 0.5 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| | | | 4 | 45 | 2700 | 0.5 | 0.014 | 13.9509 | 27.9018 |
| | | | 5 | 60 | 3600 | 0.5 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |
| 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 1 | 5 | 300 | 0.5 | 0.0021 | 2.0668 | 4.1336 |
| | | | 2 | 15 | 900 | 0.5 | 0.0062 | 6.2004 | 12.4008 |
| | | | 3 | 30 | 1800 | 0.5 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| | | | 4 | 45 | 2700 | 0.5 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |
| | | | 5 | 60 | 3600 | 0.5 | 0.0248 | 24.8016 | 49.6033 |

C_e : Corriente. A_e : Área del electrodo. i : Densidad de corriente. t : Tiempo de tratamiento. V_m : Volumen de la muestra. w : Cantidad de Fe^{2+} . $[Fe^{2+}]$: Concentración de hierro

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 43

Cantidad de Fe^{2+} generado en los experimentos del diseño de Box-Behnken

| N° | C_e (A) | A_e (cm^2) | i (A/cm^2) | t (min) | t (s) | V_m (L) | w (g/cm^2) | w (mg/cm^2) | $[Fe^{2+}]$ (mg/L) |
|-------------|--------------|---------------------|---------------------|--------------|------------|--------------|---------------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 2 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 15 | 900.00 | 0.500 | 0.0062 | 6.2004 | 12.4008 |
| 3 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 45 | 2700.00 | 0.500 | 0.0140 | 13.9509 | 27.9018 |
| 4 | 1.25 | 42.00 | 0.0298 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0155 | 15.5010 | 31.0020 |
| 5 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| 6 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 45 | 2700.00 | 0.500 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |
| 7 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 8 | 1.25 | 42.00 | 0.0298 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0155 | 15.5010 | 31.0020 |
| 9 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 45 | 2700.00 | 0.500 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |
| 10 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| 11 | 1.25 | 42.00 | 0.0298 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0155 | 15.5010 | 31.0020 |
| 12 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| 13 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 14 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 15 | 900.00 | 0.500 | 0.0062 | 6.2004 | 12.4008 |
| 15 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 15 | 900.00 | 0.500 | 0.0062 | 6.2004 | 12.4008 |
| 16 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 17 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 18 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 19 | 1.25 | 42.00 | 0.0298 | 15 | 900.00 | 0.500 | 0.0078 | 7.7505 | 15.5010 |
| 20 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 21 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 45 | 2700.00 | 0.500 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |
| 22 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 15 | 900.00 | 0.500 | 0.0062 | 6.2004 | 12.4008 |
| 23 | 1.25 | 42.00 | 0.0298 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0155 | 15.5010 | 31.0020 |
| 24 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 45 | 2700.00 | 0.500 | 0.0186 | 18.6012 | 37.2024 |
| 25 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 15 | 900.00 | 0.500 | 0.0047 | 4.6503 | 9.3006 |
| 26 | 0.75 | 42.00 | 0.0179 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0093 | 9.3006 | 18.6012 |
| 27 | 1.25 | 42.00 | 0.0298 | 45 | 2700.00 | 0.500 | 0.0233 | 23.2515 | 46.5031 |
| 28 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |
| 29 | 1.00 | 42.00 | 0.0238 | 30 | 1800.00 | 0.500 | 0.0124 | 12.4008 | 24.8016 |

C_e : Corriente. A_e : Área del electrodo. i : Densidad de corriente. t : Tiempo de tratamiento. V_m : Volumen de la muestra. w : Cantidad de Fe^{2+} . $[Fe^{2+}]$: Concentración de hierro
Fuente: Elaboración propia (2018).

Anexo 6. Consumo de energía en la evaluación de los parámetros operacionales

El consumo de energía (CE) por unidad de la DQO removido (kWh/g_{DQO}) fue calculado según Sillanpää y Shestakova (2017) utilizando la siguiente ecuación:

$$CE_{DQO} = \frac{E_{celda} \cdot I \cdot t}{\Delta DQO \cdot V_s}$$

Donde E_{celda} es potencial/voltaje (V); I es la corriente aplicada (A); t es el tiempo de electrolisis (h); ΔDQO y V_s es el volumen de la solución tratada (L).

Tabla 44

Consumo de energía en la evaluación del efecto pH

| pH | N° | Tiempo | | Concentración de DQO (mg/L) | | Volumen (L) | Corriente (A) | Potencial (V) | CE _{COD} (kWh/g _{cod}) |
|------|----|--------|-------|-----------------------------|----------------|-------------|---------------|---------------|---|
| | | min | horas | C ₀ | C _f | | | | |
| 2.10 | 1 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 6784.00 | 0.50 | 0.75 | 8.00 | 0.0011 |
| | 2 | 15 | 0.25 | 7641.60 | 4352.00 | 0.50 | 0.75 | 8.10 | 0.0009 |
| | 3 | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1472.00 | 0.50 | 0.75 | 7.80 | 0.0009 |
| | 4 | 45 | 0.75 | 7641.60 | 896.00 | 0.50 | 0.75 | 8.20 | 0.0014 |
| | 5 | 60 | 1.00 | 7641.60 | 448.00 | 0.50 | 0.75 | 8.03 | 0.0017 |
| 4.03 | 1 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 5440.00 | 0.50 | 0.75 | 10.00 | 0.0005 |
| | 2 | 15 | 0.25 | 7641.60 | 960.00 | 0.50 | 0.75 | 10.20 | 0.0006 |
| | 3 | 30 | 0.50 | 7641.60 | 512.00 | 0.50 | 0.75 | 9.90 | 0.0010 |
| | 4 | 45 | 0.75 | 7641.60 | 384.00 | 0.50 | 0.75 | 10.05 | 0.0016 |
| | 5 | 60 | 1.00 | 7641.60 | 384.00 | 0.50 | 0.75 | 10.10 | 0.0021 |
| 6.15 | 1 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 6272.00 | 0.50 | 0.75 | 19.20 | 0.0017 |
| | 2 | 15 | 0.25 | 7641.60 | 2368.00 | 0.50 | 0.75 | 19.50 | 0.0014 |
| | 3 | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1152.00 | 0.50 | 0.75 | 20.00 | 0.0023 |
| | 4 | 45 | 0.75 | 7641.60 | 640.00 | 0.50 | 0.75 | 20.10 | 0.0032 |
| | 5 | 60 | 1.00 | 7641.60 | 512.00 | 0.50 | 0.75 | 20.40 | 0.0043 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 45

Consumo de energía en la evaluación del efecto de la corriente

| C _e (A) | N° | Tiempo | | Concentración de DQO (mg/L) | | Volumen (L) | Potencial (V) | CE _{COD} (kWh/g _{cod}) |
|--------------------|----|--------|-------|-----------------------------|----------------|-------------|---------------|---|
| | | min | horas | C ₀ | C _f | | | |
| 0.50 | 1 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 6144.00 | 0.50 | 11.00 | 0.0006 |
| | 2 | 15 | 0.25 | 7641.60 | 3008.00 | 0.50 | 10.80 | 0.0006 |
| | 3 | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1280.00 | 0.50 | 10.90 | 0.0009 |
| | 4 | 45 | 0.75 | 7641.60 | 960.00 | 0.50 | 11.20 | 0.0013 |
| | 5 | 60 | 1.00 | 7641.60 | 512.00 | 0.50 | 11.25 | 0.0016 |
| 0.75 | 1 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 5120.00 | 0.50 | 17.30 | 0.0008 |
| | 2 | 15 | 0.25 | 7641.60 | 1600.00 | 0.50 | 17.00 | 0.0011 |
| | 3 | 30 | 0.50 | 7641.60 | 960.00 | 0.50 | 17.30 | 0.0019 |
| | 4 | 45 | 0.75 | 7641.60 | 640.00 | 0.50 | 16.90 | 0.0027 |
| | 5 | 60 | 1.00 | 7641.60 | 426.67 | 0.50 | 17.10 | 0.0036 |
| 1.00 | 1 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 4224.00 | 0.50 | 25.20 | 0.0012 |
| | 2 | 15 | 0.25 | 7641.60 | 896.00 | 0.50 | 25.20 | 0.0019 |
| | 3 | 30 | 0.50 | 7641.60 | 640.00 | 0.50 | 25.00 | 0.0036 |
| | 4 | 45 | 0.75 | 7641.60 | 384.00 | 0.50 | 25.30 | 0.0052 |
| | 5 | 60 | 1.00 | 7641.60 | 256.00 | 0.50 | 24.80 | 0.0067 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 46

Consumo de energía en la evaluación del efecto de la dosis de H₂O₂

| [H ₂ O ₂] (mL/L) | Tiempo | | Concentración de DQO (mg/L) | | Volumen (L) | Corriente (A) | Potencial (V) | CE _{cod} (kWh/g _{cod}) |
|--|--------|-------|--------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|--|
| | min | horas | C ₀ | C _f | | | | |
| 6 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 5440.00 | 0.50 | 0.75 | 17.20 | 0.0009 |
| | 15 | 0.25 | 7641.60 | 2688.00 | 0.50 | 0.75 | 17.00 | 0.0013 |
| | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1088.00 | 0.50 | 0.75 | 16.80 | 0.0019 |
| | 45 | 0.75 | 7641.60 | 640.00 | 0.50 | 0.75 | 16.90 | 0.0027 |
| | 60 | 1.00 | 7641.60 | 384.00 | 0.50 | 0.75 | 17.01 | 0.0035 |
| 12 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 4736.00 | 0.50 | 0.75 | 21.80 | 0.0009 |
| | 15 | 0.25 | 7641.60 | 1280.00 | 0.50 | 0.75 | 21.90 | 0.0013 |
| | 30 | 0.50 | 7641.60 | 640.00 | 0.50 | 0.75 | 21.50 | 0.0023 |
| | 45 | 0.75 | 7641.60 | 384.00 | 0.50 | 0.75 | 21.30 | 0.0033 |
| | 60 | 1.00 | 7641.60 | 320.00 | 0.50 | 0.75 | 21.70 | 0.0044 |
| 18 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 6400.00 | 0.50 | 0.75 | 14.40 | 0.0014 |
| | 15 | 0.25 | 7641.60 | 3840.00 | 0.50 | 0.75 | 14.45 | 0.0014 |
| | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1536.00 | 0.50 | 0.75 | 14.40 | 0.0018 |
| | 45 | 0.75 | 7641.60 | 896.00 | 0.50 | 0.75 | 14.50 | 0.0024 |
| | 60 | 1.00 | 7641.60 | 512.00 | 0.50 | 0.75 | 14.10 | 0.0030 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Tabla 47

Consumo de energía en la evaluación del efecto del distanciamiento de electrodos

| d _e (cm) | Tiempo | | Concentración de DQO (mg/L) | | Volumen (L) | Corriente (A) | Potencial (V) | CE _{cod} (kWh/g _{cod}) |
|------------------------|--------|-------|--------------------------------|----------------|----------------|------------------|------------------|--|
| | min | horas | C ₀ | C _f | | | | |
| 0.50 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 6684.44 | 0.50 | 0.75 | 12.40 | 0.0016 |
| | 15 | 0.25 | 7641.60 | 3697.78 | 0.50 | 0.75 | 12.40 | 0.0012 |
| | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1706.67 | 0.50 | 0.75 | 12.43 | 0.0016 |
| | 45 | 0.75 | 7641.60 | 924.44 | 0.50 | 0.75 | 12.10 | 0.0020 |
| | 60 | 1.00 | 7641.60 | 497.78 | 0.50 | 0.75 | 12.20 | 0.0026 |
| 1.00 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 4928.00 | 0.50 | 0.75 | 18.90 | 0.0004 |
| | 15 | 0.25 | 7641.60 | 1728.00 | 0.50 | 0.75 | 18.80 | 0.0006 |
| | 30 | 0.50 | 7641.60 | 768.00 | 0.50 | 0.75 | 18.80 | 0.0010 |
| | 45 | 0.75 | 7641.60 | 576.00 | 0.50 | 0.75 | 18.93 | 0.0015 |
| | 60 | 1.00 | 7641.60 | 448.00 | 0.50 | 0.75 | 18.91 | 0.0020 |
| 2.00 | 5 | 0.08 | 7641.60 | 6186.67 | 0.50 | 0.75 | 31.10 | 0.0026 |
| | 15 | 0.25 | 7641.60 | 2816.00 | 0.50 | 0.75 | 31.00 | 0.0024 |
| | 30 | 0.50 | 7641.60 | 1152.00 | 0.50 | 0.75 | 30.90 | 0.0036 |
| | 45 | 0.75 | 7641.60 | 672.00 | 0.50 | 0.75 | 31.20 | 0.0050 |
| | 60 | 1.00 | 7641.60 | 480.00 | 0.50 | 0.75 | 31.00 | 0.0065 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Anexo 7. Consumo de energía en los experimentos del diseño de Box- Behnken

Tabla 48

Consumo de energía en los experimentos del diseño de Box-Behnken

| N° | Concentración de DQO (mg/L) | | Tiempo | | Volumen (L) | Corriente (A) | Potencial (V) | CE _{cod} (kWh/g _{cod}) |
|----|-----------------------------|----------------|--------|------|-------------|---------------|---------------|---|
| | C ₀ | C _f | min | hora | | | | |
| 1 | 7641.60 | 901.41 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 16.10 | 0.0024 |
| 2 | 7641.60 | 426.67 | 15 | 0.25 | 0.500 | 1.00 | 24.40 | 0.0017 |
| 3 | 7641.60 | 1061.33 | 45 | 0.75 | 0.500 | 0.75 | 13.80 | 0.0024 |
| 4 | 7641.60 | 746.67 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.25 | 29.20 | 0.0053 |
| 5 | 7641.60 | 909.71 | 30 | 0.50 | 0.500 | 0.75 | 11.40 | 0.0013 |
| 6 | 7641.60 | 955.20 | 45 | 0.75 | 0.500 | 1.00 | 25.80 | 0.0058 |
| 7 | 7641.60 | 1379.73 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 25.00 | 0.0040 |
| 8 | 7641.60 | 849.07 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.25 | 23.40 | 0.0043 |
| 9 | 7641.60 | 1462.86 | 45 | 0.75 | 0.500 | 1.00 | 21.10 | 0.0051 |
| 10 | 7641.60 | 530.67 | 30 | 0.50 | 0.500 | 0.75 | 20.10 | 0.0021 |
| 11 | 7641.60 | 1202.84 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.25 | 23.20 | 0.0045 |
| 12 | 7641.60 | 1344.36 | 30 | 0.50 | 0.500 | 0.75 | 20.00 | 0.0024 |
| 13 | 7641.60 | 1091.66 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 16.20 | 0.0025 |
| 14 | 7641.60 | 1273.60 | 15 | 0.25 | 0.500 | 1.00 | 15.50 | 0.0012 |
| 15 | 7641.60 | 969.04 | 15 | 0.25 | 0.500 | 1.00 | 21.10 | 0.0016 |
| 16 | 7641.60 | 640.00 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 27.80 | 0.0040 |
| 17 | 7641.60 | 1209.92 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 18.70 | 0.0029 |
| 18 | 7641.60 | 1132.09 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 16.00 | 0.0025 |
| 19 | 7641.60 | 1280.00 | 15 | 0.25 | 0.500 | 1.25 | 26.40 | 0.0026 |
| 20 | 7641.60 | 463.13 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 15.80 | 0.0022 |
| 21 | 7641.60 | 1386.67 | 45 | 0.75 | 0.500 | 1.00 | 13.80 | 0.0033 |
| 22 | 7641.60 | 1129.81 | 15 | 0.25 | 0.500 | 1.00 | 22.70 | 0.0017 |
| 23 | 7641.60 | 1592.00 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.25 | 31.00 | 0.0064 |
| 24 | 7641.60 | 859.68 | 45 | 0.75 | 0.500 | 1.00 | 23.50 | 0.0052 |
| 25 | 7641.60 | 538.83 | 15 | 0.25 | 0.500 | 0.75 | 15.30 | 0.0008 |
| 26 | 7641.60 | 477.60 | 30 | 0.50 | 0.500 | 0.75 | 19.10 | 0.0020 |
| 27 | 7641.60 | 440.86 | 45 | 0.75 | 0.500 | 1.25 | 21.40 | 0.0056 |
| 28 | 7641.60 | 405.24 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 15.00 | 0.0021 |
| 29 | 7641.60 | 412.05 | 30 | 0.50 | 0.500 | 1.00 | 14.20 | 0.0020 |

Fuente: Elaboración propia (2018).

Anexo 8. Puntos porcentuales de la distribución *t*

| $\nu \backslash \alpha$ | .40 | .25 | .10 | .05 | .025 | .01 | .005 | .0025 | .001 | .0005 |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | .325 | 1.000 | 3.078 | 6.314 | 12.706 | 31.821 | 63.657 | 127.32 | 318.31 | 636.62 |
| 2 | .289 | .816 | 1.886 | 2.920 | 4.303 | 6.965 | 9.925 | 14.089 | 23.326 | 31.598 |
| 3 | .277 | .765 | 1.638 | 2.353 | 3.182 | 4.541 | 5.841 | 7.453 | 10.213 | 12.924 |
| 4 | .271 | .741 | 1.533 | 2.132 | 2.776 | 3.747 | 4.604 | 5.598 | 7.173 | 8.610 |
| 5 | .267 | .727 | 1.476 | 2.015 | 2.571 | 3.365 | 4.032 | 4.773 | 5.893 | 6.869 |
| 6 | .265 | .727 | 1.440 | 1.943 | 2.447 | 3.143 | 3.707 | 4.317 | 5.208 | 5.959 |
| 7 | .263 | .711 | 1.415 | 1.895 | 2.365 | 2.998 | 3.499 | 4.019 | 4.785 | 5.408 |
| 8 | .262 | .706 | 1.397 | 1.860 | 2.306 | 2.896 | 3.355 | 3.833 | 4.501 | 5.041 |
| 9 | .261 | .703 | 1.383 | 1.833 | 2.262 | 2.821 | 3.250 | 3.690 | 4.297 | 4.781 |
| 10 | .260 | .700 | 1.372 | 1.812 | 2.228 | 2.764 | 3.169 | 3.581 | 4.144 | 4.587 |
| 11 | .260 | .697 | 1.363 | 1.796 | 2.201 | 2.718 | 3.106 | 3.497 | 4.025 | 4.437 |
| 12 | .259 | .695 | 1.356 | 1.782 | 2.179 | 2.681 | 3.055 | 3.428 | 3.930 | 4.318 |
| 13 | .259 | .694 | 1.350 | 1.771 | 2.160 | 2.650 | 3.012 | 3.372 | 3.852 | 4.221 |
| 14 | .258 | .692 | 1.345 | 1.761 | 2.145 | 2.624 | 2.977 | 3.326 | 3.787 | 4.140 |
| 15 | .258 | .691 | 1.341 | 1.753 | 2.131 | 2.602 | 2.947 | 3.286 | 3.733 | 4.073 |
| 16 | .258 | .690 | 1.337 | 1.746 | 2.120 | 2.583 | 2.921 | 3.252 | 3.686 | 4.015 |
| 17 | .257 | .689 | 1.333 | 1.740 | 2.110 | 2.567 | 2.898 | 3.222 | 3.646 | 3.965 |
| 18 | .257 | .688 | 1.330 | 1.734 | 2.101 | 2.552 | 2.878 | 3.197 | 3.610 | 3.922 |
| 19 | .257 | .688 | 1.328 | 1.729 | 2.093 | 2.539 | 2.861 | 3.174 | 3.579 | 3.883 |
| 20 | .257 | .687 | 1.325 | 1.725 | 2.086 | 2.528 | 2.845 | 3.153 | 3.552 | 3.850 |
| 21 | .257 | .686 | 1.323 | 1.721 | 2.080 | 2.518 | 2.831 | 3.135 | 3.527 | 3.819 |
| 22 | .256 | .686 | 1.321 | 1.717 | 2.074 | 2.508 | 2.819 | 3.119 | 3.505 | 3.792 |
| 23 | .256 | .685 | 1.319 | 1.714 | 2.069 | 2.500 | 2.807 | 3.104 | 3.485 | 3.767 |
| 24 | .256 | .685 | 1.318 | 1.711 | 2.064 | 2.492 | 2.797 | 3.091 | 3.467 | 3.745 |
| 25 | .256 | .684 | 1.316 | 1.708 | 2.060 | 2.485 | 2.787 | 3.078 | 3.450 | 3.725 |
| 26 | .256 | .684 | 1.315 | 1.706 | 2.056 | 2.479 | 2.779 | 3.067 | 3.435 | 3.707 |
| 27 | .256 | .684 | 1.314 | 1.703 | 2.052 | 2.473 | 2.771 | 3.057 | 3.421 | 3.690 |
| 28 | .256 | .683 | 1.313 | 1.701 | 2.048 | 2.467 | 2.763 | 3.047 | 3.408 | 3.674 |
| 29 | .256 | .683 | 1.311 | 1.699 | 2.045 | 2.462 | 2.756 | 3.038 | 3.396 | 3.659 |
| 30 | .256 | .683 | 1.310 | 1.697 | 2.042 | 2.457 | 2.750 | 3.030 | 3.385 | 3.646 |
| 40 | .255 | .681 | 1.303 | 1.684 | 2.021 | 2.423 | 2.704 | 2.971 | 3.307 | 3.551 |
| 60 | .254 | .679 | 1.296 | 1.671 | 2.000 | 2.390 | 2.660 | 2.915 | 3.232 | 3.460 |
| 120 | .254 | .677 | 1.289 | 1.658 | 1.980 | 2.358 | 2.617 | 2.860 | 3.160 | 3.373 |
| ∞ | .253 | .674 | 1.282 | 1.645 | 1.960 | 2.326 | 2.576 | 2.807 | 3.090 | 3.291 |

ν = grados de libertad.

Fuente: Montgomery (2004)

Anexo 9. Puntos porcentuales de la distribución $F; F_{0.05, \nu_1, \nu_2}$

| $\nu_2 \backslash \nu_1$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 15 | 20 | 24 | 30 | 40 | 60 | 120 | ∞ |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 2 | 161.4 | 199.5 | 215.7 | 224.6 | 230.2 | 234.0 | 236.8 | 238.9 | 240.5 | 241.9 | 243.9 | 245.9 | 248.0 | 249.1 | 250.1 | 251.1 | 252.2 | 253.3 | 254.3 |
| 3 | 18.51 | 19.00 | 19.16 | 19.25 | 19.30 | 19.33 | 19.35 | 19.37 | 19.38 | 19.40 | 19.41 | 19.43 | 19.45 | 19.45 | 19.46 | 19.47 | 19.48 | 19.49 | 19.50 |
| 4 | 10.13 | 9.55 | 9.28 | 9.12 | 9.01 | 8.94 | 8.89 | 8.85 | 8.81 | 8.79 | 8.74 | 8.70 | 8.66 | 8.64 | 8.62 | 8.59 | 8.57 | 8.55 | 8.53 |
| 5 | 7.71 | 6.94 | 6.59 | 6.39 | 6.26 | 6.16 | 6.09 | 6.04 | 6.00 | 5.96 | 5.91 | 5.86 | 5.80 | 5.77 | 5.75 | 5.72 | 5.69 | 5.66 | 5.63 |
| 6 | 6.61 | 5.79 | 5.41 | 5.19 | 5.05 | 4.95 | 4.88 | 4.82 | 4.77 | 4.74 | 4.68 | 4.62 | 4.56 | 4.53 | 4.50 | 4.46 | 4.43 | 4.40 | 4.36 |
| 7 | 5.99 | 5.14 | 4.76 | 4.53 | 4.39 | 4.28 | 4.21 | 4.15 | 4.10 | 4.06 | 4.00 | 3.94 | 3.87 | 3.84 | 3.81 | 3.77 | 3.74 | 3.70 | 3.67 |
| 8 | 5.59 | 4.74 | 4.35 | 4.12 | 3.97 | 3.87 | 3.79 | 3.73 | 3.68 | 3.64 | 3.57 | 3.51 | 3.44 | 3.41 | 3.38 | 3.34 | 3.30 | 3.27 | 3.23 |
| 9 | 5.32 | 4.46 | 4.07 | 3.84 | 3.69 | 3.58 | 3.50 | 3.44 | 3.39 | 3.35 | 3.28 | 3.22 | 3.15 | 3.12 | 3.08 | 3.04 | 3.01 | 2.97 | 2.93 |
| 10 | 5.12 | 4.26 | 3.86 | 3.63 | 3.48 | 3.37 | 3.29 | 3.23 | 3.18 | 3.14 | 3.07 | 3.01 | 2.94 | 2.90 | 2.86 | 2.83 | 2.79 | 2.75 | 2.71 |
| 11 | 4.96 | 4.10 | 3.71 | 3.48 | 3.33 | 3.22 | 3.14 | 3.07 | 3.02 | 2.98 | 2.91 | 2.85 | 2.77 | 2.74 | 2.70 | 2.66 | 2.62 | 2.58 | 2.54 |
| 12 | 4.84 | 3.98 | 3.59 | 3.36 | 3.20 | 3.09 | 3.01 | 2.95 | 2.90 | 2.85 | 2.79 | 2.72 | 2.65 | 2.61 | 2.57 | 2.53 | 2.49 | 2.45 | 2.40 |
| 13 | 4.75 | 3.89 | 3.49 | 3.26 | 3.11 | 3.00 | 2.91 | 2.85 | 2.80 | 2.75 | 2.69 | 2.62 | 2.54 | 2.51 | 2.47 | 2.43 | 2.38 | 2.34 | 2.30 |
| 14 | 4.67 | 3.81 | 3.41 | 3.18 | 3.03 | 2.92 | 2.83 | 2.77 | 2.71 | 2.67 | 2.60 | 2.53 | 2.46 | 2.42 | 2.38 | 2.34 | 2.30 | 2.25 | 2.21 |
| 15 | 4.60 | 3.74 | 3.34 | 3.11 | 2.96 | 2.85 | 2.76 | 2.70 | 2.65 | 2.60 | 2.53 | 2.46 | 2.39 | 2.35 | 2.31 | 2.27 | 2.22 | 2.18 | 2.13 |
| 16 | 4.54 | 3.68 | 3.29 | 3.06 | 2.90 | 2.79 | 2.71 | 2.64 | 2.59 | 2.54 | 2.48 | 2.40 | 2.33 | 2.29 | 2.25 | 2.20 | 2.16 | 2.11 | 2.07 |
| 17 | 4.49 | 3.63 | 3.24 | 3.01 | 2.85 | 2.74 | 2.66 | 2.59 | 2.54 | 2.49 | 2.42 | 2.35 | 2.28 | 2.24 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.01 |
| 18 | 4.45 | 3.59 | 3.20 | 2.96 | 2.81 | 2.70 | 2.61 | 2.55 | 2.49 | 2.45 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.19 | 2.15 | 2.10 | 2.06 | 2.01 | 1.96 |
| 19 | 4.41 | 3.55 | 3.16 | 2.93 | 2.77 | 2.66 | 2.58 | 2.51 | 2.46 | 2.41 | 2.34 | 2.27 | 2.19 | 2.15 | 2.11 | 2.06 | 2.02 | 1.97 | 1.92 |
| 20 | 4.38 | 3.52 | 3.13 | 2.90 | 2.74 | 2.63 | 2.54 | 2.48 | 2.42 | 2.38 | 2.31 | 2.23 | 2.16 | 2.11 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.93 | 1.88 |
| 21 | 4.35 | 3.49 | 3.10 | 2.87 | 2.71 | 2.60 | 2.51 | 2.45 | 2.39 | 2.35 | 2.28 | 2.20 | 2.12 | 2.08 | 2.04 | 1.99 | 1.95 | 1.90 | 1.84 |
| 22 | 4.32 | 3.47 | 3.07 | 2.84 | 2.68 | 2.57 | 2.49 | 2.42 | 2.37 | 2.32 | 2.25 | 2.18 | 2.10 | 2.05 | 2.01 | 1.96 | 1.92 | 1.87 | 1.81 |
| 23 | 4.30 | 3.44 | 3.05 | 2.82 | 2.66 | 2.55 | 2.46 | 2.40 | 2.34 | 2.30 | 2.23 | 2.15 | 2.07 | 2.03 | 1.98 | 1.94 | 1.89 | 1.84 | 1.78 |
| 24 | 4.28 | 3.42 | 3.03 | 2.80 | 2.64 | 2.53 | 2.44 | 2.37 | 2.32 | 2.27 | 2.20 | 2.13 | 2.05 | 2.01 | 1.96 | 1.91 | 1.86 | 1.81 | 1.76 |
| 25 | 4.26 | 3.40 | 3.01 | 2.78 | 2.62 | 2.51 | 2.42 | 2.36 | 2.30 | 2.25 | 2.18 | 2.11 | 2.03 | 1.98 | 1.94 | 1.89 | 1.84 | 1.79 | 1.73 |
| 26 | 4.24 | 3.39 | 2.99 | 2.76 | 2.60 | 2.49 | 2.40 | 2.34 | 2.28 | 2.24 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.96 | 1.92 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71 |
| 27 | 4.23 | 3.37 | 2.98 | 2.74 | 2.59 | 2.47 | 2.39 | 2.32 | 2.27 | 2.22 | 2.15 | 2.07 | 1.99 | 1.95 | 1.90 | 1.85 | 1.80 | 1.75 | 1.69 |
| 28 | 4.21 | 3.35 | 2.96 | 2.73 | 2.57 | 2.46 | 2.37 | 2.31 | 2.25 | 2.20 | 2.13 | 2.06 | 1.97 | 1.93 | 1.88 | 1.84 | 1.79 | 1.73 | 1.67 |
| 29 | 4.20 | 3.34 | 2.95 | 2.71 | 2.56 | 2.45 | 2.36 | 2.29 | 2.24 | 2.19 | 2.12 | 2.04 | 1.96 | 1.91 | 1.87 | 1.82 | 1.77 | 1.71 | 1.65 |
| 30 | 4.18 | 3.33 | 2.93 | 2.70 | 2.55 | 2.43 | 2.35 | 2.28 | 2.22 | 2.18 | 2.10 | 2.03 | 1.94 | 1.90 | 1.85 | 1.81 | 1.75 | 1.70 | 1.64 |
| 40 | 4.17 | 3.32 | 2.92 | 2.69 | 2.53 | 2.42 | 2.33 | 2.27 | 2.21 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.93 | 1.89 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.68 | 1.62 |
| 60 | 4.08 | 3.23 | 2.84 | 2.61 | 2.45 | 2.34 | 2.25 | 2.18 | 2.12 | 2.08 | 2.00 | 1.92 | 1.84 | 1.79 | 1.74 | 1.69 | 1.64 | 1.58 | 1.51 |
| 120 | 3.92 | 3.07 | 2.68 | 2.45 | 2.29 | 2.17 | 2.09 | 2.02 | 1.96 | 1.91 | 1.83 | 1.75 | 1.66 | 1.61 | 1.55 | 1.50 | 1.45 | 1.39 | 1.35 |

Fuente: Montgomery (2004)

Anexo 10. Informe de ensayo



Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LR - 050

INFORME DE ENSAYO LAS-AC-18-02480

Fecha de emisión : 20/11/2018

Página 1 de 3

Señores : ROLANDO RODY JARA HUARANCCA
 Dirección : JULIACA - PUNO
 Atención : SERVICIOS DE ANALISIS DE MUESTRAS DE AGUA
 Proyecto : APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELECTRO - FENTON PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MATADERO AYAVIRI - PUNO

PROTOCOLO DE MUESTREO

Muestreo realizado por : Cliente : ROLANDO RODY JARA HUARANCCA Fecha de recepción : 14/11/2018
 Registro de muestreo : 389-18 Fecha de ensayo : 14/11/2018
 Procedimiento Aplicado : Muestreado por el cliente Nro de muestras : 9

| Cod. Interno L.A.S. | (c) Nombre de muestra | (c) Matriz de la muestra | (c) Lugar de muestreo | (c) Punto de muestreo y/o coordenadas | (c) Fecha de inicio de muestreo | (c) Hora de inicio de muestreo |
|---------------------|---|--|--|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| AG18001013 | AGUA RESIDUAL DE MATADERO | Agua Residual - Agua Residual Industrial | CAMAL MUNICIPAL / AYAVIRI / MELGAR / PUNO | 327034,866 E 8354848,916 N | 13/11/2018 | 14:30 |
| AG18001014 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DEL pH | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001015 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001016 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DE LA DENSIDAD CORRIENTE | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001017 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DE LA DOSIS H2O2 | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001018 | MUESTRA TRATADA - DISEÑO EXPERIMENTAL N° 04 | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929 E 8286618,188 N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001019 | MUESTRA TRATADA - DISEÑO EXPERIMENTAL N° 10 | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001020 | MUESTRA TRATADA - DISEÑO EXPERIMENTAL N° 21 | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |
| AG18001021 | MUESTRA TRATADA - DISEÑO EXPERIMENTAL N° 29 | Agua Residual - Agua Residual Industrial | URB. LA CAPILLA - JULIACA - SAN ROMAN - PUNO | 376659,929E / 8286618,188N | 13/11/2018 | 18:45 |

(c) : datos proporcionados por el cliente.

| |
|---|
| Condiciones de recepción de la muestra |
| Cooler refrigerado |

| |
|--------------------------------------|
| Observación |
| Datos proporcionados por el cliente. |

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Sixto Vicerio Juárez Neira
 Gerente General
 Ing. Químico C.I.P. 19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.
 "Valor numérico" = Límite de detección del método, "Valor Numérico" = Límite de cuantificación del método.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.
 Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Parque Industrial Río Seco C - 1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
 Teléfono (054) 443294 Fax (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

A-18 N° 4613



Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Registro N° LE - 050

INFORME DE ENSAYO LAS-AC-18-02480

Fecha de emisión : 20/11/2018

Página 2 de 3

RESULTADOS DE ENSAYO FISICO QUIMICO

| Código Interno L.A.S. | Nombre de Muestra | *807 | | 808 | | 860 |
|-----------------------|---|-------|------|--------------|------|---------|
| | | C | E | pH | T | DQO |
| | | mS/cm | °C | Unidad de pH | °C | mg O2/L |
| AG18001013 | AGUA RESIDUAL DE MATADERO | 1,990 | 18,9 | 7,48 | 19,9 | 7630 |
| AG18001014 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DEL pH | 2,325 | 18,4 | 4,55 | 19,4 | 1440 |
| AG18001015 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS | 1,751 | 19,1 | 5,93 | 19,1 | 657 |
| AG18001016 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DE LA DENSIDAD CORRIENTE | 2,361 | 18,0 | 5,36 | 19,2 | 980 |
| AG18001017 | MUESTRA TRATADA - EFECTO DE LA DOSIS H2O2 | 2,290 | 20,6 | 4,47 | 20,1 | 655 |
| AG18001018 | MUESTRA TRATADA -DISEÑO EXPERIMENTAL N° 04 | 1,515 | 19,4 | 5,43 | 19,4 | 650 |
| AG18001019 | MUESTRA TRATADA -DISEÑO EXPERIMENTAL N° 10 | 2,271 | 19,8 | 4,16 | 20,1 | 1060 |
| AG18001020 | MUESTRA TRATADA -DISEÑO EXPERIMENTAL N° 21 | 2,082 | 20,1 | 5,88 | 20,0 | 512 |
| AG18001021 | MUESTRA TRATADA -DISEÑO EXPERIMENTAL N° 29 | 2,043 | 20,0 | 3,46 | 20,0 | 530 |

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico" = Límite de detección del método, "Valor Numérico" = Límite de cuantificación del método.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Parque Industrial Río Seco C - 1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
Teléfono (054) 443294 Fax (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

A-18 N° 4614



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



INFORME DE ENSAYO LAS-AC-18-02480

Fecha de emisión : 20/11/2018

Página 3 de 3

MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS

| Código | Título | Rango |
|--------|--|-------------------------------------|
| *807 | ASTM D 1125 - 95 Método de ensayo estándar para la conductividad eléctrica y resistividad del agua | [^b 12.6 - 50] mS/cm |
| 808 | Determinación de pH en aguas SMEWW. 22 th Ed 4500-H pH Part.B. Electrometric Method. (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO) | [^a 0 - 14] Unidad de pH |
| 860 | Ensayo de demanda química de oxígeno en aguas DQO SMEWW. 22 th Ed 5220-COD Part.D. Closed reflux, Colorimetric Method. (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO) | [^b 2 - 10000] mg O2/L |

^a : Límite detección ^b : Límite de cuantificación

[Firma]
 Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Sido Vicento Juárez Neira
 Gerente General
 Ing. Químico C.I.P. 19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"<Valor numérico" = Límite de detección del método, ">Valor Numérico" = Límite de cuantificación del método.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Parque Industrial Río Seco C - 1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
 Teléfono (054) 443294 Fax (054) 444582 www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

A-18 N° 4615

Anexo 11. Normas legales

| | |
|--|---|
| <p>El Peruano / Lunes 11 de marzo de 2019</p> <p style="text-align: center;">NORMAS LEGALES</p> <p style="text-align: right;">17</p> <p>Artículo 2.- Incorporación de los artículos 13-A y 14-A al Reglamento de la Ley N° 29973, Ley General de la Persona con Discapacidad, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2014-MIMP. Incorpórase los artículos 13-A y 14-A al Reglamento de la Ley N° 29973, Ley General de la Persona con Discapacidad, aprobado por Decreto Supremo N° 002-2014-MIMP, quedando redactado de la siguiente manera:</p> <p>“Artículo 13-A.- Supervisión de las condiciones de accesibilidad en los espacios públicos y privados de uso público con fines recreacionales y que cuenten con juegos infantiles. El Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad – CONADIS supervisa el cumplimiento de las condiciones de accesibilidad en los espacios públicos y privados de uso público con fines recreacionales y que cuenten con juegos infantiles. Ante el incumplimiento de las normas de accesibilidad respecto de edificaciones privadas, el CONADIS elabora y remite al Gobierno Local el informe técnico de supervisión, en un plazo de cinco (5) días hábiles, para su evaluación, y si fuera el caso, el inicio del procedimiento administrativo sancionador. Concluido dicho procedimiento, se comunica al CONADIS para que lo incorpore en el informe anual que remite al Congreso de la República.”</p> <p>Artículo 14-A.- Cumplimiento de las normas de accesibilidad (...) Los gobiernos locales, en el marco de sus competencias, emiten las disposiciones necesarias para fiscalizar y sancionar el incumplimiento de las normas de accesibilidad en las edificaciones privadas ubicadas en sus jurisdicciones, considerando como circunstancia agravante cuando los espacios privados de acceso y uso público con fines recreacionales que cuenten con juegos infantiles no sean accesibles para niños, niñas y adolescentes con discapacidad”.</p> <p>Artículo 3.- Financiamiento La implementación de la presente norma se financia con cargo al presupuesto institucional de las entidades involucradas, sin demandar recursos adicionales al Tesoro Público.</p> <p>Artículo 4.- Refrendo El presente Decreto Supremo es refrendado por la Ministra de la Mujer y Poblaciones Vulnerables, el Ministro de la Producción, la Ministra de Salud, el Ministro de Educación y el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.</p> <p style="text-align: center;">DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS FINALES</p> <p>Primera.- DISPOSICIÓN NORMATIVA DE LOS GOBIERNOS LOCALES Los gobiernos locales, en un plazo de noventa (90) días hábiles, establecen las disposiciones normativas necesarias para la fiscalización de las edificaciones privadas y su correspondiente sanción por el incumplimiento de las normas de accesibilidad, adecuación urbanística y arquitectónica para las personas con discapacidad.</p> <p>Segunda.- CRITERIOS DE ACCESIBILIDAD Y DISEÑO UNIVERSAL El Instituto Nacional de la Calidad – INACAL, en coordinación con el CONADIS, en un plazo de ciento ochenta (180) días hábiles, contados a partir del día siguiente de la publicación del presente Decreto Supremo, emite la Norma Técnica que contiene los requisitos técnicos para los juegos infantiles ubicados en los espacios públicos y privados de uso público con fines recreacionales para los niños, niñas y adolescentes con discapacidad, considerando criterios de accesibilidad y de diseño universal, garantizando especialmente su seguridad.</p> | <p>Tercera.- INFORME ANUAL AL CONGRESO DE LA REPÚBLICA El Presidente del Consejo Nacional para la Integración de la Persona con Discapacidad remite el informe sobre el cumplimiento de la Ley N° 30603, Ley que garantiza el derecho al juego y la accesibilidad urbana para niños, niñas y adolescentes con discapacidad a la Comisión de Inclusión Social y Personas con Discapacidad del Congreso de la República, en el marco del Día Nacional de la Persona con Discapacidad.</p> <p>Cuarta.- ELABORACIÓN DE LA ESTRATEGIA NACIONAL El Ministerio de Salud, el Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables, a través del CONADIS; y en coordinación con los gobiernos regionales, en un plazo de ciento ochenta (180) días hábiles, elaboran una Estrategia Nacional Multianual para promover el acceso de las personas con discapacidad a las tecnologías de apoyo, dispositivos y ayudas compensatorias.</p> <p>Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los nueve días del mes de marzo del año dos mil diecinueve.</p> <p>MARTÍN ALBERTO VIZCARRA CORNEJO Presidente de la República</p> <p>DANIEL ALFARO PAREDES Ministro de Educación</p> <p>ANA MARÍA MENDIETA TREFOGLI Ministra de la Mujer y Poblaciones Vulnerables</p> <p>RAÚL PÉREZ-REYES ESPEJO Ministro de la Producción</p> <p>ELIZABETH ZULEMA TOMÁS GONZÁLES Ministra de Salud</p> <p>JAVIER PIQUÉ DEL POZO Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento</p> <p>1748339-2</p> <div style="background-color: #cccccc; padding: 10px; text-align: center;"> <p>VIVIENDA, CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO</p> </div> <p>Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario</p> <p style="text-align: center;">DECRETO SUPREMO N° 010-2019-VIVIENDA</p> <p style="text-align: center;">EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA</p> <p style="text-align: center;">CONSIDERANDO:</p> <p>Que, el artículo 6 de la Ley N° 30156, Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en concordancia con el artículo 5 del Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento, establece que este Ministerio es el Ente rector de las políticas nacionales y sectoriales dentro de su ámbito de competencia, las cuales son de obligatorio cumplimiento por los tres niveles de gobierno en el marco del proceso de descentralización, y en todo el territorio nacional;</p> <p>Que, el artículo 25 del citado Decreto Legislativo, establece la prohibición de descargar en las redes de alcantarillado sanitario, sustancias o elementos extraños que contravengan las normas vigentes sobre la calidad de los efluentes; para ello, los usuarios del servicio de</p> |
|--|---|

Quinta.- Asistencia Técnica

Sin perjuicio de las funciones que realicen las entidades e instituciones con competencias reconocidas en materia de saneamiento, el Organismo Técnico de la Administración de los Servicios de Saneamiento (OTASS), en el marco de sus funciones y competencias, brinda asistencia técnica a los prestadores de servicios de saneamiento del ámbito urbano, para el adecuado cumplimiento del presente Reglamento.

DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS TRANSITORIAS

Primera.- Plazo para el Registro de UND

Los prestadores de los servicios de saneamiento tienen un plazo máximo de un (1) año, contados desde el día siguiente de la publicación del presente Reglamento en el Diario Oficial El Peruano, para registrar y/o actualizar a la totalidad de sus UND que se encuentren dentro de su ámbito de responsabilidad.

Segunda.- Implementación del punto de toma de muestra del UND

Los prestadores de los servicios de saneamiento, en un plazo no mayor de dos (2) años, contados a partir del día siguiente de publicado el presente Reglamento en el Diario Oficial El Peruano, realizan las acciones necesarias para implementar, bajo responsabilidad, que todos los UND cuenten con una caja de registro o dispositivo similar como conexión domiciliaria en la parte externa de su predio, acorde con las características y especificaciones técnicas establecidas en la normativa sectorial.

Tercera.- Procedimiento para identificar y determinar el punto de toma de muestra temporal del UND

En tanto se implemente la instalación del punto de toma de muestra o conexión domiciliaria mencionada en la Segunda Disposición Complementaria Transitoria, a efectos de aplicar lo dispuesto en el presente Reglamento, los prestadores de los servicios de saneamiento, identifican y determinan el punto de toma de muestra temporal del UND, el cual en todos los casos debe estar ubicado antes de la red de alcantarillado sanitario. Para dicho fin, se debe cumplir con el procedimiento siguiente:

1. El prestador de los servicios de saneamiento, notifica al UND, precisando el día y hora en que se lleva a cabo la visita a sus instalaciones, a fin de realizar la verificación y determinación del punto de toma de muestra temporal, el cual puede contar con la presencia del UND o su representante, persona encargada o con la persona que se encuentre en las instalaciones. Dicha notificación se realiza con cinco (5) días previos a la inspección a las instalaciones del UND.

2. El prestador de los servicios de saneamiento se apersona a las instalaciones del UND a efectos de proceder con lo señalado en el numeral precedente, previa verificación de que la notificación realizada al UND, cumple con las disposiciones establecidas en el artículo 21 del Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General (TUO de la Ley N° 27444), aprobado por el Decreto Supremo N° 006-2017-JUS, para lo cual procede a levantar el Acta de inspección, según el formato aprobado en el Anexo N° 3 del presente Reglamento.

3. Durante la diligencia, el personal del prestador de los servicios de saneamiento solicita, bajo responsabilidad, al UND o su representante, la presentación del diagrama de flujo y balance hídrico a aquellos UND cuyos volúmenes y concentraciones de descarga de aguas residuales no domésticas afecten significativamente el sistema de alcantarillado sanitario y tratamiento de aguas residuales. La no presentación de la documentación antes mencionada no invalida la diligencia ni el Acta de inspección. Sin perjuicio de ello, el prestador de los servicios de saneamiento, puede otorgar un plazo máximo de treinta (30) días hábiles, a partir del día siguiente de realizada la diligencia, a efectos que el UND cumpla con presentarlos. El incumplimiento de este plazo determina la suspensión temporal establecida en el artículo 15 del presente Reglamento.

4. En el Acta de inspección debe constar la determinación del punto de toma de muestra temporal. La suscripción del Acta por parte del UND o su representante no es obligatoria, por lo que si este se niega a suscribirla, no la invalida, sin perjuicio de que consigne dicha circunstancia en el Acta. Una copia del Acta debe ser entregada al UND o su representante.

5. Si el UND o su representante no permite el ingreso a sus instalaciones u obstaculiza las labores del personal del prestador de los servicios de saneamiento debidamente identificado, este procede a consignar dicha circunstancia en el Acta de inspección, y a suspender temporalmente el servicio de agua potable y alcantarillado sanitario, hasta la efectiva realización de la inspección. El Acta de inspección es notificada al UND o su representante en el momento de la diligencia, cumpliendo con las disposiciones establecidas en los párrafos 21.1, 21.3 y 21.4 del artículo 21 del TUO de la Ley N° 27444.

6. Suspendidos temporalmente los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario, el prestador de los servicios de saneamiento reprograma la visita a las instalaciones del UND, a solicitud de este, para lo cual debe restablecer los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario, de acuerdo a las disposiciones que para dicho fin apruebe la Sunass.

ANEXO N° 1

| PARÁMETRO | UNIDAD | SIMBOLOGÍA | VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO |
|-------------------------------|--------|------------------|---|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | mg/l | DBO ₅ | 500 |
| Demanda Química de Oxígeno | mg/l | DQO | 1000 |
| Sólidos Suspendedos Totales | mg/l | S.S.T. | 500 |
| Aceites y Grasas | mg/l | A y G | 100 |

ANEXO N° 2

| PARÁMETRO | UNIDAD | SIMBOLOGÍA | VMA PARA DESCARGAS AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO |
|-----------------------|--------|-------------------------------|---|
| Aluminio | mg/l | Al | 10 |
| Arsénico | mg/l | As | 0.5 |
| Boro | mg/l | B | 4 |
| Cadmio | mg/l | Cd | 0.2 |
| Cianuro | mg/l | CN- | 1 |
| Cobre | mg/l | Cu | 3 |
| Cromo hexavalente | mg/l | Cr ⁶⁺ | 0.5 |
| Cromo total | mg/l | Cr | 10 |
| Manganeso | mg/l | Mn | 4 |
| Mercurio | mg/l | Hg | 0.02 |
| Níquel | mg/l | Ni | 4 |
| Plomo | mg/l | Pb | 0.5 |
| Sulfatos | mg/l | SO ₄ ⁻² | 1000 |
| Sulfuros | mg/l | S ⁻² | 5 |
| Zinc | mg/l | Zn | 10 |
| Nitrógeno Amoniacal | mg/l | NH ⁺⁴ | 80 |
| Potencial Hidrógeno | unidad | pH | 6-9 |
| Sólidos Sedimentables | ml/h | S.S. | 8.5 |
| Temperatura | °C | T | <35 |

(1) La aplicación de estos parámetros a cada actividad económica por procesos productivos, es la precisada en el presente Reglamento tomando como referencia el código CIU. Aquellas actividades que no estén incluidas en este código, deben cumplir con los parámetros indicados en el presente Anexo. Los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 del presente Reglamento, son determinados a partir del análisis de muestras puntuales.

(2) Las concentraciones de los parámetros establecidos en los Anexos N° 1 y N° 2 deben ser determinadas a partir del análisis de muestras puntuales.

DECRETO SUPREMO N.º - 2009- MINAM

**APRUEBA LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) PARA EFLUENTES DE
ACTIVIDADES AGROINDUSTRIALES TALES COMO PLANTA DE CAMALES Y
PLANTAS DE BENEFICIO**

Lima,

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 3º de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, referido al rol del Estado en materia ambiental, dispone que éste, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, entre otras, las normas que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en dicha ley;

Que, el artículo 33º, inciso 4, de la Ley General del Ambiente dispone que en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplica el principio de la gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, el artículo 117º de la Ley General del Ambiente señala en sus incisos 1 y 2 que el control de las emisiones se realiza a través de los LMP y demás instrumentos de gestión ambiental establecidos por las autoridades competentes; y que la infracción de los LMP es sancionada de acuerdo con las normas correspondientes;

Que el artículo 1.º de la Ley N.º 28817, Ley que Establece Plazos para la Elaboración y Aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y de Límites Máximos Permisibles (LMP) de Contaminación Ambiental, dispone que la Autoridad Ambiental Nacional, que dirige el proceso de elaboración y revisión de ECA y LMP, culminará dicho proceso en un plazo no mayor de dos (2) años, contados a partir de la vigencia de dicha ley;

Que, el Estado ha determinado como una acción prioritaria la determinación de LMP para aquellas actividades que no lo tengan, de tal forma que se asegure el cumplimiento de objetivos ambientales. En ese sentido, el Congreso de la República aprobó la Ley que Establece Plazos para la Elaboración y Aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y de Límites Máximos Permisibles (LMP) de Contaminación, Ley N.º 28817, y el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) aprobó el Cronograma de Priorizaciones, mediante el Decreto de Consejo Directivo N.º 029-2006-CONAM/CD;

Que, el artículo 1º del Decreto Supremo No. 068-82-ITI/IND establece que el beneficio de ganado, aves y otros animales menores es una actividad agroindustrial, siempre que la misma implique la transformación de materias primas de origen agropecuario que mayoritariamente sean de producción nacional.

Que, mediante Decreto Legislativo N.º 1013 se aprobó la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente, señalándose su ámbito de

- **Planta de beneficio.** Todo establecimiento dotado con instalaciones necesarias y equipos mínimos requeridos para el beneficio de animales para consumo humano, así como para tareas complementarias de elaboración o industrialización.
- **Programa de monitoreo.** Programa aprobado por la autoridad competente, en el cual se indican la ubicación de los puntos de control, el muestreo, la medición de parámetros, los métodos de análisis y las frecuencias de monitoreo de cada punto. El programa debe contar con una fase de control de calidad.
- **Protocolo de monitoreo de agua y efluentes de la actividad agroindustrial.** Documento publicado por la autoridad competente, en el que se indican los procedimientos que se deben seguir para el monitoreo de la calidad de aguas y efluentes líquidos de las actividades mencionadas en el presente decreto supremo.
- **Punto de control.** Ubicación aprobada por la autoridad competente en la cual son obligatorios el monitoreo y el cumplimiento de los LMP.
- **SENASA.** Servicio nacional de sanidad agraria.
- **Tratamiento.** Cualquier proceso, método o técnica que permita modificar las características físicas, químicas o biológicas del residuo líquido a fin de reducir o eliminar su potencial peligro de daño a la salud y al ambiente.

Artículo 3.º. De la aprobación de los Límites Máximos Permisibles para la efluentes líquidos de las actividades agroindustriales en promedio diario.

3.1- Apruébese los Límites Máximos Permisibles (LMP) de efluentes líquidos tratados de las actividades agroindustriales hacia los cuerpos de agua naturales no excederán los valores indicados en la tabla N.º 1.

Tabla N.º 1

Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de la de la actividad agroindustrial tales como planta de camales y plantas de beneficio, incluyendo los mataderos en promedio diario.

| | Parámetros | Unidad | LMP | Método de ensayo |
|------------|--|--------|-----------|--|
| I | Generales | | | |
| 1 | pH | - | 6,0 – 9,0 | APHA 4500-H+ - B, págs. 4-90 a 4-94, 21.ª edición.2005 |
| 2 | Sólidos suspendidos totales | mg/L | 300 | APHA 2540-D, págs. 2-58 a 2-59, 21.ª edición.2005 |
| II | Orgánicos | | | |
| 3 | Demanda bioquímica de oxígeno -DBO _{5, 20 °C} | mg/L | 250 | APHA-AWWA-WEF-5210 B, ED. 21 TH.2005 |
| 4 | Demanda química de oxígeno-DQO | mg/L | 500 | EPA 410.2.1999 |
| III | Inorgánicos | | | |
| 5 | Fósforo total | mg/L | 40 | Standard methods for the examination of water and |

Anexo 12. Evidencias fotográficas



Figura 27. Matadero municipal de la ciudad de Ayaviri



Figura 28. Canaleta de evacuación de las aguas residuales



Figura 29. Laguna de tratamiento de las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Ayaviri

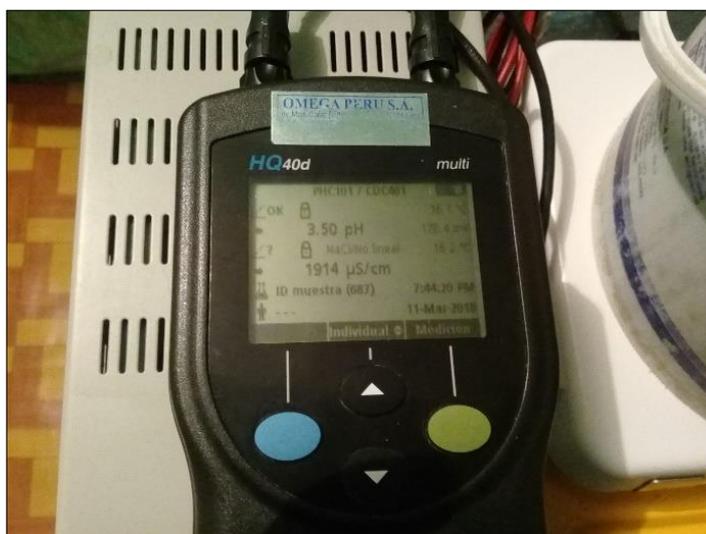


Figura 30. Multiparámetro empleado para la determinación de pH y conductividad

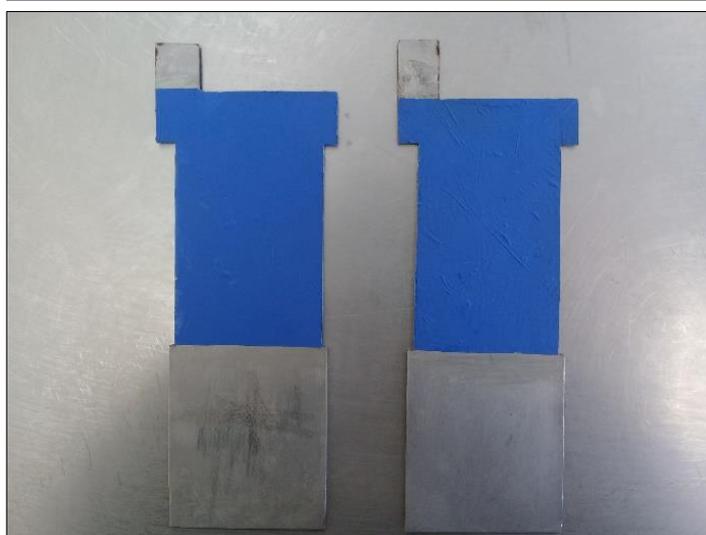
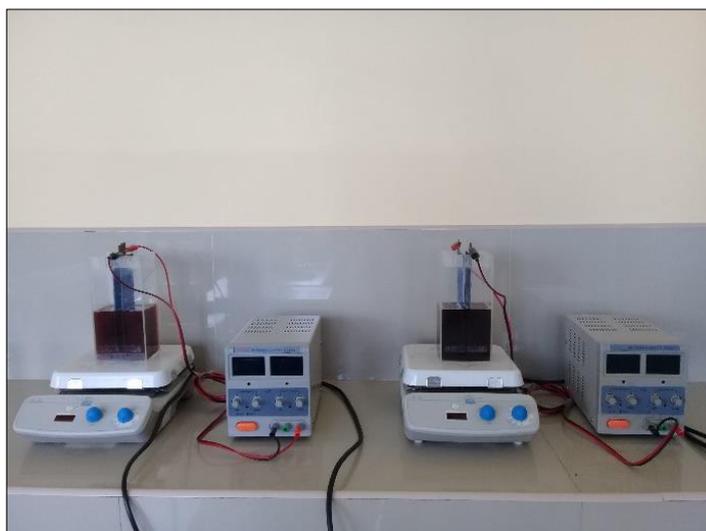


Figura 31. Celdas electrolíticas y electrodos de hierro para el tratamiento de las aguas residuales rojas



Figura 32. Celdas electrolíticas durante el tratamiento de las aguas residuales



Figura 33. Filtración de las muestras después del tratamiento por electro-Fenton

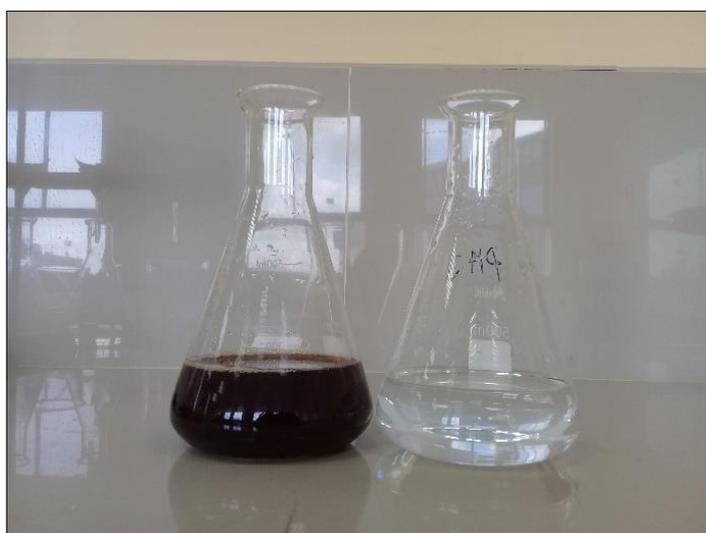


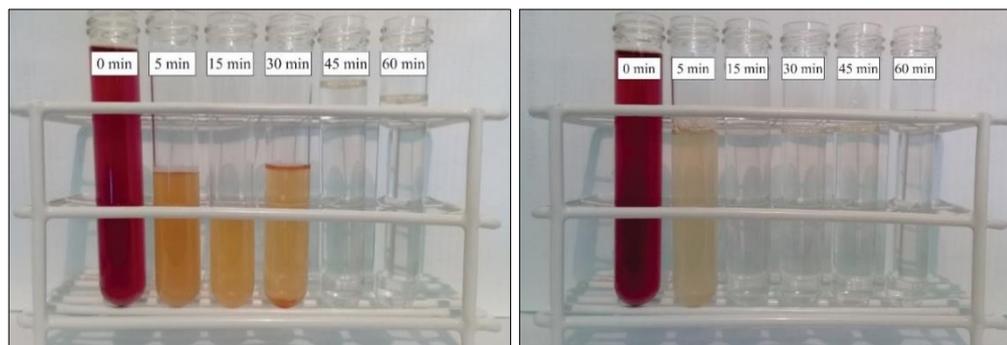
Figura 34. Muestra de agua residual antes y después del tratamiento por electro-Fenton



Figura 35. Equipamiento para la digestión de las muestras

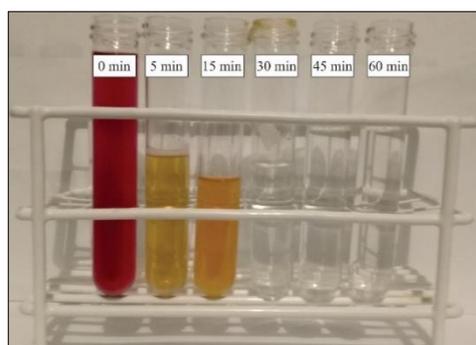


Figura 36. Equipamiento para la titulación de las muestras



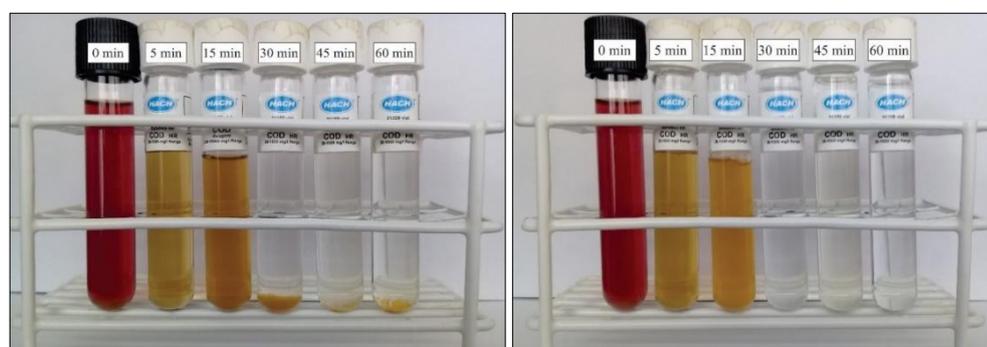
(a) pH 2.10

(b) pH 4.03



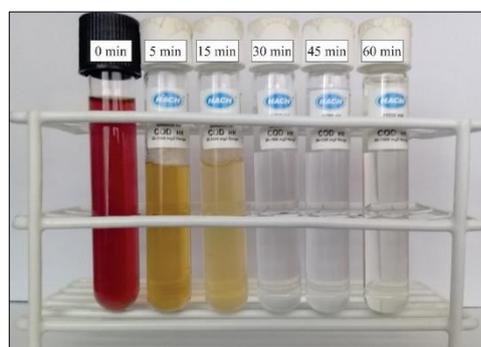
(c) pH 6.15

Figura 37. Muestras de agua residual roja tratadas a distintos pH



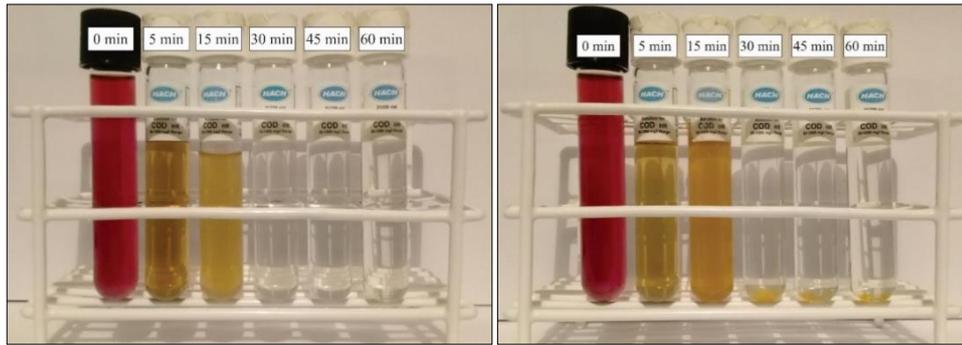
(a) 0.5 A

(b) 0.75 A



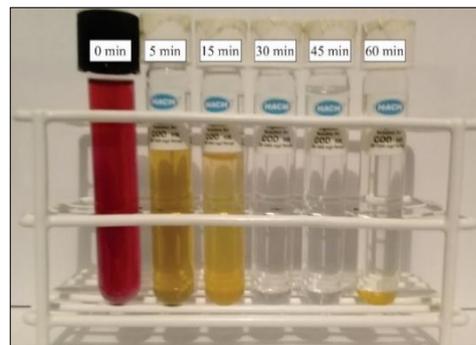
(c) 1.0 A

Figura 38. Muestra de agua residual roja tratadas a distintas corrientes.



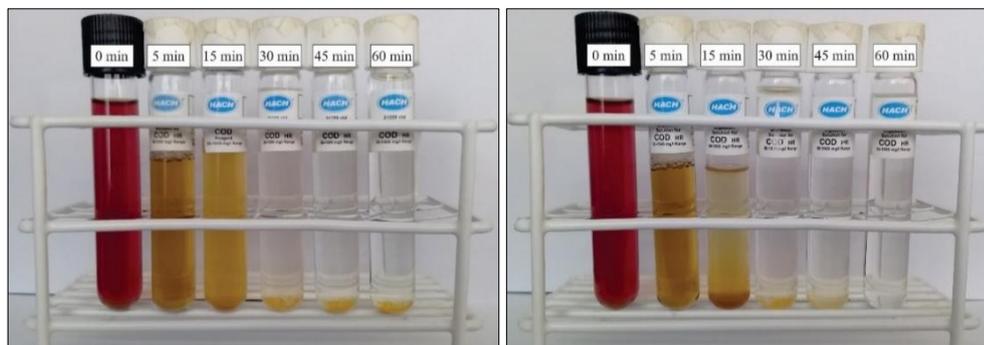
(a) 6 mL/L de H₂O₂

(b) 12 mL/L de H₂O₂



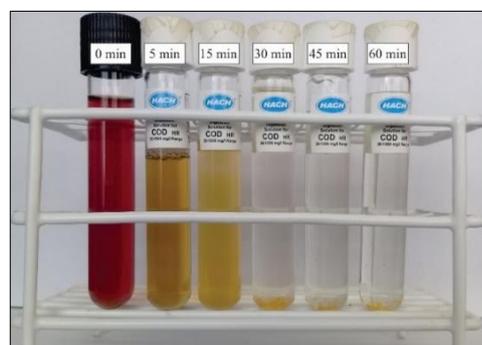
(c) 18 mL/L de H₂O₂

Figura 39. Muestras de agua residual roja tratadas a distintas dosis de H₂O₂



(a) 0.5 cm

(b) 1.0 cm



(c) 2.0 cm

Figura 40. Muestras de agua residual roja tratadas a distintos distanciamientos de electrodos