



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
DE PROCESOS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
QUÍMICA**

**TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO DE JAQUIRA POR ELECTROCOAGULACIÓN**

Tesis presentada por:

KRIZIA GIOVANA NINAN VALER

Bachiller en Ingeniería Química, UNSAAC-Cusco, Perú

MARY CARMEN ZAMBRANO JARANDILLA

Bachiller en Ingeniería Química, UNSAAC-Cusco, Perú

Asesor:

ING. WASHINGTON JULIO LECHUGA CANAL

**Tesis para optar al Título Profesional de:
Ingeniero Químico**

Cusco, Febrero del 2019

DEDICATORIAS

Esta Tesis dedico a Dios y a la Virgen María por guiarme por el buen camino, y darme fuerzas para seguir adelante y no rendirme en esta vida, por darme valor para levantarme y seguir adelante sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mis padres Sócrates Zambrano F. y Juana Jarandilla O., por ser quienes me enseñaron el valor de luchar y ser una mejor persona día a día, para conseguir mis sueños, por su amor, y por estar conmigo en los momentos felices y difíciles. Los AMO.

A mis hermanos, tíos y abuelos por sus constantes consejos de superación. Por estar conmigo y ser un apoyo constante en este trayecto de mi vida.

A mi Amado y Querido Precioso por enseñarme el valor de la familia, siempre estarás en mi mente y en mi corazón.

Atte.: Mary Carmen Zambrano Jarandilla.

En primer lugar dedico esta tesis a Dios, por ser el inspirador, forjador de mi camino y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mi amada hija Luciana Abril, tu afecto y cariño son los detonantes de mi felicidad, por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme y buscar lo mejor para ti.

A mi mamá Basilia Valer E. y mi papá Valentin Ninan Y., quienes han sido un pilar fundamental en mi formación como profesional y con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante.

A mis hermanos Roosmary, Jhon y Rosio que siempre me apoyan incondicionalmente, con sus palabras y compañía.

A mi compañero de vida, mi esposo Guido Omar, gracias por estar conmigo en los momentos más difíciles, brindándome tu amor, paciencia y comprensión.

Por ultimo a mis amigas Rosmery, Yesi, Sandra y mi madrina Guadalupe Angulo que comparten cada momento conmigo. Todos ellos los responsables de este gran logro.

Atte.: Krizia Giovana Ninan Valer.

AGRADECIMIENTO

En el presente trabajo de tesis primeramente nos gustaría agradecer a Dios por ser nuestro amparo y fortaleza, guía, fundamento y bendecirnos para llegar hasta donde hemos llegado, para seguir siempre adelante.

A nuestros familiares que siempre nos han apoyado demostrando su cariño, alegría y amistad incondicional, siempre aconsejándonos para continuar siempre adelante en nuestra vida personal y profesional.

Agradecemos de forma especial a nuestro asesor de tesis Ing. Washington Julio Lechuga Canal, por su asesoría y dedicación, quien, con sus conocimientos, experiencia, paciencia y motivación llegamos a concluir y desarrollar la tesis con éxito. A la Ing. Mirian Salas Pino por permitirnos utilizar sus instalaciones para desarrollar nuestra tesis.

A los docentes de esta prestigiosa Universidad que compartieron con nosotros sus conocimientos, aportando cada uno con un granito de arena en nuestra formación, brindándonos consejos y su amistad.

A la Municipalidad Provincial del Cusco, al Ing. Dante Vargas Rodríguez, por facilitarnos el acceso al Relleno Sanitario de Jaquira, para la toma de muestra, por guiarnos en la ejecución y apoyo para la finalización de este proyecto.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestra vida profesional, compañeros de la carrera a las que nos encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en cada momento.

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO.

En cumplimiento a lo dispuesto por el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de Procesos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, presentamos a vuestra consideración la tesis intitulado:

TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE JAQUIRA POR ELECTROCOAGULACIÓN.

El presente trabajo de investigación está orientado al tratamiento de los lixiviados que son generados por la descomposición natural de la basura de los rellenos sanitarios por electrocoagulación.

Se espera que la presente sirva de referencia y consulta para posteriores investigaciones.

INDICE

DEDICATORIAS	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
PRESENTACIÓN.....	iii
RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPITULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:.....	2
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.4. TIPO DE INVESTIGACIÓN	3
1.5. ANTECEDENTES:	3
CAPITULO II	7
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. RESIDUOS SÓLIDOS	7
2.2. DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS	7
2.2.1. RELLENO SANITARIO.....	8
2.3. RELLENO SANITARIO DE JAQUIRA.....	9
2.4. LIXIVIADOS	10
2.5. CLASIFICACIÓN DE LOS LIXIVIADOS.....	13
2.5.1. LIXIVIADOS NUEVOS.....	13
2.5.2. LIXIVIADOS INTERMEDIOS.....	14
2.5.3. LIXIVIADOS ESTABILIZADOS O ANTIGUOS.....	14
2.6. EFECTOS DAÑINOS DE LOS LIXIVIADOS EN LA SALUD	14
2.7. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS PARA LOS LIXIVIADOS.....	15
2.7.1. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR PROCESOS BIOLÓGICOS.....	16
2.7.2. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR ÓSMOSIS INVERSA.....	17
2.7.3. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA).....	17
2.7.4. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR OZONIZACIÓN.....	18
2.7.5. PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON.....	18

2.7.6.	TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN.	19
2.8.	TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE JAQUIRA DE JAQUIRA	20
2.9.	CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS LIXIVIADOS	20
2.9.1.	COLOR	20
2.9.2.	OLOR	20
2.9.3.	COLOIDES	21
2.9.4.	SÓLIDOS TOTALES (ST)	21
2.9.5.	SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES (SVT)	22
2.9.6.	SÓLIDOS FIJOS TOTALES (SFT)	22
2.9.7.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)	22
2.9.8.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV)	22
2.9.9.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS (SSF)	22
2.9.10.	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)	22
2.9.11.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	22
2.9.12.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	23
2.9.13.	COMPONENTES FÍSICOS Y PARÁMETROS QUÍMICOS DE LOS LIXIVIADOS	24
2.10.	ELECTROQUÍMICA	25
2.10.1.	CELDAS ELECTROQUÍMICAS	25
2.10.2.	ELECTROLISIS	27
2.10.3.	LEYES DE FARADAY	28
2.10.4.	ECUACIÓN DE NERNST	31
2.11.	ELECTROCOAGULACIÓN	32
2.11.1.	MECANISMO DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES	34
2.11.2.	FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN	38
2.11.2.1.	DENSIDAD DE CORRIENTE O CARGA	38
2.11.2.2.	PRESENCIA DE CLORUROS DE SODIO	39
2.11.2.3.	EFECTO DEL pH	39
2.11.2.4.	EFECTO DE LA TEMPERATURA	40
2.11.2.5.	TIPO DE MATERIAL DE LOS ELECTRODOS	40
2.11.2.6.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELECTRODOS	41
2.11.2.7.	TIEMPO DE RETENCIÓN	41
2.11.3.	TIPOS DE FLUJO HIDRÁULICO EN REACTORES DE COAGULACIÓN	42
2.11.4.	DISEÑO DE REACTORES Y OPERACIÓN	46
2.11.5.	APLICACIONES DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	48
2.11.6.	VENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	50

2.11.7.	DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	51
2.12.	PRINCIPIOS BÁSICOS DE ELECTROFLOTACIÓN	51
2.12.1.	SEDIMENTACIÓN O FLOTACIÓN DE UNA PARTÍCULA EN EL AGUA	51
2.12.2.	ELECTROFLOTACIÓN	53
2.12.3.	REACCIONES ELECTRÓDICAS PARA LA FORMACIÓN DE BURBUJAS	54
CAPITULO III.....		56
3.	METODOLOGÍA.....	56
3.1.	TOMA DE MUESTRA	56
3.2.	MUESTRA	56
3.3.	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA MUESTRA.....	57
3.4.	REACTIVOS, MATERIALES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS	58
3.4.1.	REACTIVOS E INSUMOS	58
3.4.2.	MATERIALES	58
3.4.3.	EQUIPOS E INSTRUMENTOS	58
3.5.	PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	59
3.6.	SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	60
3.7.	ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	61
3.8.	OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN:	62
3.9.	PARÁMETROS Y VARIABLES DE OPERACIÓN	63
3.10.	DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	64
3.10.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES	64
3.10.2.	DISEÑO DE EXPERIMENTAL FINAL	65
3.11.	GRÁFICOS DE SUPERFICIES PARA LA DBO ₅ , DQO Y TSS.....	67
3.12.	CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO). COMPORTAMIENTO DE LA REMOCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).	67
CAPITULO IV.....		68
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE LIXIVIADOS	68
4.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES PARA LOS LIXIVIADOS ANTIGUO Y NUEVO.	70
4.2.1.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅) PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO	70
4.2.2.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS) PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO.	73
4.2.3.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO.	76
4.2.4.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅) PARA EL LIXIVIADO NUEVO	79
4.2.5.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS) PARA EL LIXIVIADO NUEVO.	81

4.2.6.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA EL LIXIVIADO NUEVO.	83
4.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL FINAL PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO.	85
4.3.1.	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	86
4.3.2.	SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).	89
4.3.3.	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	92
4.4.	CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅) Y LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).....	95
4.4.1.	CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	95
4.4.2.	CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).	97
4.5.	COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN DE LOS TSS EN FUNCIÓN AL TIEMPO.....	99
4.6.	COMPORTAMIENTO DEL TIEMPO, DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS Y DENSIDAD DE CORRIENTE.....	101
4.7.	RESUMEN EXPERIMENTAL	103
	CONCLUSIONES	106
	RECOMENDACIONES	107
	BIBLIOGRAFÍA	108
	APÉNDICE.....	112
	APÉNDICE A.	112
A.1.	GENERALIDADES DE PUNTOS DE MUESTREO, CARACTERIZACIÓN Y ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN.	112
A.1.1.	PUNTOS DE MUESTREO DEL LIXIVIADO NUEVO Y ANTIGUO.	112
A.1.2.	IMÁGENES DEL LIXIVIADO ANTES, DURANTE Y DESPUES DEL TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN.	115
A.2.	FOTOS DEL ARMADO DE LA CUBA, TOMA DE MUESTRAS, OPERACIÓN, ANÁLISIS DE DBO ₅ , DQO Y TSS.	117
	APÉNDICE B.	120
B.1	CONCENTRACIÓN Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO DE LA DBO ₅ , DQO Y TSS. DISEÑO PRELIMINAR.	120
B.2.	CONCENTRACIÓN Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN PARA EL LIXIVIADO NUEVO DE LA DBO ₅ , DQO Y TSS. DISEÑO PRELIMINAR.	121
B.3.	PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO PARA EL DISEÑO PRELIMINAR	122
B.4.	PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO NUEVO PARA EL DISEÑO PRELIMINAR	122
B.5.	PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL FINAL	123
B.6.	CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN PARA LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	124

B.7. CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN PARA LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	125
B.8. CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).	125
B.9. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO PARA LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DBO ₅ Y DQO.	126
B.10. DETERMINACIÓN CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).	126
B.11. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN PARA LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA UNA REACCIÓN DE PRIMER ORDEN Y ORDEN CERO.	131
B.12. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO DEL DISEÑO PRELIMINAR	139
B.13. DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LA REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅), DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).	140
ANEXOS	145
ANEXO A. TOMA DE MUESTRAS	145
ANEXO B. CARACTERIZACIÓN FÍSICA-QUÍMICA DE LA MUESTRA.	146
B.1. REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅).	146
B.3. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	150
B.4. DETERMINACIÓN DEL PH.	151
B.5. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD.	152
B.6. DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD.	154
B.7. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA.	156
ANEXO C. NORMATIVAS.....	157
C.1. NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL	157
C.2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS Y DE SEGURIDAD	159
C.3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)	160
ANEXO D.....	161
D.1. RESUMEN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN ENCONTRADOS EN LA LITERATURA.	161
D.2 RESUMEN PARA TIEMPOS DE REMOCIÓN DE DQO, DBO ₅ Y TSS CON DIFERENTES CONTAMINANTES.	162
ANEXO E	165
E.1. CONSTANCIA DE ANÁLISIS	165

RESUMEN

En este estudio se evaluó la electrocoagulación como tratamiento para los lixiviados, producto de la percolación y la descomposición natural de los residuos sólidos del relleno sanitario de Jaquira, ubicado en la comunidad campesina de Jaquira, distrito de Santiago, provincia del Cusco.

Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor a escala laboratorio con configuración monopolar, con electrodos de aluminio (ánodo) y acero inoxidable (cátodo), con operación en modo discontinuo (batch).

Se realizaron ensayos preliminares con volumen de muestra de 2 litros, área de electrodos sumergida de 120 cm^2 y tiempo de residencia de 120 minutos para los lixiviados antiguo y nuevo, se evaluó el tiempo y el porcentaje de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (TSS) y demanda química de oxígeno (DQO).

Para un tiempo de 30 minutos se lograron las mejores remociones de DBO₅ y TSS, y en caso de la DQO se observó que la remoción continúa en función al tiempo, por esta razón necesita más tiempo a los 120 minutos para tener mejores remociones. Para estos tiempos el lixiviado antiguo alcanzó una remoción de DBO₅ mayor a 70%, remoción de TSS mayor a 45% y remoción de DQO mayor a 20%, y en el caso del lixiviado nuevo se alcanzó una remoción mayor a 50% de DBO₅, remoción mayor a 28% de TSS y remoción mayor a 8% de DQO. Se determinó que el tratamiento es mejor para el lixiviado antiguo con mayor remoción de parámetros (DBO₅, DQO y TSS) para esta tecnología con densidad de corriente mayor a 5.5 mA/cm^2 , una distancia variable de 0.5cm a 2cm.

En el diseño experimental final se evaluó la densidad de corriente y distancia entre electrodos, con tiempos de residencia de 30 minutos para la DBO₅ y TSS, en caso de la DQO para 120 minutos, el lixiviado antiguo alcanzó remociones de 69.12% de DBO₅, remoción de 70.54 % de TSS y remoción de 34.78 de DQO, con una densidad de corriente de 10 mA/cm^2 y una distancia entre electrodos de 2cm.

A las mejores condiciones del diseño experimental final se determinó la cinética de remoción de la DBO₅ y DQO, determinándose la cinética de reacción de segundo orden para ambos casos. Así mismo se evaluó el comportamiento de los TSS.

En el relleno sanitario de Jaquira, con los datos de la investigación se construyó el prototipo para el tratamiento de los lixiviados por electrocoagulación.

Palabras Claves

Electrocoagulación, Lixiviado, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (TSS).

ABSTRACT

In this study, electrocoagulation was evaluated as a treatment for leachate, the product of percolation and the natural decomposition of solid waste from the Jaquira landfill, located in the rural community of Jaquira, district of Santiago, province of Cusco.

The experiments were carried out in a laboratory-scale reactor with a monopolar configuration, with aluminum electrodes (anode) and stainless steel (cathode), with batch operation.

Preliminary tests were carried out with a sample volume of 2 liters, submerged electrode area of 120 cm² and residence time of 120 minutes for the old and new leachates, the time and the percentage of biochemical oxygen demand removal (BOD₅), total suspended solids (TSS) and chemical oxygen demand (COD).

For a time of 30 minutes the best removals of BOD₅ and TSS were achieved, and in the case of the COD it was observed that the removal continues as a function of time, for this reason it takes more time at 120 minutes to have better removals. At this time, the old leachate achieved a removal of BOD₅ greater than 70%, removal of TSS greater than 45% and removal of COD greater than 20%, and in the case of new leaching a removal greater than 50% of BOD₅ was achieved, removal greater than 28% TSS and removal greater than 8% COD. It was determined that the treatment is better for old leaching with greater parameter removal (BOD₅, COD and TSS) for this technology with current density greater than 5.5 mA / cm², a variable distance of 0.5cm to 2cm.

In the final experimental design, the current density and distance between electrodes was evaluated, with residence times of 30 minutes for BOD₅ and TSS, in case of the COD for 120 minutes, the old leachate reached 69.12% BOD₅ removals, removal 70.54% TSS and 34.78 COD removal, with a current density of 10 mA / cm² and a distance between electrodes of 2cm.

At the best conditions of the final experimental design, the removal kinetics of BOD₅ and COD were determined, determining the second order reaction kinetics for both cases. The behavior of the TSS was also evaluated.

In the Jaquira landfill, the prototype for the treatment of leachates by electrocoagulation was built with the research data.

Keywords

Electrocoagulation, Leaching, Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (TSS).

INTRODUCCIÓN

El incremento de generación diaria de los residuos sólidos urbanos genera lixiviados producto de la descomposición de los residuos; estos poseen alta carga contaminante (materia orgánica, metales pesados, coliformes, etc) por lo cual representan una gran amenaza contra los recursos hídricos.

La basura de la provincia del Cusco, viene siendo dispuesto en el relleno sanitario de Jaquira, este relleno sanitario recibe 395 toneladas de residuos sólidos por día y almacena desde el año 2002, 1 400 000 toneladas de residuos sólidos, de los distritos de Cusco, Santiago, Wanchaq, San Sebastián, San Jerónimo y Saylla, cuya población proyectada por el INEI al 2015 es de 450 095 personas. (OEFA, El OEFA Supervisa Botadero de Haquira en Cusco, 2016).

El tratamiento de lixiviados por el proceso de electrocoagulación permite una alta remoción de contaminantes en una sola operación, es una respuesta a la necesidad de buscar alternativas de tratamiento que no demanden una gran inversión y que disminuya la contaminación de los lixiviados hasta valores inferiores a los requeridos por normas nacionales e internacionales para descargas. Restrepo *et al.* (citado por Mendieta, 2013, s.n.p.).

La electrocoagulación tiene bajos costos, requiere equipos simples y de fácil operación, elimina el uso de productos químicos, genera lodos más compactos y en menor cantidad, produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química, razones por las cuales ha alcanzado importancia en el procesamiento de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica de mayores ventajas respecto a las tecnologías tradicionales. Morales y Acosta; Restrepo *et al.* (citado por Mendieta, 2013, s.n.p.).

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La generación diaria de lixiviados producto de la descomposición de la materia orgánica que parte de la basura del relleno sanitario de “Jaquira”, ubicado en la localidad de Jaquira, distrito de Santiago, provincia del Cusco, actualmente este lixiviado es recirculado a través de una bomba y se incrementa en temporadas de lluvias por el aporte directo de agua de precipitación pluvial, escorrentía superficial y posibles manantiales. Así mismo el incremento de la población y el desarrollo de la sociedad que contribuye a la gran cantidad de residuos generados diariamente.

Los lixiviados como producto de la descomposición de los residuos sólidos y mezclados con el agua de escorrentía poseen alta carga contaminante por lo cual representan una gran amenaza contra los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, áreas agrícolas y ríos (alcanzando el cauce de los ríos Huancaro, Huatanay y Vilcanota).

El relleno sanitario de Jaquira es a cielo abierto, la comunidad de Jaquira es una zona agrícola y ganadera; también constituye un problema potencial de contaminación de suelo y aire además de afectar a la salud de las personas.

Problema Nominal

General

¿El tratamiento por electrocoagulación en reactor monopolar batch de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira que compartimiento tendrá?

Específicos

¿En el proceso de electrocoagulación de lixiviados, en un reactor monopolar batch, será influyente la distancia entre electrodos, densidad de corriente y tiempo de remoción para los parámetros (demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos totales (TSS) y demanda química de oxígeno (DQO)?

¿Cuál es la eficiencia de remoción por electrocoagulación para los parámetros DBO_5 , TSS y DQO de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira?

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el tratamiento por electrocoagulación en reactor monopolar batch de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización de los lixiviados (afluente y efluente) del relleno sanitario de Jaquira.
- Determinar la influencia de la distancia entre electrodos, densidad de corriente y tiempo en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), de los sólidos suspendidos totales (TSS), y demanda química de oxígeno (DQO) de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira en el proceso de electrocoagulación en un reactor monopolar batch.
- Evaluar la eficiencia de remoción para los parámetros de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos totales (TSS) y demanda química de oxígeno (DQO) de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira en el proceso de electrocoagulación en un reactor monopolar batch.
- Determinar la cinética de degradación de los parámetros de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y demanda química de oxígeno (DQO).

1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Tecnológicos

- Aplicación de una tecnología no convencional para el tratamiento de los lixiviados de un sistema de disposición de residuos sólidos domésticos en nuestra Región.
- Posibilidad tecnológica de remover una diversidad de parámetros fisicoquímicos presentes que coadyuvarían en la mejora del tratamiento de los lixiviados.
- Ambientales
- Posibilidad de reducción de contaminantes (materia orgánica) en los lixiviados que podrían reducir las cargas ambientales a los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos circundantes con el relleno sanitario de Jaquira.
- La electrocoagulación es una técnica que no requiere de la adición de sustancias químicas para lograr el tratamiento, convirtiéndose en una técnica amigable con el ambiente.

Socioeconómicos

- Ayuda a la comunidad de Jaquira y a la ciudad del Cusco que tiene muchos conflictos sociales generados por temas de disposición de los residuos sólidos que generan.
- La UNSAAC y la Escuela Profesional de Ingeniería Química generarían un aporte a la sociedad a través de la proyección social que brinda la Municipalidad del Cusco y su empresa de gestión de los residuos sólidos (RR.SS.).

1.4. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Experimental: Analiza el efecto producido por la acción o manipulación de una o más variables independientes sobre una o varias dependientes.

1.5. ANTECEDENTES:

(Arizaca y Huaman, 2013) En este presente trabajo de investigación removieron la materia orgánica de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira, al que previamente se le realizó la caracterización de los parámetros fisicoquímicos. Se utilizó una columna de adsorción de 3 cm de diámetro y una altura total de 17 cm, a la cual se empaco 33.76 g. de carbón activado hasta una altura de 9 cm que constituye el lecho fijo, con un flujo descendente de 1 ml/min de caudal aproximadamente. Los procesos de adsorción del lixiviado se realizaron a pH 8 que era la condición normal del lixiviado y utilizando ácido sulfúrico se le baja a pH 5, las eficiencias de remoción de la DQO del efluente se redujeron hasta 69% cuando el lixiviado es a pH 8 y de 84% cuando el pH es 5. Considerando los resultados anteriores, se realizó un proceso combinado de coagulación-floculación (polifloc Pacso 100) y posterior adsorción al lixiviado a pH 5, lográndose la remoción de la DQO hasta el 99%.

(Chevarria y Loayza, 2011) En este trabajo de investigación evaluaron el proceso de coagulación-floculación en los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira, Donde se caracterizaron los lixiviados cuantificando los parámetros fisicoquímicos. Se evaluó el proceso de coagulación-floculación con tres diferentes coagulantes: sulfato de aluminio, cloruro férrico y poliflocPacso 100. El tratamiento de los lixiviados mediante dicho proceso permitió remover la materia orgánica expresada como DQO hasta un 87.83% con el coagulante poliflocPacso 100 a las condiciones de pH 5, dosis de 1000 mg/L, Velocidad de agitación de 100 rpm y 70 segundos de tiempo de coagulación, siendo el más eficaz frente al sulfato de aluminio y cloruro férrico.

(Gilpavas, 2008) En este estudio se evaluó la electrocoagulación como tratamiento para aguas residuales del proceso de curtición de una curtiembre y de aguas residuales provenientes del proceso de teñido en un floricultivo. Los experimentos se llevaron a cabo en un reactor a escala laboratorio con configuración monopolar con electrodos de hierro y aluminio que operaba de modo discontinuo (batch).

Para el caso de las aguas residuales de curtición, las condiciones óptimas obtenidas a partir del análisis estadístico fueron 13 voltios, Agitación 382 rpm, electrodos de Al, concentración inicial de la solución 2364,57 ppm y distancia entre electrodos de 5 mm. Se trató un volumen de 500 ml de solución durante un tiempo de reacción de 60 minutos. Para la muestra natural se presentó una remoción de Cr^{+3} del 71.98%, remoción de DQO del 50.67%, remoción de COT del 19% y un aumento en la biodegradabilidad del agua del 72.88%.

Para las aguas del floricultivo, los ensayos fueron llevados a cabo con un volumen de muestra de 700 ml, agitación de 370 rpm, una separación y área de los electrodos de 5 mm y 62.8cm^2 respectivamente. Los efectos de la conductividad, concentración inicial de la muestra y la corriente, fueron evaluados sobre el porcentaje de remoción de color, DQO, DBO_5 y COT, para un tiempo de residencia de 10 minutos. Debido a que, bajo las condiciones evaluadas, los tratamientos con electrodos de hierro presentaron mayores porcentajes de remoción de color (100%) en comparación con los electrodos de aluminio (49.7%), se realizaron los ensayos con las condiciones óptimas de operación utilizando electrodos de hierro, reportando un porcentaje de remoción de DQO de 59.31% y una decoloración del 97.23% para un tiempo de 8 minutos. Adicionalmente, el porcentaje de remoción de COT fue de un 41.81%, para el tiempo de residencia empleado en los ensayos.

(Hadj et al., 2010) La eliminación de contaminantes orgánicos de lixiviado se estudió experimentalmente usando la electrocoagulación de corriente continua con electrodos de aluminio. Los efectos de los parámetros operativos tales como la densidad de corriente, pH inicial y tiempo de electrólisis se estudiaron adicionalmente con el fin de optimizar las condiciones para el tratamiento de lixiviados. Dos conexiones de electrodos diferentes (monopolar y bipolar) fueron examinadas para la elección de la mejor alternativa con el fin de intensificar el rendimiento del proceso. Se observó que una alta capacidad de eliminación era mejor para la conexión monopolar que para la conexión bipolar. La subsecuencia de pruebas electrocoagulación realizados con electrodos de aluminio mostró que las condiciones de funcionamiento óptimas son un pH inicial de 6; una densidad de corriente 15 A cm^{-2} y el

tiempo de electrocoagulación de 90 min. El tratamiento reduce la demanda química de oxígeno a 94%. La eficiencia de eliminación de color alcanzó el 96%.

(Hariraj y Brijesh, 2016) Un renovado interés en la electrocoagulación ha sido impulsado por la búsqueda de procesos fiables y rentables, en tratamientos de aguas. Este documento tiene un enfoque técnico para deshacerse de metales pesados y sólidos suspendidos totales (SST) de agua sintética utilizando un electrodo de aluminio. El efecto de los parámetros de funcionamiento, tales como densidad de corriente, la distancia entre electrodos, tiempo de funcionamiento, y el pH, evaluaron para la máxima eficiencia. Este estudio corrobora la correlación entre la densidad de corriente y la eficiencia de eliminación. El resultado indica que un máximo rendimiento de eliminación de TSS de 76,6% se produjo a una densidad de corriente de 5,3 mA/cm² durante un tiempo de contacto de 30 min. En el caso de eliminación de metales pesados, 40 min de tiempo de proceso donde redujo las tasas de 99%, 59,2% y 82,1%, para el Cu, Cr y Zn, respectivamente. Por otra parte, estudio cinético también ha demostrado que la eliminación de contaminantes sigue primero y modelo de segundo orden con densidad de corriente y el tiempo de electrocoagulación es dependiente.

(Poma y Quispe, 2016, p.107) el objetivo de este trabajo fue remover los contaminantes de las aguas residuales urbanas del colector de aguas de la Universidad Nacional del Centro del Perú variando la densidad de corriente y el tiempo de residencia por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio y la placa metálicas utilizada en el proyecto fue aluminio.

La densidad de corriente óptima del proceso es 32,72 A/m², con un área total de contacto de 0,08253 m² y 2,7 A. El tiempo de residencia óptimo para el proceso de electrocoagulación de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú es 20 minutos, con una distancia entre electrodos de 1 cm. Los porcentajes de remoción de los indicadores de los contaminantes de las aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación son 85,9% para DBO₅, 75,3% para DQO, 93,8 % para aceites y grasas, 89,5% para conductividad eléctrica, 79,6% para turbiedad, 95,3% para sólidos totales, 91,0% para sólidos suspendidos, 91,3% para sólidos disueltos, 70,3% para dureza total, 91,3% para dureza cálcica, 91,9% para cloruros, 100,0% para coliformes totales y 98,9% para escherichia coli.

(Reyes y Mercado, 2003) Indican que la electrocoagulación se realizó en sistema batch y continuo con una distancia entre electrodos de 4 cm, utilizando 9 electrodos en total, de los cuales 5 son cátodos y 4 son ánodos. Esta operación se realizó para tres valores de voltaje y tiempo de reacción con electrodos de dos materiales diferentes (Al y Cu). Las mejores condiciones de operación (3.0 Voltios, 15 minutos y electrodos de aluminio) y el valor promedio de corriente de 11.5 Amperios. Alcanzándose el mayor porcentaje de remoción de DQO con un valor de 30.77%.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo tiene el objetivo de realizar una revisión bibliográfica sobre los tópicos relacionados con los residuos sólidos, el entorno del relleno sanitario de Jaquira y los parámetros fisicoquímicos más relevantes sobre los lixiviados. Posteriormente se hace una introducción a la electroquímica y electrocoagulación los cuales son temas centrales de este estudio.

2.1. RESIDUOS SÓLIDOS

Residuo sólido es cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien o servicio, del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprenderse, para ser manejados priorizando la valorización de los residuos y en último caso, su disposición final.

Los residuos sólidos incluyen todo residuo o desecho en fase sólida o semisólida. También se considera residuos aquellos que siendo líquido o gas se encuentran contenidos en recipientes o depósitos que van a ser desechados, así como los líquidos o gases, que por sus características fisicoquímicas no puedan ser ingresados en los sistemas de tratamiento de emisiones y efluentes y por ello no pueden ser vertidos al ambiente. En estos casos los gases o líquidos deben ser acondicionados de forma segura para su adecuada disposición final (MINAM, D. L. N° 1278, 2016, P. 607487)

Los residuos son los restos de las actividades humanas considerados como inútiles y sin valor económico para quien lo genera, o sea para el dueño inicial del residuo, entonces la actitud instintiva o primaria es tratar de deshacerse de este material y alejarlo lo más posible de su vista (Brion, 2004, p. 234).

2.2. DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

Procesos u operaciones para tratar y disponer en un lugar los residuos como último proceso de su manejo en forma permanente, sanitaria y ambientalmente segura. (MINAM, D.L. N° 1278, 2016, p. 607486). La disposición final de residuos sólidos municipales se realiza en rellenos sanitarios, los mismos que son implementados por las municipalidades (MINAM, D.S. N° 014, 2017, p. 24).

Técnica para la disposición final de los residuos sólidos en el terreno, sin causar perjuicio para el ambiente y sin ocasionar molestias o peligros para la salud, el bienestar y seguridad pública.

Este método, requiere la utilización de principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo.

Los residuos depositados son cubiertos con una capa de suelo, a modo de cobertura intermedia, con la frecuencia adecuada según el caudal de ingreso de residuos, con el fin de evitar la proliferación de olores y el desarrollo de cualquier tipo de vectores (Brion, 2004, p. 237).

La disposición final de residuos del ámbito de gestión municipal se realiza mediante el método de relleno sanitario (OEFA, 2013, p. 15).

2.2.1. RELLENO SANITARIO

Instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos en los residuos municipales a superficie o bajo tierra, basados en los principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental. (MINAM, D.L. N° 1278, 2016, p. 607487).

El diseño y ejecución de un relleno sanitario responde a un proyecto de ingeniería y la aprobación del correspondiente estudio de impacto ambiental por parte de la entidad competente, y su operación debe realizarse en estricto cumplimiento del diseño y de las obligaciones ambientales establecidas en el instrumento de gestión aprobado y la normativa vigente (OEFA, 2013, p. 17).

El Relleno Sanitario es una técnica de eliminación final de desechos sólidos en el suelo, que no causa molestia ni peligro para la salud y seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de terminado el mismo. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más pequeña posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que pueden causar los líquidos y gases producidos en el Relleno, por efecto de la descomposición de la materia orgánica (Dávila, 2013, p. 4).

2.3. RELLENO SANITARIO DE JAQUIRA

Es una zona rural donde se realiza la disposición final de los residuos sólidos urbanos de la ciudad del Cusco, provenientes tanto del distrito del Cusco, como de los distritos de Wanchaq, Santiago, San Sebastián, San Jerónimo, Saylla, Ccorcca; y de algunas empresas privadas, ubicado en la comunidad campesina de Jaquira del distrito de Santiago, cuyo relleno sanitario cuenta con una extensión de 5 hectáreas, el relleno sanitario se encuentra a solo 20 minutos del centro de la Ciudad Imperial (Diario Correo, 2015, s.n.p).

La basura de la provincia del Cusco, viene siendo dispuesto en el relleno sanitario de Jaquira (figura 2.1), el mismo que está ubicado a 7.5 Km del tramo carretero de Cusco – Ccorcca, al Sur Oeste de la ciudad del Cusco, comprendida en la Comunidad de Jaquira Grande en el Distrito de Santiago, Provincia y Departamento del Cusco (figura 2.2) (Diario el Sol, 2017).

El relleno sanitario de Jaquira recibe 395 toneladas de residuos sólidos por día y almacena desde el año 2002, 1 400 000 toneladas de residuos (OEFA, El OEFA Supervisa Botadero de Haquira en Cusco, 2016) y los lixiviados llegan a una poza y de ahí son recirculados a la misma disposición inicial de la basura (figura 2.3).



Figura 2.1 Disposición final de los residuos sólidos (imagen adjuntada).



Figura 2.2. Ubicación del relleno sanitario de Jaquira (Mapa satelital).

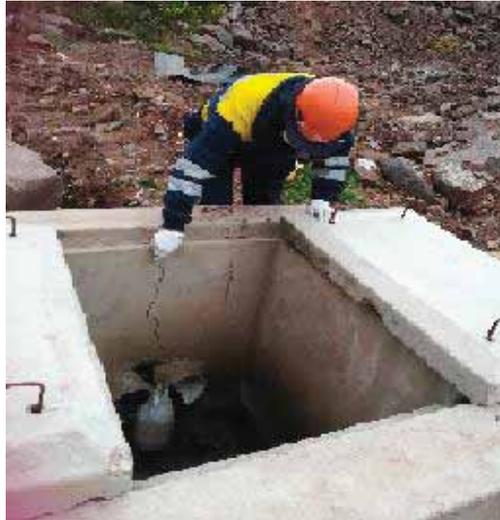


Figura 2.3 Pozo de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira (imagen adjuntada).

2.4. LIXIVIADOS

Desde el momento en que se acumula en casa la basura sin ser clasificada, se mezclan los diferentes residuos emanados de la misma (sobrantes de detergentes, materia orgánica en descomposición, productos de la oxidación de metales humedecidos, entre otros). Uno de los subproductos generados de dicha mezcla de basura se convierte en un fluido que se denomina lixiviado (Martinez *et al.*, 2014, p. 37).

La descomposición o putrefacción natural de la basura produce un líquido maloliente de color negro, conocido como lixiviado o percolado, parecido a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado. Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de basura aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los residuos sólidos municipales (Jaramillo, 2002, p. 67).

El lixiviado consiste de varios compuestos orgánicos e inorgánicos diversos que se pueden encontrar ya sean disueltos o suspendidos. Sin importar la naturaleza de los compuestos, estos plantean un problema potencial de contaminación para la tierra local y las aguas superficiales. (Monroe, 2010, p. 1).

El líquido lixiviado se origina por las precipitaciones pluviales y en menor medida por la humedad propia de los residuos. Dentro del cuerpo del relleno sanitario, el líquido se mueve por acción de la gravedad, descendiendo hacia el fondo del recinto impermeabilizado (relleno sanitario), en el cual y por las características constructivas (bermas de separación de sectores, pendientes de fondo) tiende a acumularse en los sumideros de cada sector. Desde este lugar,

es extraído por bombeo y se envía a tratamiento en una planta al efecto dentro del mismo predio del relleno sanitario (Brion, 2004, p. 260).

Principios de la producción de la acción disolvente del agua (lixiviados).

La acción disolvente del agua es un líquido altamente contaminado cuando el agua se filtra a través de los desperdicios sólidos. Los contaminantes en la basura pasan el agua a través de la acción disolvente fisicoquímica y descomposición biológica. La descomposición biológica es el resultado de la degradación de la basura en una acción disolvente de agua o en una materia sólida o gaseosa.

La descomposición y proceso disolvente están interrelacionados y se hallan afectados primordialmente por la disponibilidad de humedad, temperatura, presencia de oxígeno, longevidad, composición, dimensiones de las partículas y humedad de desperdicios. La mayor parte de los contaminantes, minerales y orgánicos, dejados en libertad en la basura, son disueltos durante el periodo de la descomposición biológica (López *et al.*, 1980, p. 96). El mismo que describe los siguientes procesos para la degradación de los lixiviados de la basurá:

A. HIDRÓLISIS

Los compuestos orgánicos complejos son transformados en material disuelto más simple, por medio de enzimas producidas por bacterias fermentativas (Castells, 2012, p. 758).

- Formación del lixiviado.
- Transición de la condición aerobia a anaerobia.
- Receptor primario de electrones pasa de oxígeno para nitratos y sulfatos.
- El potencial redox decrece, en el sentido de establecer condiciones reductoras.

Aparecen productos metabólicos intermediarios, ácidos orgánicos volátiles en el lixiviado. Pholand y Harper (citado por Ávila y Silva, 2010, p. 54).

B. ACIDOGÉNESIS

Los productos solubles son convertidos en ácidos grasos volátiles, CO₂, H₂, H₂S, etc., por la acción de las bacterias fermentativas acidogénicas. Por la cual los monómeros obtenidos en la fase anterior, por la acción de determinadas bacterias, se convierten en alcoholes, ácidos orgánicos, gas carbónico e hidrógeno. Reyes (citado por Pesantez y Ruiz, 2017, p. 12); (Castells, 2012, p. 758).

Los ácidos orgánicos volátiles (AOV), se toman predominantes con la continua hidrólisis y fermentación de residuos orgánicos. Disminución de pH, causando movilización y posible formación de complejos de metales pesados. Liberación y asimilación de nutrientes importantes como nitrógeno y fósforo. Pholand y Harper (citado por Ávila & Silva, 2010, p. 54).

C. ACETOGÉNESIS

Los productos generados en la etapa anterior son transformados en sustrato para las bacterias metanogénicas. La realizan las bacterias anaerobias que aseguran la transformación de los compuestos de la fase anterior en ácido acético, gas carbónico, hidrógeno y formiatos (Castells, 2012, p. 758).

Aquí actúan dos tipos diferentes de microorganismos que producen acetato:

- Bacterias homoacetogénicas.
- Bacterias acetogénicas.

Durante esta fase se produce bióxido de carbono e hidrogeno y el nitrógeno disminuye considerablemente. Las bacterias homoacetogénicas se caracterizan por la formación de azúcares que a partir de la fermentación de estos compuestos como el formiato y la mezcla gaseosa de H_2CO_2 . Las bacterias acetogénicas metabolizan los productos terminales de la etapa acidogénica, es decir alcoholes, ácidos grasos volátiles y algunos componentes aromáticos que son convertidos en acetato, CO_2 e hidrogeno. De esta forma, el metabolismo acetogenico se caracteriza por la dependencia a la eliminación de hidrogeno por lo que es necesario una asociación con las bacterias consumidoras de hidrogeno, función que desarrollan las bacterias metanogénicas o sulforeductoras en presencia de sulfato (Coren, 2008, p. 33).

D. METANOGÉNESIS

Finalmente se produce metano a partir de acetato (bacterias metanogénicas acetoclásticas) y de H_2S y CO_2 (bacterias metanogénicas hidrogenotróficas). Fermentación metanica propiamente dicha, esta fase se realiza gracias a la acción de bacterias de lento crecimiento (metagénicas) que degradan los compuestos antes sintetizados y los transforman en metano y gas carbónico. Reyes (Citado por Pesantez y Ruiz, 2017, p. 12); (Castells, 2012, p. 758).

Consumo de los productos intermedios para la formación de metano y dióxido de carbono (biogás). Estabilización del pH, en un valor controlado por el tampón bicarbonato y la concentración de ácidos orgánicos volátiles (AOV). El potencial redox se encuentra en un valor mínimo. Consumo continuo de nutrientes. Formación de complejos de metales pesados y la precipitación de los mismos. La concentración de la fracción orgánica decrece debido a la conversión de biogás. Pholand y Harper (citado por Ávila y Silva, 2010, p. 54).

2.5. CLASIFICACIÓN DE LOS LIXIVIADOS

Como consecuencia los lixiviados de las áreas de los rellenos sanitarios que han sido recientemente rellenadas producen un lixiviado altamente contaminante, denominado lixiviado nuevo. A partir de ese momento, las concentraciones de las sustancias en el lixiviado de una cochada de basura en el relleno sanitario disminuyen continuamente en el tiempo, esto ocurre como regla general, más, sin embargo, en algunos casos como metales que presentan reacciones de óxido-reducción, puede ocurrir que la concentración al inicio del proceso de lixiviación no sea la mayor. Sin embargo, teniendo en cuenta que un relleno sanitario se opera por décadas, siempre va a haber una parte del relleno que aporta lixiviado nuevo, la que se está rellenando en ese momento, mientras que otras partes del relleno tienen lixiviado maduro, las que tienen unos años, y otras lixiviado antiguo, las que tienen más de cinco años (tabla 2.1) (Giraldo, 1997, p. 45).

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a la edad del relleno sanitario en lixiviados jóvenes, intermedios y estabilizados.

2.5.1. LIXIVIADOS NUEVOS

Los lixiviados jóvenes presentan una carga orgánica alta ($DQO > 20 \text{ g O}_2/\text{l}$), concentración de ácido carboxílico aproximada del 80 % de la carga orgánica, materia orgánica rápidamente biodegradable ($DBO/DQO = 0.3$), una relación de $COT/DQO > 0.3$, pH alrededor de 6.5, concentración de metales de 2 g/l, preponderancia de ácidos grasos volátiles y compuestos de alto peso molecular. Ozzane (citado por Chevarria y Loayza, 2011, p. 10); (Ávila y Silva, 2010, p. 44).

2.5.2. LIXIVIADOS INTERMEDIOS

Los lixiviados intermedios muestran una carga entre 3 a 15 gO₂/l, concentración de ácidos carboxílicos que representan del 20 al 30 % de la carga orgánica, la relación DBO/DQO = 0.2, un pH casi neutro, compuesto de peso molecular superior 500 g/mol. Ozzane (citado por Chevarria y Loayza, 2011, p. 10); (Ávila y Silva, 2010, p. 44).

2.5.3. LIXIVIADOS ESTABILIZADOS O ANTIGUOS

Los lixiviados estabilizados tiene una carga < 20 g O₂/l, ausencia de ácidos carboxílicos, baja biodegradabilidad (DBO/DQO = 0.1), COT/DQO > 0.4, indicando la presencia de compuestos difícilmente oxidables, presencia de compuestos de elevado peso molecular superior a 5000 g/mol, pH superior a 8 y concentración de metales menor de 50 mg/l. Ozzane (citado por Chevarria y Loayza, 2011, p. 10); (Ávila y Silva, 2010, p. 44).

Tabla 2.1: Principales características de los lixiviados jóvenes y viejos en un relleno sanitario. (Giraldo, 1997, p. 47).

CARACTERÍSTICAS	LIXIVIADO NUEVO	LIXIVIADO ANTIGUO
DBO ₅	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoniaco	Muy alto	Alto
Fosforo	Usualmente Deficiente	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy altos	Bajos
Sales disueltas	Muy altos	Bajas (relativamente)
Agentes incrustantes (Fe,	Muy altos	Bajo
Metales pesados	Muy altos	Bajos

2.6. EFECTOS DAÑINOS DE LOS LIXIVIADOS EN LA SALUD

Estos lixiviados pueden migrar hacia las aguas subterráneas o superficiales, lo que está en función de las condiciones topográficas y geo hidrológicas del sitio, generando de esta forma la degradación de la calidad del suelo y del agua, poniendo en riesgo la salud de la población cuando el agua subterránea es utilizada como fuente de abastecimiento de la localidad. El riesgo que puede tener el ser humano, radica en la ingestión de la supuesta agua potable, del contacto directo que tenga con lagos y ríos, y, finalmente, por la bioacumulación de algunas sustancias como los metales pesados (plomo, cadmio, etc.) en peces o cualquier otro

organismo de consumo humano que esté en contacto con agua mezclada con lixiviados (SEDESOL, 1996, p. 37).

Efectos indirectos

Cuando los residuos sólidos son depositados en suelos permeables, donde el nivel freático se localiza a poca profundidad, los cuerpos de agua subterráneos se contaminan fácilmente por los lixiviados. Si estos acuíferos son utilizados como fuente de agua potable, pueden ocasionar una serie de trastornos y enfermedades en las personas que la ingieran (SEDESOL, 1996, p. 39).

Efectos de compuestos orgánicos volátiles en lixiviados producidos por un relleno sanitario húmedo. Pueden causar daños principalmente en el sistema nervioso y el gastrointestinal, de índole cancerígena y teratogénica.

- Efecto negativo de metales existentes en los lixiviados liberados por la descomposición de los residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario húmedo. La exposición prolongada a metales pesados causa daños hepáticos, renales y cardiovasculares. Así como enfermedades neurológicas.
- Efectos de alcoholes lixiviados durante la descomposición de residuos sólidos orgánicos en un relleno sanitario húmedo. Causa malformación congénita, mutagénicas y cancerígenas.
- Efectos de compuestos orgánicos sintéticos en líquidos lixiviados formados en rellenos sanitarios húmedos. Daños en sistemas respiratorios, reproductor y nervioso (Huaman y Jordan, 2013, p. 21).

2.7. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTOS PARA LOS LIXIVIADOS

Las alternativas de tratamiento de lixiviados se pueden categorizar de acuerdo a varias características como por ejemplo de acuerdo a los niveles de tratamiento que se logren con cada una de ellas, o por el tipo de contaminación que puedan remover (tabla 2.2). Vale la pena recordar que los lixiviados contienen todos los mayores grupos de contaminación conocidos como son la contaminación por patógenos, por materia orgánica, la contaminación por nutrientes, y por sustancias tóxicas (Giraldo, 1997, p. 47).

Tabla 2.2: Comparación de tecnologías para el tratamiento de lixiviados. (Giraldo, 1997, p. 52)

Ítem problema con	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membrana	Sistemas Naturales	Tratamiento en PTAR
Necesidad de insumos químicos	+++ (1)	+++ (1)	++ (2)	-	+++ (1)	-	-
Necesidad de insumos operacionales (membranas)	++	+	+	+	+++	-	-
Necesidad de suministro de partes	++	-	+	+	+++	-	+
Suministro de energía eléctrica	+++	+ (4)	- (5)	+	+++	+ (3)	+
Complejidad operacional	+++	+	++	+	+++	-	-

(1) Requiere un extenso pretratamiento.

(2) Puede requerir pretratamiento.

(3) Puede requerir si hay necesidad de bombear el lixiviado. Usualmente no requiere.

(4) Puede requerir en el sistema de pretratamiento.

(5) Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas.

(+) Una cruz significa como afecta negativamente la característica al proceso en cuestión.

Entre más cruces más negativamente lo afecta.

(-) Un guion significa no afecta negativamente.

2.7.1. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR PROCESOS BIOLÓGICOS

Existen investigaciones donde se realizan comparaciones entre el tratamiento de lixiviados vía aerobia, con un sistema de biodiscos y reactor de lodos activados, y vía anaerobia, utilizando reactores UASB (figura 2.4), los cuales confirman que existe mejor funcionamiento con el sistema de biodiscos, ya que el sistema presenta gran estabilidad frente a variaciones en la calidad del lixiviado, ausencia de olores desagradables, además se obtienen buenas características de sedimentabilidad de los lodos generados. (Martínez et al., 2014, p. 39).

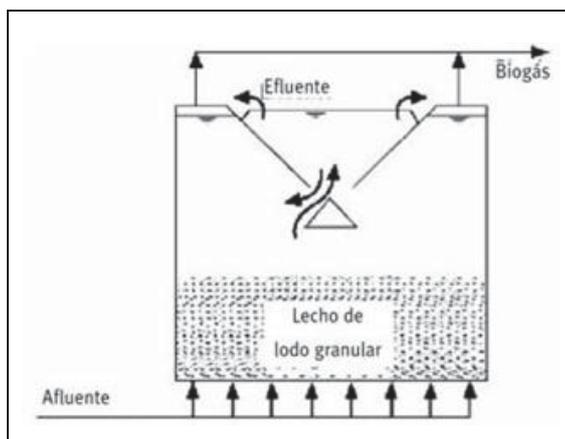


Figura 2.4. Esquema básico del reactor UASB. (Martínez et al., 2014, p. 39)

2.7.2. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR ÓSMOSIS INVERSA

En el proceso de la osmosis inversa, el agua es forzada a cruzar una membrana, dejando las impurezas detrás. La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña, que prácticamente todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y los virus son separados del agua. Es uno de los procedimientos más nuevos para los tratamientos de aguas ya sea para uso en calderas de alta presión, productos farmacéuticos y cosméticas, consumo humano, potabilización del agua del mar, diálisis etc. Su uso se está extendiendo rápidamente, debido a su gran versatilidad y a los cada vez más reducidos costos de los equipos y al valor del agua purificada o permeada por unidad de volumen; se considera a la ósmosis inversa como un hiperfiltro, que permite eliminar en un 80 a 98% de sales disueltas u otros contaminantes como son las bacterias, microbios presentes en el agua (Martínez et al., 2014, p. 42); (Morales, 2007, p. 21).

2.7.3. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA (POA)

Las tecnologías o procesos de oxidación avanzada han tenido gran relevancia en el tratamiento de un centenar de contaminantes presentes en el agua, ya que poseen cierta peculiaridad en la forma en que ocurre la remoción de contaminantes.

Los POA son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo ($\text{HO}\bullet$) que posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, suministrando un

incremento en la velocidad de reacción en el tratamiento de agua contaminada (Martinez *et al.*, 2014, p. 42).

2.7.4. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR OZONIZACIÓN

El ozono (O_3) y el oxígeno son oxidantes muy poderosos, los cuales pueden oxidar muchos contaminantes presentes en corrientes de agua residuales y biosólidos. El O_3 es más activo que el oxígeno, pero debe ser generado en el momento de utilizarse ya que es un material inestable. Desde 1980, el O_3 ha sido usado para el tratamiento de agua residual urbana, industrial y para tratar lodos de proceso a gran escala. También se ha aplicado en la desinfección de agua para beber, generalmente para remover cianuros y fenoles, aunque también ha permitido un notable mejoramiento del gusto, color, características de filtración y biodegradabilidad de la misma. La purificación y desinfección oxidativa con ozono como tratamiento terciario de agua residual le confieren muchas ventajas tales como la reducción de DBO_5 y DQO, disminución de olor, color y turbiedad, destrucción de organismos patógenos, el efluente presenta alta concentración de oxígeno disuelto, entre otras. Algunas desventajas que presenta esta tecnología es que los costos de generación de O_3 son relativamente altos, por lo que requieren de altas eficiencias de utilización de la molécula; además de que existen problemas de transferencia de masa asociados a gases, al no poseer solubilidad infinita en agua de la molécula de O_3 (Martinez *et al.*, 2014, p. 43).

2.7.5. PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON

Los procesos Fenton y foto-Fenton. El primero en ausencia de luz y el segundo se lleva a cabo en presencia de iluminación natural o artificial.

Principio del proceso Fenton: el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) es un reactivo químico seguro, abundante y de sencillo manejo, ampliamente usado para la prevención de la contaminación.

Sin embargo, por sí mismo no posee significativas propiedades oxidantes, por lo que hace necesaria su combinación con otras sustancias o catalizadores para incrementar su eficiencia.

El proceso Fenton es la tecnología que se desarrolla a partir del empleo de H_2O_2 en combinación con una sal de hierro (II). En 1881, Henry J. H. Fenton publicó una breve descripción de las fuertes propiedades de oxidación de una mezcla de H_2O_2 y sales de hierro. Esta mezcla llegó a ser conocida como reactivo Fenton, en honor a su descubridor (Martinez *et al.*, 2014, p. 44).

En las tecnologías de tratamiento de aguas residuales se han desarrollado procesos amigables con el medio ambiente que están enmarcados en los principios de la química verde con los que se busca reducir los tiempos y costos del tratamiento con una alta eficiencia. En esta búsqueda se destaca el proceso Fenton, el cual se basa en una reacción propuesta originalmente por Henry J. H. En 1899, esta reacción fue planteada para la oxidación de ácido tartárico y ahora se conoce como "proceso Fenton." El proceso Fenton se basa en la combinación de peróxido de hidrogeno y Fe^{2+} (o Fe^{3+}) que actúa como catalizador, para la formación de radicales $HO\bullet$. Esta reacción puede tener variaciones, como el uso de radiación UV, proceso que es llamado foto-Fenton que en comparación con el método Fenton convencional o la fotólisis UV puede tener una mayor eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos, este incremento en la velocidad de reacción es atribuido principalmente a la foto-reducción de los iones Fe. González-Bahamón et al (Garcia, 2014, p. 21).

2.7.6. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS POR PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN.

La electroquímica es una tecnología que en las últimas décadas ha tenido muchas aplicaciones industriales y se ha desarrollado rápidamente ofreciendo varias alternativas que compiten ventajosamente con distintos procesos (Arango y Garcéz, 2007, p. 57).

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario (citado por Arango, 2005, p. 50); (Restrepo, Arango, y Garcéz 2006, p. 61).

El reactor tipo batch tiene importancia a nivel de laboratorio ya que permite el estudio del proceso y los parámetros a ser controlados (Arango y Garcéz, 2007, p. 58).

2.8. TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE JAQUIRA DE JAQUIRA

El tratamiento de los lixiviados se realiza mediante recirculación que consta de 3 pozas. El pozo 1 ubicado en la entrada del relleno sanitario (parte alta) sirve de distribución y estabilización. El pozo 2 de acopio y estabilización y el pozo 3 de retención que se encuentra en la parte baja; los lixiviados discurren a través de los surcos, hasta una compuerta y de ahí mediante tubos hacia la poza 2, que al estar lleno rebosa hacia el pequeño pozo 3; del pozo 2 los lixiviados son recirculados al pozo 1 y posteriormente son dispersos nuevamente en todo el relleno sanitario. El funcionamiento inadecuado de estos pozos, la generación de un volumen elevado, de lixiviados en épocas de lluvias, hace que rebose y dañen al medio ambiente de Jaquira, contaminando los suelos, aire y aguas (Huaman y Jordan, 2013, p. 21).

Actualmente se construyó un sistema de electrocoagulación donde serán tratados los lixiviados nuevos y antiguos.

2.9. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LOS LIXIVIADOS

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante. Se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos. Estas características son importantes en cuanto nos indican qué es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento (Giraldo, 1997, p. 44).

2.9.1. COLOR

Color Aparente: Es el color causado por la materia suspendida y disuelta, se determina en la muestra original, sin filtrado ni centrifugado.

Color Real: El color del agua, cuya turbidez ha sido eliminada, mediante centrifugación o filtración (Giraldo, 1995, p. 5).

2.9.2. OLOR

Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El olor más característico del agua residual séptico es

debido a la presencia de sulfuros de hidrogeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de microorganismos anaerobios. Las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos en sí mismos, o compuestos con tendencia a producir olores durante los diferentes procesos de tratamiento (tabla2.3) (Metcalf y Eddy, 1995, p. 63).

Tabla 2.3. Compuestos olorosos asociados al agua residual bruta, (Metcalf y Eddy, 1995, p. 63)

COMPUESTOS OLOROSOS	CALIDAD DEL OLOR
Aminas	A pescado
Amoníaco	Amoniacal
Diaminas	Carne descompuesta
Sulfuro de hidrogeno	Huevos podridos
Mercaptanos (p.e. metilo y etilo)	Mofeta
Mercaptanos (p.e. butilo y	Coles descompuestas
Sulfuros orgánicos	Coles podridas
Eskatol	Materia Fecal

2.9.3. COLOIDES

Es una medida del material en suspensión en el agua que, por su tamaño alrededor de los $10^{-4} - 10^{-5}$ mm, se comporta como una solución verdadera y atraviesa el papel del filtro. Los coloides pueden ser de origen orgánico (macromoléculas de origen vegetal) o inorgánico (óxido de hierro y manganeso). Los coloides se eliminan por floculación, por precipitación y por eliminación de arcillas (Barrera, 2014, p. 52).

2.9.4. SÓLIDOS TOTALES (ST)

Los sólidos estiman la cantidad de materia sólida, suspendida o disuelta, presente en el agua, entre la que se encuentra la materia flotante, coloidal y en solución.

El agua se evapora y se seca a una temperatura (103-105°C), y es la suma de sólidos suspendidos totales, de las sales disueltas y de la materia orgánica (Barrera, 2014, p. 52).

La medición de la conductividad está directamente relacionada con los sólidos disueltos, y puede ser usado como un parámetro para determinar el tamaño de la muestra (Giraldo, 1997, p. 20).

2.9.5. SÓLIDOS VOLÁTILES TOTALES (SVT)

La cantidad de materia orgánica capaz de volatilizarse por efecto de calcinación ($550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, tiempo de 15 a 20 min.), corresponden el 20 % de los ST.

2.9.6. SÓLIDOS FIJOS TOTALES (SFT)

Resultado de la calcinación, forman parte de la materia inorgánica, representa el 80 % de los ST.

2.9.7. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro y secados a una temperatura de 103°C a 105°C .

2.9.8. SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES (SSV)

Representa la materia orgánica y son los que se volatilizan en la calcinación (550°C), resultan de la diferencia en peso de los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos fijos (SSF).

2.9.9. SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS (SSF)

Representan la materia inorgánica y son los sólidos suspendidos que permanecen como residuos de la calcinación (550°C).

2.9.10. SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT)

Material soluble constituido por materia orgánica e inorgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra filtrada a través de un filtro a una temperatura de 103°C (Giraldo, 1995, p. 20) y (Barrera, 2014, p. 52).

2.9.11. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La DQO es un parámetro que se utiliza para estimar la contaminación orgánica del agua. Se mide a partir de la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene; es decir, es la estimación de la materia oxidable, en términos de oxígeno equivalente presente en el agua, independientemente de su origen orgánico o mineral. Se entiende como “degradación química” la reacción de un oxidante químico, bien dicromato potásico o permanganato potásico, que consume materia orgánica

(reacción 2.1). La determinación de la DQO no presenta interferencias por amonio, sustancias nitrogenadas, pero tiene limitaciones ya que oxida la materia orgánica sin que importe su biodegradabilidad (Barrera, 2014, p. 56).



2.9.12. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

La (DBO₅) es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua durante un periodo de cinco días; es decir, es un parámetro que expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación bioquímica (reacción 2.2.) de los compuestos orgánicos degradables existentes en el líquido residual, fijando condiciones de tiempo y temperatura (5 días y temperatura a 20°C). Se expresa en función de la demanda de oxígeno de los microorganismos participantes en la degradación de la materia orgánica presente a 20 °C en 5 días (Barrera, 2014, p. 55).



Los resultados de los ensayos de la (DBO₅) se emplean para: (1) determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requiere para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente; (2) dimensionar las instalaciones de tratamientos de aguas residuales; (3) medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento, y (4) controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos (Metcalf & Eddy, 1995, p. 80).

2.9.13. COMPONENTES FÍSICOS Y PARÁMETROS QUÍMICOS DE LOS LIXIVIADOS

Se define en las siguientes tablas 2.4 y 2.5:

Tabla 2.4. Componentes Físicos (citado por Tibanlobo, 2014, p. 8).

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
pH	Mide la concentración de iones hidrogeno en el agua, las variaciones de pH en las aguas afectan directamente al medio y los individuos donde están presentes estas aguas contaminadas
Materiales en suspensión	Las aguas residuales contienen gran cantidad de material suspendido, la determinación de este parámetro se lo hace con técnicas de filtración y centrifugación
Conductividad eléctrica	Esta característica está estrechamente ligada a la concentración de sustancias disueltas y a la naturaleza de las mismas.
Temperatura	Este parámetro influye en la solubilidad de sales y en la disociación de sales disueltas, afectando a su vez a la conductividad eléctrica y al pH.
Turbiedad	Esta característica del agua viene definida por la cantidad de material en suspensión que se encuentra en el agua. Cuanto más turbia está el agua, mayor es el material suspendido.

Tabla 2.5. Parámetros Químicos, (citado por Tibanlobo, 2014, p. 9)

COMPONENTES	DESCRIPCIÓN
Nitratos	Los nitratos constituyen la especie nitrogenada más abundante y de mayor interés en todo tipo de aguas, la presencia de NO_3^- en aguas proceden de la disolución de rocas y minerales, de la descomposición de materias vegetales y animales, de efluentes industriales y de lixiviados. La determinación de los nitratos es importante, sobre todo para aguas de consumo humano.
Nitritos	Especie poco estable químicamente, su presencia en un agua suele indicar una contaminación de carácter fecal reciente. Sin embargo, en ríos con contaminaciones de aguas residuales urbanas e industriales apreciables pueden medirse niveles más altos que en aguas superficiales oxigenadas
Sulfatos	Los sulfatos son las sales o los esteres del ácido sulfúrico. El ión sulfato es uno de los iones que contribuyen a la salinidad de las aguas, encontrándose en la mayoría de las aguas naturales en concentraciones de 100 a 1000 mg/l
Sulfuros	Su presencia en aguas residuales se debe a la descomposición de materia orgánica y la reducción bacteriana de los sulfatos.
Fluoruros	Los fluoruros son sales de ácido fluorhídrico, la exposición prolongada por ingesta a los fluoruros ocasiona diversos trastornos como fluorosis dental y fluorosis del esqueleto, con mayor incidencia de fracturas óseas en adultos.

2.10. ELECTROQUÍMICA

La electroquímica estudia la formación entre la energía química. Los procesos electroquímicos transfieren electrones de una sustancia a otra, donde se libera energía que se transforma en electricidad o donde la acción de la energía eléctrica promueve la reacción química. Chang (citado por Mendieta, 2013, p.1); Ramírez y García citado por (Cazco y Jarrin, 2010, p. 1).

Cuando los electrones procedentes de una reacción redox circulan por un circuito eléctrico, podemos recabar información sobre la reacción, midiendo la corriente y el voltaje en el circuito (Harris, 2001, p. 331).

Las reacciones redox consta de dos partes o semirreacciones que ocurren simultáneamente, estas son las reacciones de oxidación y reducción. Una reacción redox es una reacción de transferencia de electrones de una especie a otra. Se dice que una especie se oxida cuando pierde electrones, y que se reduce cuando gana electrones. Un agente oxidante, también llamado oxidante, toma electrones de otra sustancia, y se reduce. Un agente reductor, también llamado reductor, cede electrones a otra sustancia, y se oxida en ese proceso (Harris, 2001, p. 331); Ramírez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 1).

2.10.1. CELDAS ELECTROQUÍMICAS

La celda electroquímica es una unidad experimental que produce trabajo eléctrico en el entorno y se producen reacciones químicas en el interior. El sistema de la celda electroquímica está formado por dos electrodos separados por una solución electrolítica. El electrodo donde se produce la oxidación se llama ánodo y en el ocurre la reducción se denomina cátodo. Castellan *et al.* (Citado por Mendieta, 2013, p.1).

Para cerrar el circuito eléctrico, las soluciones electrolíticas se deben conectar a través de un medio conductor, por el que pasan los aniones o los cationes de un compartimiento a otro. La corriente fluye del ánodo al cátodo debido a la presencia de una diferencial de potencial, con o sin corriente eléctrica, entre los dos electrodos. Chang *et al.* (Citado por Mendieta, 2013, p.1).

La variación de la energía libre, ΔG , de una reacción química, que transcurre de forma reversible a una temperatura y presión constante, es igual al trabajo eléctrico máximo que se puede realizar con esa reacción química sobre su entorno.

$$\text{Trabajo hecho sobre su entorno} = -\Delta G \qquad \text{Ec.2. 1}$$

El signo negativo de la ecuación indica que la energía libre de un sistema disminuye cuando se realiza trabajo sobre su entorno. (Harris, 2001, p. 334).

La fuerza electromotriz (f.e.m) es la diferencia de potencial de una celda electroquímica en equilibrio. La relación entre la fuerza electromotriz y la espontaneidad de la reacción química está dada por la ecuación 2.2. Metz y Posadas (Citado por Mendieta, 2013, p.1); (Harris, 2001, p. 334).

$$\Delta G = -nFE \qquad \text{Ec.2. 2}$$

Dónde:

ΔG : Energía libre de Gibbs.

n : Número de moles de electrones en la reacción en equilibrio.

F : Constante de Faraday (96 500 C/mol).

E : Fuerza electromotriz de la celda (diferencia de potencial eléctrico).

De manera particular.

- Si ΔG tiene un valor negativo y n , F son cantidades positivas, es decir, en las reacciones dentro de la celda se da una disminución de la energía libre, las reacciones en los dos electrodos se dan espontáneamente y la celda se denomina celda galvánica o pila galvánica. Metz et al. (Citado por Mendieta, 2013, p.2); (Harris, 2001, p. 335).
- Si ΔG y E son cero, existe un estado de equilibrio.
- Sí ΔG es positivo, la reacción no es espontánea, es decir, que se necesita de una fuente externa que entregue energía para que se den las reacciones. La celda se nombra celda electrolítica y la reacción contraria será espontánea. Metz y Posadas (Citado por Mendieta, 2013, p.2).

Los aniones que se cargan negativamente se mueven hacia el ánodo para oxidarse y los cationes E cargados positivamente hasta el cátodo donde se reducen. Metz (Citado por Mendieta,2013, p.2).

La ley de Ohm establece que la corriente, I , que pasa por un circuito es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia, R , del circuito (Harris, 2001, p. 334).

$$\text{Ley de Ohm:} \quad I = \frac{E}{R} \quad \text{Ec.2. 3}$$

I : Corriente (Amperios).

E : potencial eléctrico (Voltios).

R : Resistencia (Ohmios).

La resistencia se mide en ohmios (Ω). Por un circuito con una diferencia de potencial de un voltio y una resistencia de un ohmio, circula una corriente de un amperio (Harris, 2001, p. 334).

2.10.2. ELECTROLISIS

La electrolisis es una tecnología electroquímica mediante la que se provoca un cambio químico en un líquido por intervención de la energía eléctrica. La energía eléctrica se introduce mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre los elementos conductores (electrodos) sumergidos en el líquido. El líquido en el que se provoca la reacción química debe ser conductor y contener sustancias capaces de oxidar o reducirse. La diferencia de potencial genera un paso neto de corriente eléctrica (electrones) entre los electrodos, con la consiguiente oxidación de algunas especies en la superficie de uno de los electrodos (ánodo) y la reducción de otras en el otro (cátodo) (Barrera, 2014, p.18).

Para que circule la corriente eléctrica es necesario polarizar los electrodos; la polarización, es el cambio de potencial de un electrodo respecto a su potencial de equilibrio. En una Electrolisis, el ánodo siempre está conectado al borde positivo de la fuente de poder externa y el cátodo al borde negativo. Castellan *et al.* (Citado por Mendieta, 2013, p.2-3).

En la figura 2.5 se muestra un esquema general de un reactor electrolítico, y en la figura 2.6 se ven los principales procesos que pueden ocurrir en el mismo. Como se observa, los dos electrodos están conectados a una fuente de alimentación de corriente continua (o un rectificador), que provoca un transporte de electrones desde uno hasta el otro (Barrera, 2014, p.18).

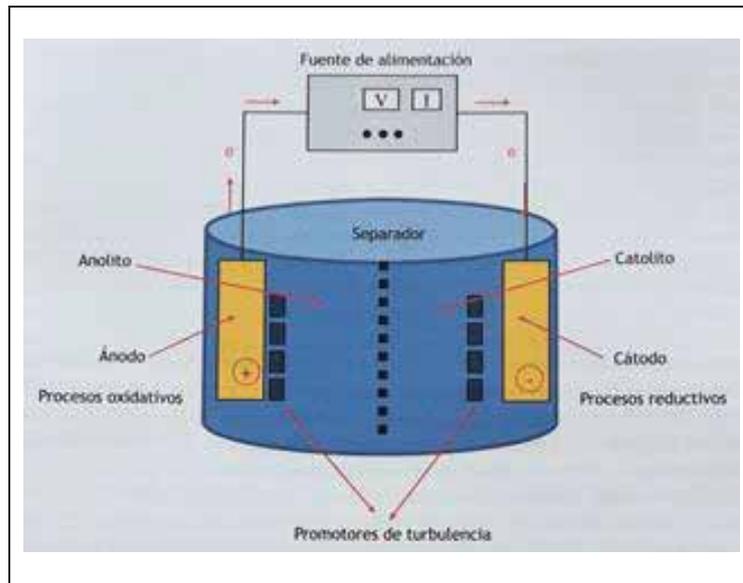


Figura 2.5. Principales componentes de los reactores electrolíticos (Barrera, 2014, p.19).

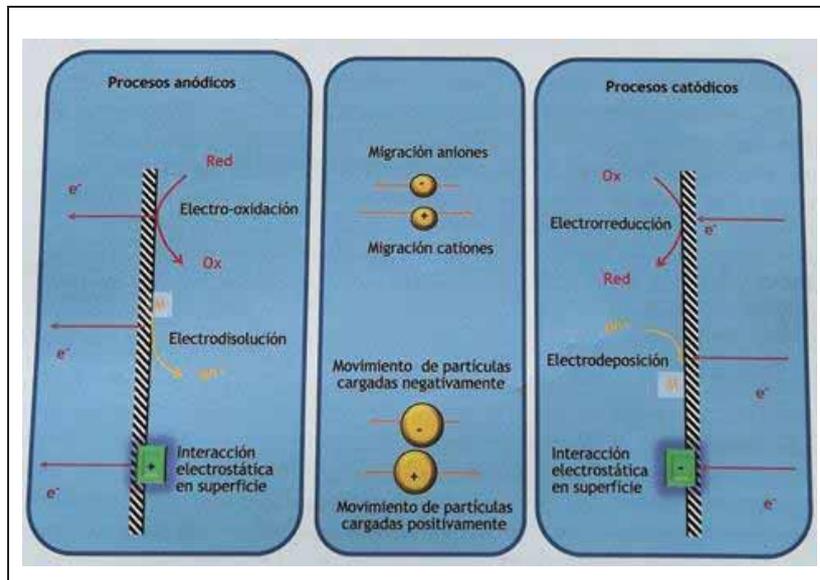


Figura 2.6. Principales procesos que pueden desarrollarse en una celda electrolítica (Barrera, 2014, p.19).

2.10.3. LEYES DE FARADAY

Michael Faraday descubrió la relación fundamental entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una solución electrolítica y el peso de la sustancia que se forma por reacción química en los electrodos. Las leyes de Faraday determinan la cantidad de masa que se adhiere a los electrodos o que se desprende de estos, como resultado de los procesos electrolíticos. Estas leyes son aplicadas a las celdas electroquímicas. Gutiérrez (Citado por Mendieta, 2013, p.3); Ramírez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 18); (Reyes y Mercado, 2003, p.11).

La carga eléctrica (q) se mide en Coulombios (C). La carga de un electrón es $1.0622 \cdot 10^{-19}$ C, de manera que 1 mol de electrones tiene una carga de $9,649 \cdot 10^4$ C, que se llama la constante de Faraday (F) (Harris, 2001, p. 332); (Reyes y Mercado, 2003: p.11-12).

$$q = n * F \quad \text{Ec.2. 4}$$

q : Culombios.

n : moles.

F : $\frac{\text{Culombios}}{\text{mol}}$.

La velocidad de flujo de electricidad se expresa en amperios. Un amperio representa el flujo de un Coulombio en un segundo.

$$\text{Culombio} = \text{Amperio} * \text{segundo}$$

$$Q = I * t \quad \text{Ec.2. 5}$$

Donde

Q : Número de Coulombios (C).

I : Corriente (A).

t : Tiempo (s).

Primera ley de Faraday

La masa de un elemento depositada o liberada en la celda electrolítica es independiente de la composición química del electrolito cuando se mantiene su valencia. Cerón y Soto (Citado por Mendieta, 2013, p.3); Ramírez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 18).

Segunda ley de Faraday

La cantidad de masa disuelta en la solución electrolítica o depositada de uno de los electrodos es proporcional a la cantidad de electricidad (Q) que pasa por el electrolito, como se observa en la ecuación 2.6. Burbano *et al.* (Citado por Mendieta, 2013, p.3-4); Ramírez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 18):

$$m = k * Q \quad \text{Ec.2. 6}$$

Dónde:

m : Masa disuelta o depositada.

K : Constante de proporcionalidad.

Q : Producto de la intensidad de corriente (I) por el tiempo (t).

El peso equivalente está dado por la ecuación 2.7, donde la cantidad de electricidad necesaria para depositar un equivalente de una sustancia es F :

$$E_q = k * F \quad \text{Ec.2. 7}$$

Dónde:

E_q : Peso equivalente.

k : Constante de proporcionalidad.

F : 96 500 Coulombios/mol.

Al combinar las ecuaciones es 2.6 y 2.7 se tiene la ecuación 2.8, que relaciona la cantidad de masa disuelta con el peso equivalente y con la cantidad de electricidad:

$$m = \frac{E_q}{F} * Q \quad \text{Ec.2. 8}$$

Tercera ley Faraday

La cantidad de sustancia disuelta o depositada en un electrodo por el paso de carga eléctrica (Q) esta relacionada entre si con su equivalente químico, es decir, las masas son directamente proporcionales a sus equivalentes, como se observa en la ecuación 2.9. Gutiérrez y Posadas (Citado por Mendieta, 2013, p.4-5); Ramírez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 19):

$$\frac{m_1}{E_{q1}} = \frac{m_2}{E_{q2}} \quad \text{Ec.2. 9}$$

Dónde:

m_1 : Masa del elemento que se deposita en el electrodo 1.

m_2 : Masa del elemento que se deposita en el electrodo 2.

E_{q1} : Equivalente químico de la sustancia que se deposita en el electrodo 1.

E_{q2} : Equivalente químico de la sustancia que se deposita en el electrodo 2.

2.10.4. ECUACIÓN DE NERNST

El principio de Le Chatelier dice que al aumentar la concentración de los reactivos la ecuación se desplaza a la derecha, y al aumentar la concentración de los productos se desplaza a la izquierda. La fuerza impulsora de una reacción viene expresada por la ecuación de Nernst, cuyos dos términos representan la fuerza impulsora en condiciones estándar (E^0 , que se aplica cuando todas las actividades valen uno) y un término que expresa la dependencia de las concentraciones de los reactivos. La ecuación de Nernst da el potencial de una célula cuando la actividad de los reactivos no es la unidad (Harris, 2001, p. 341 y 343).

Ecuación de Nernst de una semirreacción.

Para la semirreacción:



La ecuación de Nernst da el potencial de la semicélula, E ,

$$\text{Ecuación de Nernst: } E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{\mathcal{A}_B^b}{\mathcal{A}_A^a}\right) \quad \text{Ec.2. 10}$$

Donde

E^0 : potencial estándar de reducción (es decir, $\mathcal{A}_A = \mathcal{A}_B = 1$).

R : constante de los gases [= 8.314510]/(K. mol) = 8.314510(V * c)/(K * mol)].

T : temperatura (K).

n : número de electrones en la semi reacción.

F : constante de Faraday (= 9,6485309 * 10⁴ C/mol).

\mathcal{A}_i : actividad de la especie i .

Ecuación de Nernst para una reacción completa.

El voltaje, E , es la diferencia de los potenciales de los dos electrodos.

Ecuación de Nernst de una célula completa:

$$E = E_+ - E_- \quad \text{Ec.2. 11}$$

Las condiciones estándar de una celda electroquímica son: temperatura de 25°C, 1 atm de presión y concentraciones de especies electrolíticas con actividad unitaria ($\mathcal{A}_i = 1$). Ramírez et al. (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 20).

2.11. ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario. Eckenfelder y Mollah (Citado por Arango, 2005, p. 50); Ramirez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 26).

La coagulación asistida electroquímicamente, o electrocoagulación (EC), es un proceso electroquímico en el que, a partir de compuesto procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, como se muestra en la figura 2.7, lo que posibilita su conversión en sólidos suspendidos y su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido/liquido, tales como la decantación, la flotación y filtración. Como consecuencia de su disolución, los ánodos van desapareciendo a medida que transcurre el tratamiento, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (ánodos de sacrificio) (Barrera, 2014, p.29-30); Ramirez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 26).

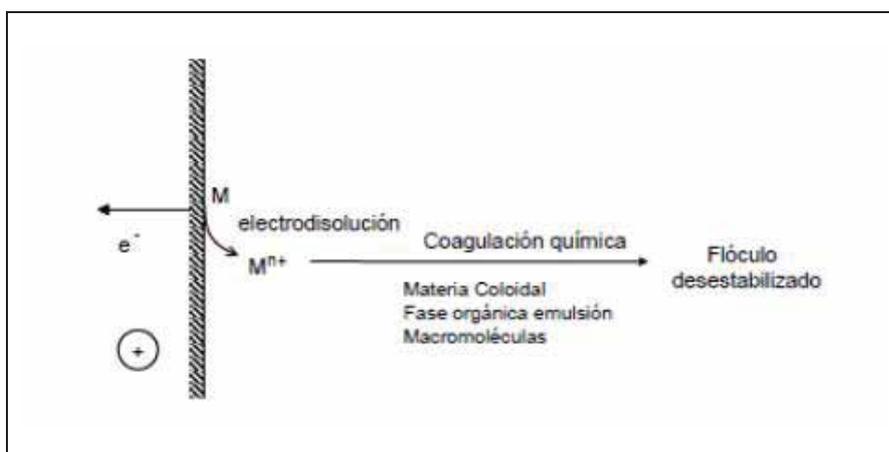


Figura 2.7. Electrodisolución de un metal en un proceso de electrocoagulación (citado por Martínez, 2007, p. 26).

La electrocoagulación se define como un proceso efectivo para desestabilizar finamente las partículas dispersas en el agua natural o residual, usualmente se utilizan electrodos de hierro o aluminio en este proceso y, cuando se aplica corriente eléctrica, los ánodos producen iones de hierro (Fe^{2+}) o aluminio (Al^{3+}); estos iones generados electroquímicamente son buenos coagulantes y pueden hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermediarios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas presentes en el agua, y las partículas desestabilizadas se unen para formar flóculos. Al mismo tiempo, las pequeñas burbujas de hidrogeno generadas en el cátodo hacen que los flóculos formados floten, facilitando la separación de partículas de agua residual, en la figura 2.8 se muestra los procesos involucrados en la electrocoagulación. Chen *et al.* (Citado por Barrera, 2014, p.167); Mejia y Osorio (citado por Mercado, Reyes y Agrono, 2008, p. 56); Guohua (citado por Arango, 2005, p. 50); Ramirez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 26).

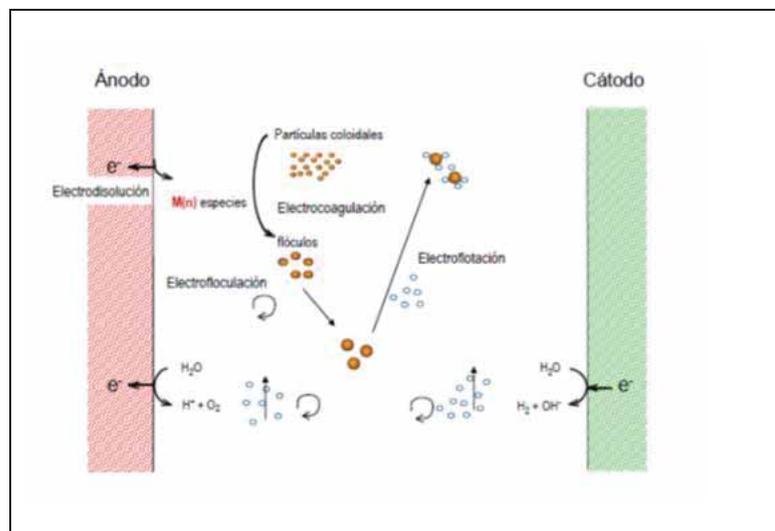


Figura 2.8. Procesos involucrados en un reactor de electrocoagulación (citado por Martínez, 2007, p. 28).

Los iones liberados durante la electrocoagulación forman largas cadenas de polihidróxidos, los cuales son diferentes a los formados en la coagulación convencional cuando se añaden sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales. Los flóculos formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente. Martín y Col (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 258).

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de los contaminantes que se pueden dar por dos vías: la primera, por reacción química y precipitación; y la segunda, por el proceso físico de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar, como se muestra en la figura 2.9. Ramirez *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 26).

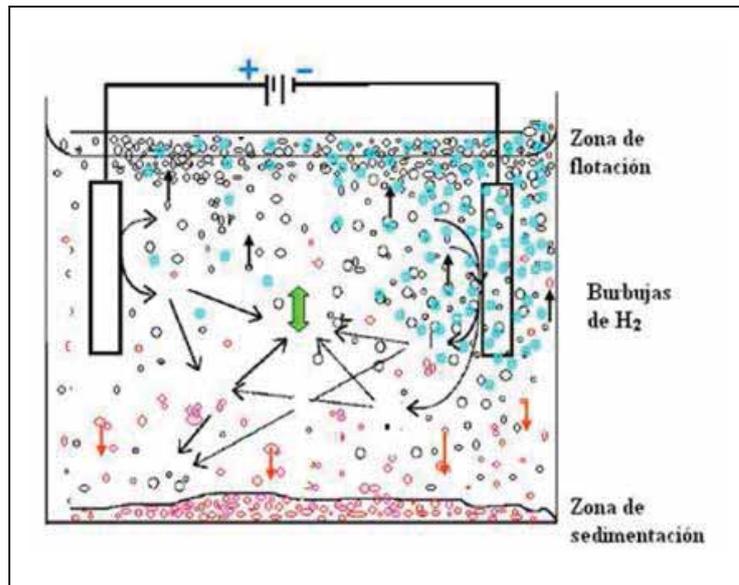


Figura 2.9. Ramírez (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, pág. 27).

Uno de los aspectos importantes del proceso electrolítico es la neutralización de las cargas de las partículas suspendidas, por tanto, es necesario ajustar el potencial Z de las mismas a Potencial Z cero, con el objeto de facilitar la formación y adhesión de flocos con las burbujas de gas.

La modificación en el pH del efluente, la adición de electrolitos en muy pequeñas cantidades, así como los iones, que quedan libres para la disolución anódica del electrodo, contribuyen para alcanzar el potencial Z igual a cero (Reyes y Mercado, 2003, p. 13-14).

2.11.1. MECANISMO DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

Un reactor de electrocoagulación es una celda electroquímica donde el ánodo metálico generalmente, de aluminio, y algunas veces, de hierro se usa para dosificar al agua contaminada un agente coagulante. La electrocoagulación produce cationes metálicos in situ, en lugar de dosificarlos externamente. Simultáneamente, se generan gases electrolíticos, especialmente hidrogeno, en el cátodo. La electrocoagulación tiene la capacidad de remover un amplio rango de contaminantes incluyendo sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, grasas, aceites, iones y radionúclidos. Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes influyen e interactúan en el sistema de remoción de contaminantes, por ejemplo, los iones son probablemente electro precipitados mientras que los sólidos suspendidos son adsorbidos por el coagulante. Holt (citado por Barrera, 2014, p. 170).

Los iones liberados remueven cualquier contaminante, bien sea por reacción química y precipitación o agregando materiales coloidales que bien pueden flotar o precipitarse. Además, como el agua contiene partículas coloidales, aceites u otros contaminantes, éstos se mueven a través del campo eléctrico aplicado y pueden ionizarse, sufrir reacciones de electrólisis o de hidrólisis o formar radicales libres que alteran las propiedades físicas y químicas del agua y de los contaminantes, resultando en un estado reactivo y excitado lo cual es causa de la liberación, destrucción o insolubilidad de los contaminantes (citado por Arango, 2005, p. 53); Mollah (citado por Restrepo, 2006, p. 65-66).

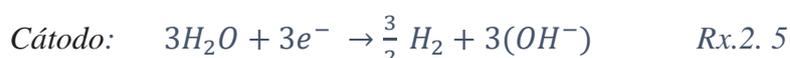
De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema. Rajeshwar y Ibanez (citado por Restrepo *et al.*, 2006, p.66); Ramírez et al. (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 27).

Según Mollah *et al.* (Citado por Restrepo, 2006); Can (citado por Barrera, 2014) en general, durante un tratamiento por electrocoagulación se presentan las siguientes etapas o procesos (p.66); (p.170):

- a. Reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo (formación del coagulante por oxidación del ánodo).
- b. Formación de coagulantes en la fase acuosa (desestabilización de los contaminantes y emulsiones).
- c. Los coagulantes adsorben a los contaminantes solubles o coloidales y se remueven por sedimentación o por flotación (formación de flóculos).

En la figura 2.10 se muestra la complejidad de un sistema de electrocoagulación. El coagulante y sus productos de hidrólisis pueden tener numerosas interacciones con el contaminante, con otras especies iónicas o con las burbujas del gas electrolítico (Barrera, 2014, p. 170).

Las principales reacciones que ocurren en los electrodos son:



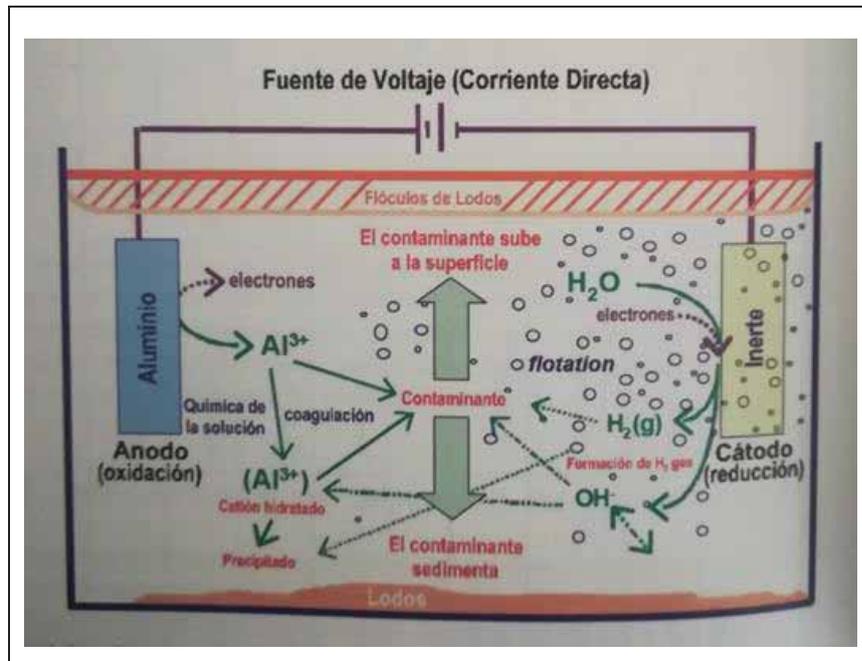


Figura 2.10. Interacciones ocurridas en un reactor de electrocoagulación.

Holt (citado por Barrera, 2014 p.170).

Si el potencial del ánodo es lo suficientemente alto, también pueden ocurrir reacciones secundarias, como la oxidación directa de compuestos orgánicos y de iones cloruro presentes en el agua residual. Can (citado por Barrera, 2014, p.171).



El cloro producido es un fuerte agente oxidante que puede oxidar algunos de los compuestos orgánicos.

Por otro lado, el cátodo puede ser químicamente atacado por iones hidroxilo (OH^-) generados durante la generación de hidrogeno (H_2) a valores altos de pH. Can y Picard (citado por Barrera, 2014, p. 171).



Los iones $Al_{(aq)}^{3+}$ y OH^- generados en las reacciones (2.5) y (2.7) reaccionan para formar varias especies monoméricas como son $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ y $Al(OH)_4^-$, y también para formar especies poliméricas como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$; los cuales se transforman finalmente a $Al(OH)_3$, de acuerdo con la compleja precipitación cinética. Gurses et al. (citado por Barrera, 2014, p. 171); Holt y Bayramoglu (citado por Restrepo *et al.*, 2006, p.67).

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Mollah *et al.* (citado por Restrepo, 2006, p.66-67).

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico.

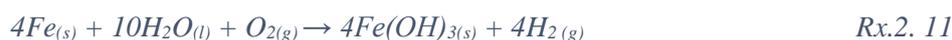
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:



Reacción global:



Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso.

En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



Reacción global:



Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. Larue (citado por Restrepo, 2006, p.67).

Así como existen una gran variedad de especies químicas que se forman durante la electrocoagulación, también hay algunos factores que se deben controlar, ya que son

determinantes en la formación de dichas especies, tal es el caso de la densidad de corriente, el pH y la temperatura (Barrera, 2014, p. 171). Así mismo la Naturaleza y concentración de los contaminantes, pH y Conductividad (Restrepo *et al.*, 2006, p.66).

2.11.2. FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

2.11.2.1. DENSIDAD DE CORRIENTE O CARGA

El suministro de corriente a un sistema de electrocoagulación determina a la cantidad de iones de Al^{3+} o Fe^{2+} liberados por los electrodos respectivos. Para el aluminio, la masa equivalente electroquímica es 335.6 mg/(Ah), para el hierro, el valor es 1041 mg/(Ah). Una corriente grande significativa una unidad pequeña de electrocoagulación y, además, existe la posibilidad de gastar energía eléctrica calentando el agua (Barrera, 2014, p.171); Guohua (citado por Arango, 2005 p.50-51).

Un valor muy elevado de densidad de corriente puede disminuir significativamente la eficiencia de la corriente debido a la producción de oxígeno y además influye en la pasivación de los electrodos. Chen (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 267); Guohua (citado por Arango, 2005, p.53).

Para que el sistema electrocoagulación opere por un largo periodo de tiempo sin mantenimiento se sugiere que la densidad de corriente se mantenga entre 20-25 A/m^2 . Holt y Kovatchva (citado por Barrera, 2014, p.171); Chen (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 267).

La selección de densidad de corriente debe realizarse en conjunto con otros parámetros de operación, como valores de pH, temperatura y flujo, para asegurar una alta eficiencia de corriente (Barrera, 2014, p.171); Guohua (citado por Arango, 2005, p.53).

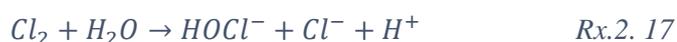
La eficiencia de la densidad de corriente en electrodos de aluminio puede ser de 120-140%, mientras que para los de hierro es de alrededor del 100%, ello se atribuye al efecto de corrosión, especialmente cuando hay iones cloruro presentes. Holt y Kovatchva (citado por Barrera, 2014, p.171-172).

La calidad del agua tratada depende de la cantidad de iones producidos (mg) o de la carga, así como del producto de la corriente y del tiempo (Ah) suministrados al sistema (Barrera, 2014, p.172).

2.11.2.2. PRESENCIA DE CLORUROS DE SODIO

El cloruro de sodio se emplea usualmente para incrementar la conductividad del agua o del agua residual que se va a tratar. Además de esta contribución iónica, se encontró que los iones cloruro podrían reducir significativamente los efectos adversos de otros aniones, como HCO_3^- , SO_4^{2-} ; ya que la existencia de los iones carbonato o sulfatos conducirían a la precipitación de los iones Ca^{2+} o Mg^{2+} que forman una capa aislante sobre la superficie de los electrodos; esta capa aislante incrementaría el potencial entre electrodos, y su resultado es un significativo decremento en la eficiencia de la corriente. Por lo tanto, se recomienda que las cantidades de aniones Cl^- presentes sean del 20% para asegurar una operación normal de electrocoagulación. Sin embargo, la adición de NaCl conduce al decremento en el consumo de corriente, ya que se incrementa la conductividad. Chen y Wong (citado por Barrera, 2014, p.172); Guohua (citado por Arango, 2005, p.53).

Cuando hay iones cloruro se llevan a cabo las siguientes reacciones, lo que favorece la desinfección (Barrera, 2014, p. 173); Chen (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 268):



2.11.2.3. EFECTO DEL pH

Efecto del pH en el agua residual para los procesos de electrocoagulación se refleja en la eficiencia de corriente, así como en la solubilidad de hidróxidos metálicos (Barrera-Díaz). El pH de trabajo depende mucho de la naturaleza de los contaminantes. Se observa una mejor eficiencia de remoción a pH cercanos a 7 (Barrera, 2014, p. 173); Chen (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 267); Guohua (citado por Arango, 2005, p.53).

Butler (citado por Barrera, 2014) reporta que, para diferentes tipos de agua que se han tratado con electrocoagulación, se puede observar que el intervalo de pH óptimo es de pH 6 a 8. Sin embargo, se ha encontrado que las eficiencias de corriente del aluminio son más altas a condiciones ácidas o alcalinas que a condiciones neutras. (p. 173).

El pH del efluente posterior a la electrocoagulación se incrementa por la acción de influentes ácidos, pero disminuye por influentes alcalinos, esta es una de las ventajas de este proceso. El incremento del pH a condiciones ácidas se atribuye a la generación de hidrógeno en el cátodo,

producido por la reducción del agua que genera H_2 y OH^- , como se observa en la siguiente reacción (Barrera, 2014, p. 173); Guohua (citado por Arango, 2005, p.53):



De hecho, además del desprendimiento de hidrogeno, la formación de $Al(OH)_3$ cerca del ánodo produce H^+ , provocando la disminución de pH.

El incremento del pH con influentes ácidos se debe al dióxido de carbono (CO_2) producido por el burbujeo de hidrógeno, a la formación de precipitados de otros aniones con Al^{3+} y al cambio de equilibrio en la reacción de generación de hidrogeno. El decremento de pH en condiciones alcalinas puede deberse a la formación de precipitados de hidróxido con otros cationes, de acuerdo con la reacción 2.20 (Barrera, 2014, p.173).



El electrodo de hierro se ha usado en aguas residuales caracterizadas por presentar coloración y de giro textil, se han empleado influentes alcalinos logrando alta remoción de color y demanda química de oxígeno. Zhaing (citado por Barrera, 2014, p.173-174).

2.11.2.4. EFECTO DE LA TEMPERATURA

El Efecto de la temperatura en esta tecnología no ha sido muy investigado, la eficiencia máxima de corriente se consiguió si se incrementa la temperatura hasta 60°C. El incremento de la eficiencia de corriente con temperatura se atribuye al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio sobre la superficie del electrodo. Chen (citado por Barrera, 2014, p.174); Guohua (citado por Arango, 2005, p.53); Chen y Tsouris (citado por Piña et al, 2011, p. 267).

Cuando la temperatura es tan alta, hay un encogimiento de los grandes poros de gel $Al(OH)_3$ y se forman flóculos más compactos, los cuales se depositan más fácilmente en la superficie del electrodo. A mayor temperatura, mayor conductividad y, por lo tanto, menor consumo de energía (Barrera, 2014, p.174).

2.11.2.5. TIPO DE MATERIAL DE LOS ELECTRODOS

Los materiales que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro. La configuración de los electrodos, generalmente, es en forma de platos de aluminio o hierro; se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de aluminio es para el tratamiento

de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes. Chen (citado por Barrera, 2014, p. 174); (Piña *et al.*, 2011, p. 266).

En el caso de la electrocoagulación con ánodos de sacrificio, la selección del material del electrodo va a depender de la naturaleza y afinidad que tenga el contaminante que se pretende remover con el coagulante producido, es decir, si se quiere remover material suspendido, el coagulante debe propiciar una desestabilización de los coloides para que estos se aglutinen y posteriormente sean separados por precipitación. En el caso de elementos disueltos se busca que el coagulante los adsorba o los retenga mediante algún mecanismo fisicoquímico. Cuando se trata de electrodos inertes como el acero inoxidable, el titanio, platino, níquel, grafito, etc., el mecanismo de remoción es debido a que se presenta una reducción electroquímica del agua en el cátodo incrementándose el pH propiciando la formación de sales básicas poco solubles e hidróxidos de metales polivalentes que precipitan. Gorodovkyh y col. (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 265).

Según Morante y Wan (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 265) la utilización de electrodos de aluminio tiende a ser minimizada con respecto a los de hierro, debido a los problemas de disposición de los lodos conteniendo ese metal y a la alta pasivación de los electrodos.

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, tales como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales, los electrodos más modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio (Arango, 2005, p. 52).

2.11.2.6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS ELECTRODOS

La remoción de los contaminantes es mayor a distancias cortas de separación entre electrodos. Chen *et al.* (Citado por Cazco y Jarrin, 2010, p. 33); Mlakootian e Yousefi (citado por Mendieta, 2013, p. 17).

Además, si la distancia entre electrodos aumenta el consumo de electricidad también aumenta. Mlakootian e Yousefi (citado por Mendieta, 2013, p. 17).

2.11.2.7. TIEMPO DE RETENCIÓN

El tiempo de residencia, indican algunos autores determina que, a mayor valor, mayor es la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como

la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que, al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos. Sin embargo, estos mismos autores señalan que sus variaciones resultan estadísticamente menos significativas que las variaciones de pH, ya que éste, está muy vinculado a la constante del producto de solubilidad (K_{ps}) la cual debe de disminuir al elevarse el mismo, lo que significa que los sólidos son más insolubles y por tanto se obtiene una mayor precipitación de los mismos en la medida que el pH aumenta. Prieto (citado por Aguilar, 2015, p. 25).

Al aumentar el tiempo de retención del agua y si se mantiene constante la diferencia de potencial y el pH, aumenta la eficiencia de eliminación de contaminantes, principalmente de la dureza, debido a la precipitación de flóculos que causan la eliminación de la dureza. Mlakootian e Yousefi (citado por Mendieta, 2013, p. 18).

2.11.3. TIPOS DE FLUJO HIDRÁULICO EN REACTORES DE COAGULACIÓN

Existen muchos tipos de celdas electroquímicas empleadas en el proceso de electrocoagulación, y pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios (Barrera, 2014, p. 34).

- Dirección del flujo de agua residual.
- Modo de circulación.
- Tipo de conexión electródica.
- Finalidad de la celda.

Dependiendo de la orientación de los electrodos (placa), el flujo dentro de la celda de electrocoagulación pueden clasificarse en unidades de flujo horizontal y vertical (Figura 2.11). (Barrera, 2014: p. 34); (Piña *et al.*, 2011, p. 264).

Esta disposición resulta importante si se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrogeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente (Barrera, 2014: p. 34).

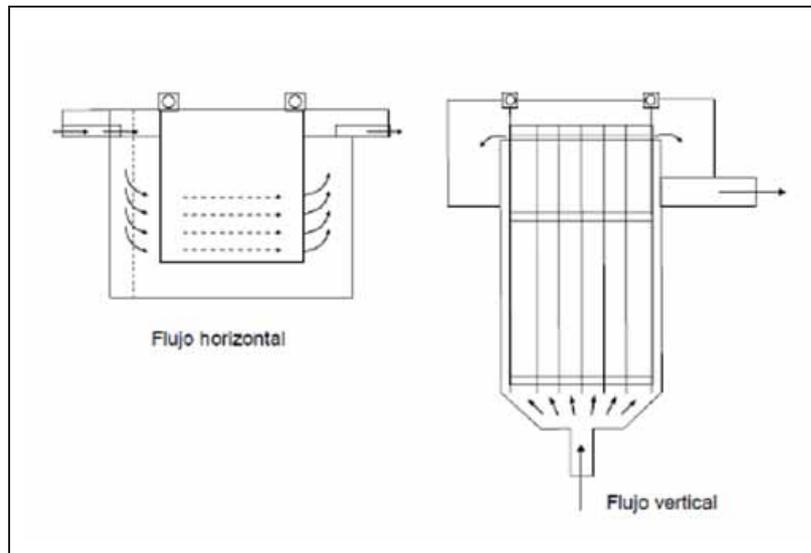


Figura 2.11. Tipos de flujo hidráulico en reactores de coagulación. Cañizares y Col
(Citado por Barrera, 2014: p.34).

Según el modo de circulación del agua que se va a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples, o bien de un solo canal, tal y como se observa en la figura 2.12A. La ventaja de las celdas de canales múltiples se encuentra en la sencillez de su disposición. Sin embargo, debido al pequeño caudal del electrolito en cada uno de los canales, esta disposición favorecería el fenómeno de pasivación de los electrodos (Barrera, 2014: p.34); (Piña *et al.*, 2011, p. 264).

Cuando no es posible reducir la pasivación en la superficie de los electrodos, se recomienda incrementar la velocidad del flujo utilizando un sistema con un solo canal. Chen (Citado por Piña *et al.*, 2011, p. 264).

Por otra parte, de acuerdo con el tipo de conexión eléctrica, los reactores se pueden clasificar en monoplares y bipolares (figura 2.12B). La configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares ofrecen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que solo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño. Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares, y produciendo por tanto pérdidas de corriente; lo que se ha de tener en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de los electrodos (Barrera, 2014, p.34-35); (Piña *et al.*, 2011, p. 264); Mollah (citado por Aguilar, 2015, p. 27-28).

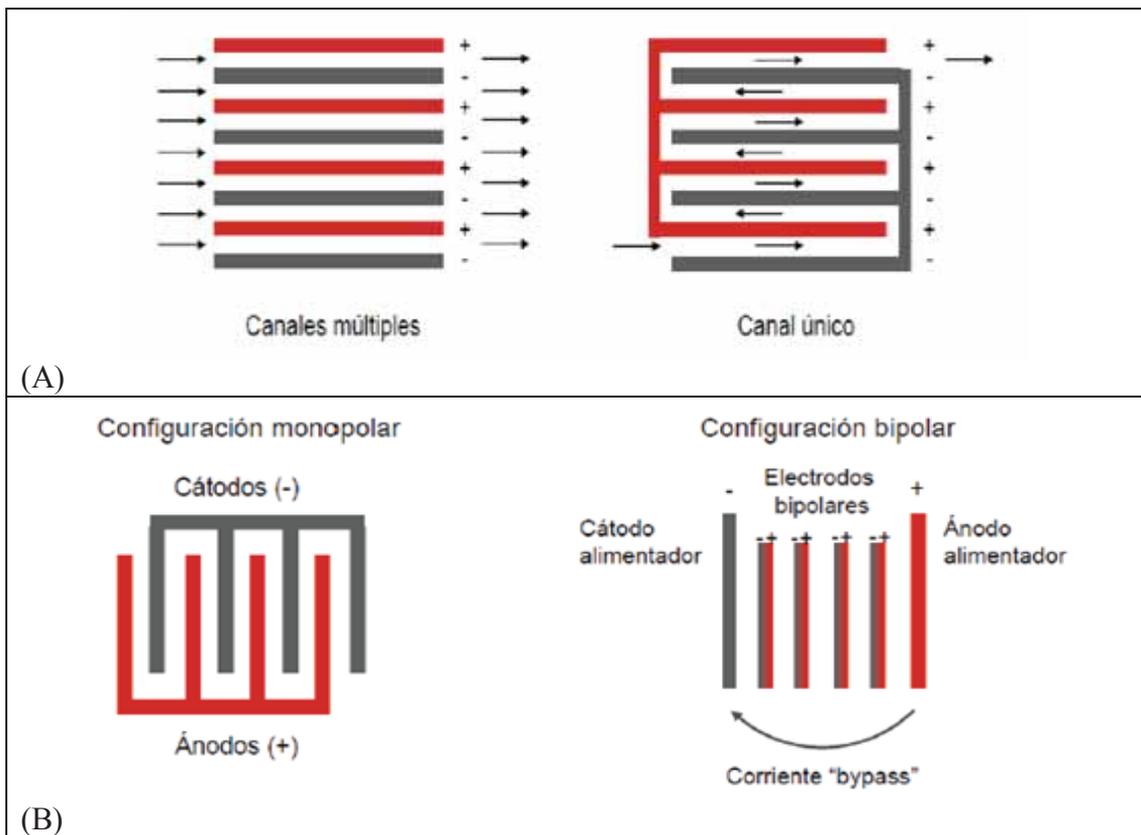


Figura 2.12. Configuración en celdas de electrocoagulación. Cañizares y Col (citado por Barrera, 2014, p.35).

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada de disolución de los iones metálicos se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie. Mollah *et al.* (Citado por Arango, 2005, p. 51); Jiang y Mollah (citado por Restrepo *et al.*, 2006, p. 68).

Para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar. Jiang y Mollah (citado por Restrepo *et al.*, 2006, p. 68).

Monopolar

Los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía (Aguilar, 2015, p. 26).

En Paralelo

En la disposición monopolar en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales. Mollah (citado por Aguilar, 2015, p. 26).

En la figura 2.13 se aprecia la distribución de los electrodos.

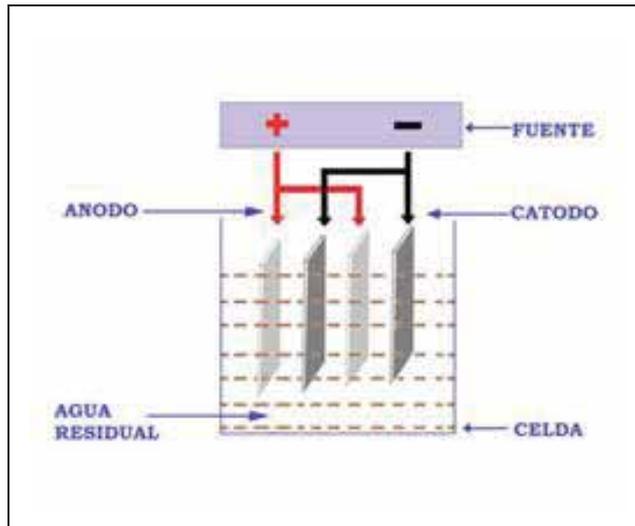


Figura 2.13. Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo. Mollah (citado por Aguilar, 2015, p. 27).

En Serie

La disposición de electrodos monopolares en serie se observa que cada par de electrodos de sacrificio “está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo. Esta disposición de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una única célula con muchos electrodos e interconexiones (ver figura 2.14). En disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia. Mollah (citado por Aguilar, 2015, p. 27).

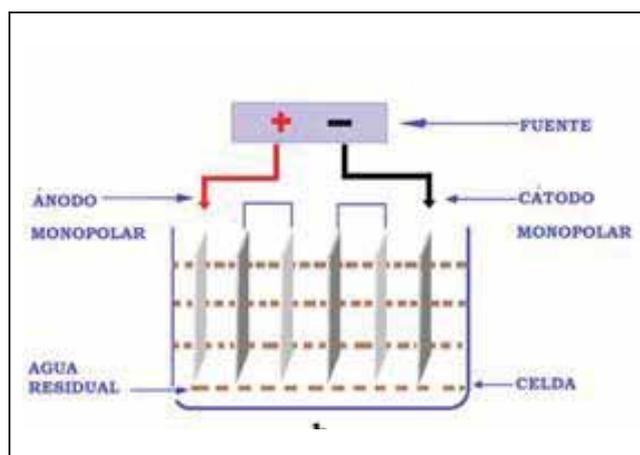


Figura 2.14. Reactor con electrodos monopolares conectados en serie. Mollah (citado por Aguilar, 2015, p. 27).

2.11.4. DISEÑO DE REACTORES Y OPERACIÓN

En su forma más simple un reactor de electrocoagulación puede construirse mediante una celda de electroquímica con un ánodo y un cátodo. Cuando se conectan a una fuente de poder, el material del que está hecho el ánodo se corroe electroquímicamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo es sujeto de pasivación, pero este arreglo no es muy conveniente para el tratamiento de aguas residuales, porque para una producción adecuada de disolución del metal es necesario el uso de electrodos que tengan un área superficial grande, estos se ha logrado utilizando celdas con electrodos en formas de platos, ya sea en paralelo o conectados en serie (figura 2.15). Beagles (citado por Barrera, 2014, p.174); (Arango, 2005, p. 51).

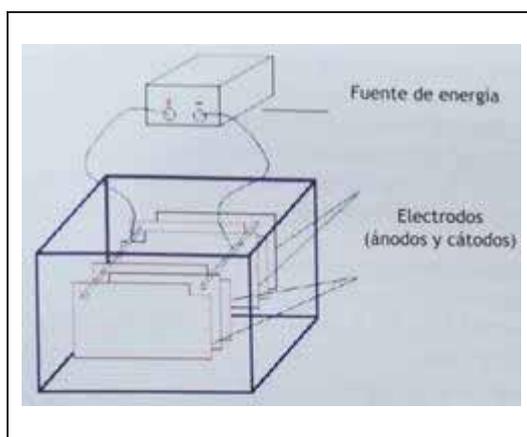


Figura 2.15. Reactor electroquímico a escala piloto, constituido por electrodos en forma de placas intercaladas. Beagles (citado por Barrera, 2014, p.175).

Independientemente del diseño del reactor, las bases no cambian, por lo que este proceso se construye de las interacciones entre electroquímica, coagulación y flotación, estas bases se pueden combinar para formar una gran variedad de diseños de reactores (Barrera, 2014: p.175).

La mayoría de los diseños de los reactores se reduce a la toma de tres decisiones. Holt (citado por Barrera, 2014, p.175).

- a. Operación en lote o en continuo.
- b. Reactores con sólo coagulación o con coagulación- flotación.
- c. Elección del proceso de separación.

Reactores en lotes y en continuo

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de

reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar (Restrepo, 2006, p. 68).

Los procesos en lote típicamente tienen un volumen fijo en lugar de un flujo de alimentación fijo y las concentraciones cambian conforme transcurre la reacción. Dentro de las desventajas que presenta un reactor en lote es que no hay una alimentación de flujo constante, por lo que se tratan volúmenes menores, según la capacidad del reactor, y el desempeño del sistema está relacionado con el tiempo de reacción (Barrera, 2014, p.175); (Restrepo, 2006, p. 68).

Las características de los sistemas en lote y continuo se comparan en la tabla 2.6.

Los sistemas en continuo resultan más eficientes cuando se aplican a escala industrial, es decir, cuando se van a tratar grandes cantidades de agua, ya que el flujo es constante y se puede operar sobre un volumen mayor de agua en menor tiempo y además resulta más económico que los sistemas en lote. Por otro lado, una ventaja cuando se trata de agua residual en reactores en lote es que se garantiza un mezclado adecuado, ya que normalmente cuentan con un agitador mecánico que homogeniza el flujo, además en los reactores en batch el burbujeo que se produce in situ en los electrodos contribuye a mejorar el proceso (Barrera, 2014, p.175-176).

En los sistemas en continuo existe variación en el mezclado y su eficiencia depende del tiempo de residencia, el cual va en función de la geometría del reactor y del gasto del flujo. Holt (Citado por: Barrera, 2014, p.176) describe los sistemas en lote como simples reactores cuya aplicación es a nivel laboratorio.

Tabla 2.6. Comparación entre sistemas en lote y en continuo. Holt y Tejocote (citado por Barrera, 2014, p.176).

Lote	Continuo
Sin alimentación de flujo-volumen constante.	Flujo constante.
Las concentraciones en el sistema cambian con el tiempo.	Las concentraciones en el sistema son constantes.
El desempeño del sistema está relacionado con el tiempo de reacción.	El desempeño del sistema está relacionado con el tiempo de residencia en el reactor.
Operación dinámica.	Operación fija.
El contenido en el reactor se encuentra bien mezclado.	Variación en el mezclado.

2.11.5. APLICACIONES DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Son métodos que comenzaron a analizarse con mayor interés y bajo distintas condiciones operativas a partir de los años 90 y se han obtenido resultados muy positivos:

Aplicaron la oxidación electroquímica para el tratamiento de efluentes contaminados con fenol. Dichos investigadores compararon la factibilidad de mineralización del compuesto, a partir de la utilización de ánodos de platino y titanio recubierto con SnO₂, logrando una eficiencia de remoción del 38% y el 90%, respectivamente. Comninellis y Pulgarin (citado por Barrera, 2014, p. 176).

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas aguas residuales.

Una de las aplicaciones más conocidas y populares de la electrocoagulación ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante.

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo (+6), elemento de una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5 ppm (Restrepo *et al.*, 2006, p. 63).

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasosos. Esto representa una problemática ambiental importante. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas.

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO₅ y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente (por Restrepo *et al.*, 2006, p. 63).

La clarificación de aguas residuales y con fines de potabilización, la remoción de cromato, cianuro y arsénico de efluentes industriales, de fluoruro en agua para consumo humano, de materia orgánica soluble, de aceites en emulsión, la recuperación de compuestos fenólicos, tánicos, entre otros. El agua tratada por electrocoagulación se convierte en agua clara, limpia, sin olor y lista para reutilizarse. Chen *et al.* (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 264).

Remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos.

Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO₅ en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes (Restrepo *et al.*, 2006, p. 63).

También reportan que los procesos de electrocoagulación son más eficientes que la coagulación química en el tratamiento del agua potable. Para el caso de los nitratos, nitritos y amoníaco, es factible la electrocoagulación, pero se requiere de más investigación ya que no se han establecido los mecanismos de remoción. De igual manera, la de fluoración del agua es efectiva empleando la electrocoagulación, pero no hay suficiente información relacionada con los complejos formados de Aluminio y Hierro (Piña *et al.*, 2011, p. 264).

Se emplearon electrodos de aluminio y hierro para tratar aguas residuales de giro textil, determinando que el electrodo de hierro permite obtener mayor eficiencia de remoción- expresada en términos de DQO- que el electrodo de aluminio. Can y Kobya (citado por Barrera, 2014, p. 176).

En México, Barrera-Díaz reporta el logro de las condiciones óptimas para el tratamiento de aguas residuales industriales altamente contaminadas usando electrocoagulación y oxidación inducida electroquímicamente por generación en el medio del reactivo de Fenton (Barrera, 2014, p.177).

Otros autores, han realizado una amplia revisión bibliográfica para conocer los tipos de contaminantes removidos y su eficiencia mediante procesos de electrocoagulación y electrocoagulación flotación. En su artículo consideran el agua contaminada con aceite, agua de desecho de la industria textil (colorantes), compuestos fenólicos, aguas residuales municipales e industriales, metales pesados en aguas residuales, turbiedad y metales pesados en agua potable, nitratos, nitritos, amoníaco y fluoruros. En el caso de la industria textil, mencionan que la eficiencia de la Electrocoagulación depende del pH, de la concentración del

colorante, la densidad de corriente aplicada y el tiempo de residencia. Mohammad (citado por Piña *et al.*, 2011, p. 265).

2.11.6. VENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

- Los costos de operación son menores que los procesos convencionales usando polímeros (Arango, 2009, p.5).
- Requiere de equipos simples y fáciles de operar con la suficiente libertad operacional para manejar los problemas encontrados en su funcionamiento (Arango, 2009, p.5).
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras (Arango, 2009, p.5).
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos (Arango, 2009, p.6).
- Genera lodos más compactos en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición de estos lodos (Arango, 2009, p.6).
- Los flóculos formados por la electrocoagulación son similares a los producidos químicamente, pero más grandes, contiene menos agua ligada, son anti ácidos y más estable y pueden ser separados rápidamente por filtración (Arango, 2009, p.6).
- Ausencia de magnesio en los lodos por la no utilización de este en el proceso.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes (Arango, 2009, p.6).
- Purifica el agua y permite su reciclaje (Arango, 2009, p.6).
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua (Restrepo, Arango, y Garcés, 2006, p. 65).
- Produce efluentes con menor cantidad de SDT sólidos disueltos totales comparado con los tratamientos químicos, si esta agua se reusa, los bajos niveles de SDT contribuyen a bajos costos de tratamiento de aguas (Restrepo et al., 2006, p. 65).
- Remueve las partículas coloidales más pequeñas, ya que el campo eléctrico aplicado las pone en movimiento más rápidamente facilitando la coagulación (Arango, 2009, p.6); (Restrepo et al., 2006, p. 65).
- Las burbujas de gas producidas pueden llevar el contaminante a la superficie de la solución donde puede concentrarse fácilmente, ser recuperado y removido (Restrepo et al., 2006, p. 65).
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación (Arango, 2009, p.5); (Restrepo et al., 2006, p. 65).

- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras (Arango, 2009, p.5-6); (Restrepo et al., 2006, p. 65).
- Tratamiento múltiple de contaminantes (Procontrol, s.f., p. 16).
- No se requieren productos químicos (Procontrol, s.f., p. 16).
- Eliminación de color y olor (Procontrol, s.f., p. 16).
- Tratamiento instantáneo (Procontrol, s.f., p. 16).
- Automatismo y bajo mantenimiento (Procontrol, s.f., p. 16).
- Poco espacio necesario y posibilidad de tratamientos dentro de proceso de producción (Procontrol, s.f., p. 16).

2.11.7. DESVENTAJAS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

- Reposición de los electrodos de sacrificio (Arango, 2009, p. 6).
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo utilizado (Arango, 2009, p. 6); (Restrepo et al., 2006, p. 66).
- No es efectivo en la remoción de DBO5 soluble, proveniente de solventes y anticongelantes (Arango, 2009, p. 6); (Restrepo et al., 2006, p. 66).
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto (Arango, 2009, p. 6); (Restrepo et al., 2006, p. 66).
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso (Arango, 2009, p. 6) y (Restrepo et al., 2006, p. 66).

2.12. PRINCIPIOS BÁSICOS DE ELECTROFLOTACIÓN

2.12.1. SEDIMENTACIÓN O FLOTACIÓN DE UNA PARTÍCULA EN EL AGUA

Los principios que gobiernan la sedimentación o la flotación de una partícula son aplicables en la eliminación de sólidos dispersados en el tratamiento de agua. Si se considera una partícula que sedimenta a una velocidad u en un fluido estático, por la acción de la gravedad la partícula se acelera hasta que la resistencia al avance por fricción del fluido equilibre la aceleración gravitatoria, después de lo cual continúa cayendo a una velocidad terminal u_t . Esta velocidad se calcula haciendo un balance de fuerzas sobre la partícula, como se muestra en la figura 2.16 y en la ecuación 2.12 Glynn (citado por Barrera, 2014, p.183).

El balance de fuerzas que ocurre en la partícula se representa por la ecuación 2.12.

$$Fr = Fe - (Fb - Fd) \quad Ec.2. 12$$

Dónde:

Fr = Fuerza resultante.

Fe = Fuerza externa sobre la partícula, en este caso la de la gravedad.

Fb = Fuerza de flotación (efecto bouyante).

Fd = fuerza de fricción o de avance.

Como se puede observar en la figura 2.16 y en la ecuación 2.12, el balance de las fuerzas resultante sobre la partícula indicara si los sólidos que se encuentren en el agua pueden separarse mediante sedimentación o mediante flotación. Sin embargo, los dos parámetros que afectan a esta condición son la masa de la partícula y la densidad de la partícula. En otras palabras, si se tienen partículas finas y menos densas que la densidad del agua, la separación se podrá realizar por medio de flotación; en caso contrario, el proceso de separación se llevará a cabo por medio de sedimentación (Barrera, 2014, p.183).

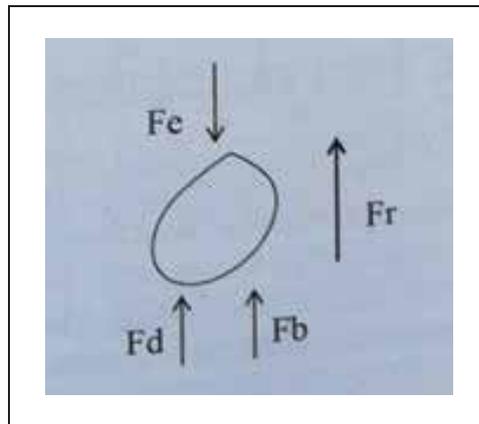


Figura 2.16. Representación esquemática de las fuerzas que actúan sobre una partícula en una solución acuosa. (Barrera, 2014, p. 183).

2.12.2. ELECTROFLOTACIÓN

La electroflotación es un proceso que utiliza aire para inducir la formación de pequeñas burbujas mediante la electrólisis del agua generando hidrógeno y oxígeno gaseosos. Este proceso puede ser alternado con la electrocoagulación para la remoción efectiva de las partículas floculadas.

En trabajos realizados, combinando estos procesos, se ha logrado una reducción de 14 mg/l de un agua residual con un contenido inicial de aceite de 280 mg/l. Petterson y Jia-Qian (citado por Arango, 2005, p. 54).

El proceso de electroflotación fue propuesto en 1904 por Elmore y su principal aplicación fue propiciar la flotación de minerales valiosos de los jales de las minas. Elmore (citado por Barrera, 2014, p. 184).

Se aprovecha la formación del gas para arrastrar hacia la superficie los contaminantes previamente acondicionados. Este procedimiento implica la inyección de iones metálicos para aglutinar los contaminantes dispersos en un agua sacrificando directamente a uno de los electrodos (Ánodo) complementado con el barrido por arrastre del gas generado (Castillo y Rivera, 2000, p. 6).

La electroflotación es un proceso complejo ya que el tamaño de las burbujas producidas por electroflotación viene principalmente influenciado por la superficie de los electrodos, dependiendo del material del electrodo y de su posición en la serie electromotriz (ver figura 2.17). También es función del pH: en medios ácidos las burbujas de hidrogeno son mayores que en pH neutros u alcalinos; mientras que las burbujas de oxígeno tienen su menor tamaño en un medio ácido y el tamaño aumenta cuando se incrementa el pH. Además, el tamaño de la burbuja en el desprendimiento de igual forma depende de la curvatura de la superficie en algunas geometrías de electrodos. Mansour et al. (Citado por Barrera, 2014, p.184).

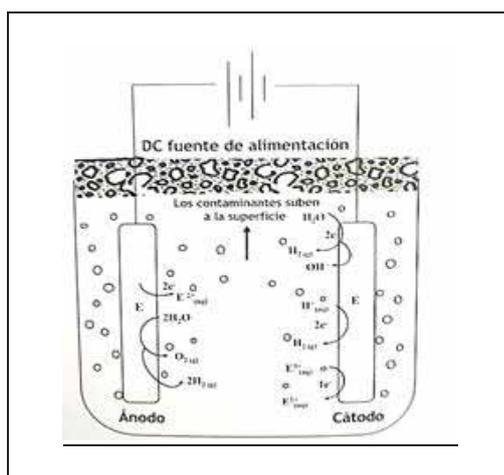
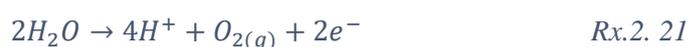


Figura 2.17. Representación esquemática de una celda electroquímica en donde se produce burbujas en los electrodos (Barrera, 2014, p.184)

2.12.3. REACCIONES ELECTRÓDICAS PARA LA FORMACIÓN DE BURBUJAS

Los electrodos empleados para la electroflotación son materiales inertes, como el platino, el grafito, el titanio o el acero al carbón. Los cuales se pueden utilizar como ánodo o cátodo, indistintamente, dependiendo de su aplicación en cada caso. Generalmente la electroflotación se produce cuando hay una electrólisis del agua, y como resultados se producen pequeñas burbujas de oxígeno e hidrógeno a través de las reacciones (2.21), (2.22) y (2.23):

Ánodo



Cátodo

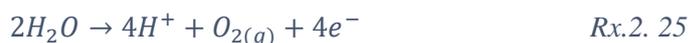


Global



Sin embargo, el proceso de electroflotación también puede ocurrir simultáneamente con el proceso de electrocoagulación, ya que ocurren las reacciones 2.24 – 2.27 cuando se emplean ánodos de sacrificio como el hierro y el aluminio:

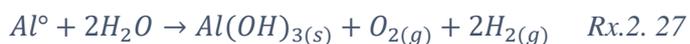
Ánodo



Cátodo



Global



Los iones aluminio que se generan se hidrolizan para formar hidróxidos y polihidróxidos dependiendo del pH de la solución acuosa. Los hidróxidos de aluminio o hierro que se forman en solución tienen una gran capacidad para remover contaminantes de tamaño coloidal. Adicionalmente, las burbujas de gas que se forman debido a la electrolisis provocan la flotación de los contaminantes y es por ello que, en muchas ocasiones, los fenómenos de electrocoagulación, electrofloculación y electroflotación se lleven a cabo de manera simultánea. Chih Ta Wang (citado por Barrera, 2014, p.185-186).

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

La investigación para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira por electrocoagulación, se realizó en el laboratorio de Ingeniería de Contaminación Ambiental, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Escuela Profesional de Ingeniería Química. Los análisis de los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (TSS) (Ver imágenes en el apéndice A.2.), se realizaron en el laboratorio particular MCQUIMICALAB. (Anexo E).

Los experimentos se realizaron con el lixiviado antiguo y nuevo por la diferencia de concentraciones iniciales de la DBO₅, DQO y TSS, (según el Informe de monitoreo de laboratorio AGQ Labs & Techonological Services (Anexo D.3.)), sin ninguna modificación previa, es decir, manteniendo intactas la concentración inicial, el pH y la conductividad. Ver Apéndice B.1 a B.9.

3.1. TOMA DE MUESTRA

Se hizo el muestreo del lixiviado nuevo y antiguo en los pozos N°1 Y N° 2 respectivamente, generados en el relleno sanitario de Jaquira, que se encuentra ubicado en la comunidad campesina de Jaquira, distrito de Santiago y provincia del Cusco. (Ver imágenes en el apéndice A.1.1).

3.2. MUESTRA

Se realizó la toma de muestra compuesta. Esta técnica es el resultado de la mezcla homogenizada de varias muestras simples colectadas durante un periodo determinado según proporciones concretas, pueden ser de volumen fijo o volumen proporcional, dependiendo del intervalo de muestreo y el volumen de cada muestra simple que la conforma (ANA, 2016, p. 29). Se tomó muestras compuestas cualificada en los pozos N° 1 y N° 2 (lixiviado nuevo y antiguo) siguiendo las instrucciones del protocolo de monitoreo ambiental de efluentes líquidos (APHA, 2005) ANEXO A.

La técnica cualificada (es un tipo de muestra compuesta) que consiste en 5 muestras simples mezcladas y tomadas en por lo menos 8 minutos; así cada muestra se tomó en un intervalo de 2 minutos, siendo 5 litros cada muestra, tomadas en 10 minutos. Para hacer esta muestra se utilizó un muestreador, un balde limpio y una jarra de medición.

Los pasos para realizar la toma de muestra fueron:

1. Se tomó las medidas de seguridad del personal (Uso de equipos de protección personal).
2. Se utilizó recipientes de botellas de plástico de 5 litros a más, ya que el volumen de muestra requerido es 2 litros para análisis químico simple.
3. Se etiqueto los frascos antes del muestreo.
4. Se enjuago el recipiente por lo menos, tres veces con el lixiviado a muestrear.
5. Se caracterizó en el lugar de muestreo el parámetro fisico-químicos (pH), conductividad y temperatura en el momento del muestreo.
6. Se conservó las muestras en frio (refrigeración a 4°C). (APHA, 2005).

3.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LA MUESTRA

Se realizó la caracterización de las muestras de lixiviado antiguo y nuevo como muestra la tabla 3.1., para cada parámetro se utilizó un método para la determinación del pH, temperatura, conductividad, turbiedad, sólidos suspendidos totales (TSS), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) como se muestra en el ANEXO B.

Parámetros Físicoquímicos	Lixiviado Crudo antiguo	Lixiviado Crudo nuevo
pH		
Temperatura (°C)		
Conductividad (µS/cm)		
Turbiedad (NTU)		
TSS (mg/l)		
DQO (mg/l)		
DBO ₅ (mg/l)		

Tabla 3.1. Caracterización de los parámetros fisicoquímicos. (Elaboración propia)

3.4. REACTIVOS, MATERIALES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS

3.4.1. REACTIVOS E INSUMOS

Para la determinación de DBO₅

- Sulfato de manganeso (MnSO₄).
- Yoduro de potasio álcali (KI).
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄).
- Solución indicadora de almidón al 1%.
- Tiosulfato de sodio (Na₂S₂O₃) 0.0375N.
- Agua destilada.
- Agua de manante.

Para la determinación de DQO

- Solución estándar de dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) 0.25N.
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄).
- Sulfato amoníaco ferroso 0.1N.
- Indicador de ferroína (C₃₆H₂₄FeN₆O₂).

3.4.2. MATERIALES

Para el proceso de electrocoagulación.

- Electrodo de Aluminio de 12x10 x 0.15 cm³.
- Electrodo de Acero Inoxidable de 12x10 x 0.1 cm³.
- Cuba electrolítica en acrílico con capacidad de 2.5 Litros.

Para determinar los TSS

- Filtro de fibra de vidrio de 1μ*47mm (MERCK).

3.4.3. EQUIPOS E INSTRUMENTOS

- Fuente de poder (modelo Netzgerät. Univ, marca PHYWE).
- Multímetro (modelo DF: 3306624, marca Gold Power).
- Cronómetro (modelo TIMER P-911-3, marca CIMATEC S.A.C.).
- Potenciómetro (modelo pH meter SG2, marca SevenGo).
- Termómetro (modelo PT-1, marca Boego Germany).
- Balanza analítica (modelo PIONEER PA224, marca OHAUS).
- Conductímetro o Conductómetro (modelo Logger multiLog Pro USB(12b), marca MultiLogPRO).
- Estufa (modelo MEMMERT, marca CIMATEC S.A.C.).

- Equipo de Reflujo que consiste de frascos de 50 ml o 250 ml con cuello esmerilado.
- Cocinilla de superficie de calentamiento o equivalente para asegurar una ebullición adecuada en el frasco de reflujo.
- Desecador (modelo GL36, marca SIMAX).
- Vernier (modelo CALLIPERS, marca U.S.A. CHALIMEX).
- Pipeta de 10 ml.
- Pizeta de 500ml.
- Gradillas.
- Tubos de ensayos de 20 ml.
- Bombilla.
- Compresor (modelo KAILI GERMANY TEC, Min air compressor 90L/min).
- Probetas de 50 y 10 ml.
- Frascos de muestreo de incubación de 250 ml.
- Equipo de incubación.
- Bureta de 100 ml.

3.5. PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

El proceso de electrocoagulación se realizó en cuatro etapas, que consistió:

ETAPA 1. **Muestreo de lixiviado:** en esta etapa se realizó la toma de muestra compuesta cualificada para los pozos N° 1 y N° 2, caracterizándose inmediatamente los parámetros de temperatura, pH y conductividad.

ETAPA 2. **Caracterización de los parámetros del efluente:** en esta etapa se caracterizó la turbiedad, sólidos suspendidos totales (TSS), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de los afluentes del lixiviado del pozo N° 1 y N° 2.

ETAPA 3. **Electrocoagulación:** en esta etapa se realiza el proceso de electrocoagulación para el afluente, obteniendo un efluente tratado, durante esta etapa se obtienen muestras cada intervalo de tiempo.

ETAPA 4. **Caracterización de los parámetros del afluente:** En esta última etapa se caracterizó todos los parámetros mencionados en la tabla 3.1.

Para el proceso de electrocoagulación (figura 3.1) se realizaron las siguientes etapas:

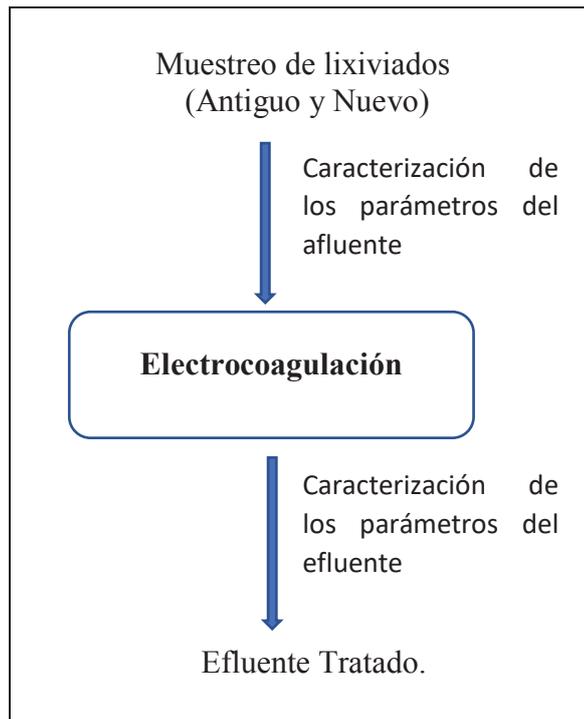


Figura 3.1. Diagrama de Bloques para el proceso de electrocoagulación (Elaboración propia)

3.6. SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

En la Imagen 3.1 se muestra el sistema de electrocoagulación para un reactor batch monopolar en paralelo.



Imagen 3.1 Sistema de electrocoagulación.

El armado del sistema del proceso de electrocoagulación se realizó de acuerdo al tipo de conexión eléctrica, la configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que

la monopolar. (Barrera, 2014, p.34-35); (Piña et al., 2011, p. 264); Mollah (según Aguilar, 2015, p. 27-28). El diseño formado por un par de electrodos (bipolar) no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una adecuada disolución de los iones metálicos se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utiliza celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie. Mollah et al. (según Arango, 2005, p. 51); Jiang y Mollah (según Restrepo et al., 2006, p. 68). Mencionado en el capítulo 2.7.3.

Se realizó la disposición monopolar en paralelo para que la corriente eléctrica se reparta entre todos los electros en relación a la resistencia de las células individuales. Mollah (según Aguilar, 2015, p.26).

En el trabajo realizado por (Hadj et al., 2010, p. 269) se estudiaron dos modos de conexiones monopolar y bipolar para la elección de la mejor alternativa para intensificar el rendimiento del proceso. Se observa una comparación en términos de reducción de la DQO y la intensidad de color utilizando la misma densidad de corriente (12 mA /cm^2), los resultados con mayor eficiencia de remoción son para la **conexión monopolar** con respecto al bipolar.

Como se ha observado por otros investigadores Shuang Song et al. (según Hadj et al., 2010, p. 269) para la conexión monopolar, el voltaje aplicado es el mismo en la celda electrolítica, pero para el modo bipolar las resistencias inducen un alto voltaje en los electrodos.

La selección de reactor tipo batch depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar (según lo recomendado por Restrepo, 2006, p. 68).

Las concentraciones cambian conforme transcurre la reacción y el desempeño del sistema está relacionado con el tiempo de reacción (Barrera, 2014, p.175); (Restrepo, 2006, p. 68).

En los reactores en batch el burbujeo que se produce in situ en los electrodos contribuye a mejorar el proceso (Barrera, 2014, p.175-176).

3.7. ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

El sistema (Figura 3.2) opero como reactor batch con electrodos monopolares en paralelo a escala de laboratorio, con capacidad para tratar 2 litros de lixiviado.

La cuba electrolítica se construyó de material acrílico transparente para un volumen de 2.5 litros y un soporte para las distancias entre electrodos (placas de aluminio y acero). Se

acondiciono los cables para la conexión monopolar en paralelo, conectado a la fuente de poder y a los electrodos, en el orden ánodo – cátodo, donde se utilizaron dos electrodos de aluminio y dos electrodos de acero inoxidable.

Así mismo se acondiciono un multímetro para la lectura del voltaje. La fuente de poder tiene un rango de intensidad de corriente de 0 a 5 amperios(A) y voltaje de 0 a 18.5 voltios (v).

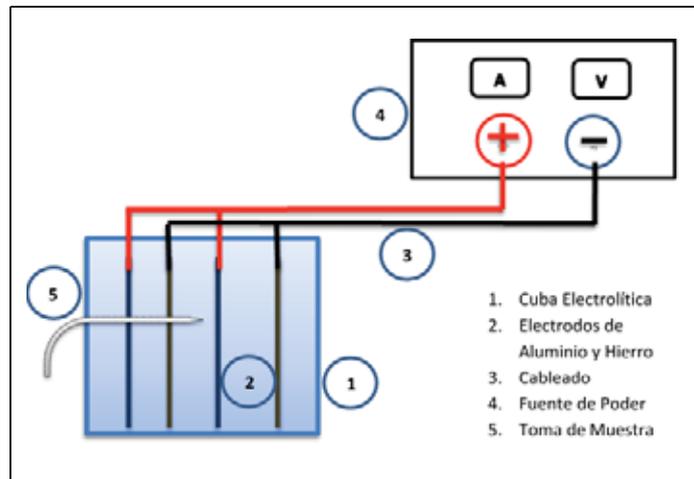


Figura 3.2. Diagrama del equipo de Electrocoagulación. (Elaboración propia).

3.8. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN:

- La preparación de los electrodos: se realizó antes de cada experimentación, puliéndose con papel lija para deshacerse de cualquier película de óxido y luego se enjuagó bien.
- Se procedió a colocar los soportes de electrodos a la distancia requerida entre electrodos en la cuba electrolítica, posteriormente se colocó los electrodos en el orden ánodo - cátodo.
- Se acondicionó los cables de positivo y negativo a la fuente de poder para conectar a los electrodos.
- Se procedió a llenar la cuba electrolítica con dos litros de lixiviado crudo seguidamente se arrancó la fuente de poder regulando la intensidad requerida y se encendió el multímetro para la lectura del voltaje a la intensidad requerida.
- Se tomaron 10 ml de muestras periódicamente desde el reactor, a intervalos de tiempo predeterminados, las muestras se tomaron con una pipeta y una bombilla de succión, al medio de la segunda celda (ánodo - cátodo).

- Las muestras tomadas inmediatamente se procedieron a depositar en los frascos para el análisis de la DBO₅, DQO Y TSS. Los resultados de la DQO y TSS se obtuvieron el mismo día, mientras que para la DBO₅ los resultados se obtuvieron después de 5 días de incubación.
- Para los parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura y conductividad se analizaron a los lixiviados antes y después del tratamiento. (Ver Apéndice A.1.2.).

3.9. PARÁMETROS Y VARIABLES DE OPERACIÓN

Para la reducción de la materia orgánica (objeto de estudio) en los lixiviados, se trabajó con los siguientes parámetros y variables de operación:

Parámetros de operación en el proceso de electrocoagulación:

- Temperatura: ambiente.
- Volumen de lixiviado: 2 litros.
- Electrodo: 2 placas de ánodos (aluminio) y 2 placas de cátodo (acero inoxidable).
- Tipo de conexiones utilizadas: corriente continua.

Variables independientes:

- Densidad de corriente (mA/cm²).
- Distancia entre los electrodos (cm).

Variable dependiente:

- Porcentaje de remoción (DBO₅, DQO y TSS).

En la tabla 3.2 se tomó como referencia valores mínimos y máximos de las distancias entre electrodos (cm) y densidades de corriente (mA/cm²), teniendo en cuenta el tipo de contaminante y las condiciones de operación de electrocoagulación encontrados en la literatura (Piña et al, 2011, p.260-263), (Ver anexo D, tabla D1).

Tabla 3.2. Valores mínimos y máximos de las variables independientes. (Elaboración propia)

Variables Independientes	Valores	Valores	Puntos
Densidad de corriente (mA/cm ²)	1	10	5.5
Distancia entre electrodos. (cm)	0.5	2	1.25

3.10. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales se desarrollaron en 2 etapas: Pruebas preliminares y pruebas finales.

3.10.1. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES

Con el diseño preliminar se determinó el tiempo de remoción, para los parámetros de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (TSS) y demanda química de oxígeno (DQO), para las cuales se tomó intervalos de tiempo de 15, 30, 60, 90 y 120 minutos, por antecedentes (ver anexo D, tabla D2). Así mismo se determinó el lixiviado con mayor remoción de parámetros (DBO₅, DQO y TSS) para esta tecnología y realizar pruebas finales.

Se aplicó el diseño factorial centrado, 2^k (k: número de variables) con punto central (figura 3.3), para los lixiviados antiguo y nuevos. (Ayala y Pardo, 1995, p. 59.).

Los niveles para las variables consideradas en escala codificada y natural se muestran en la tabla 3.3, para el diseño factorial.

Tabla 3.3. Niveles de variables codificadas (Ayala y Pardo, 1995, p.162).

N°	Escala Codificada		Y (obs)
	X1	X2	
1	-1	-1	
2	1	-1	
3	-1	1	
4	1	1	
5	0	0	

Dónde:

X1: Densidad de corriente (mA/cm²).

X2: Distancia entre electrodos. (cm).

Utilizando la tabla 3.3, se elaboró la matriz de diseño a escala codificada y a escala natural para el diseño factorial (ver tabla 3.4).

Tabla 3.4. Matriz de diseño a escala codificada y natural. (Elaboración propia)

N°	Escala Codificada		Escala Natural		Y (obs)
	X1	X2	Distancia entre electrodo (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	
1	-1	-1	0.5	1	
2	1	-1	2	1	
3	-1	1	0.5	10	
4	1	1	2	10	
5	0	0	1.25	5.5	

3.10.2. DISEÑO DE EXPERIMENTAL FINAL

Para el diseño experimental final se aplicó el diseño factorial 2^k con cinco réplicas en el punto central del diseño (figura 3.3) (Ayala y Pardo, 1995, p. 80), con las mismas variables de la tabla 3.3., para el lixiviado con mayor remoción de parámetros (DBO₅, DQO Y TSS) que se obtuvieron en los ensayos preliminares. Así mismo se realizó el análisis de desviación estándar y t student para la cinco replicas.

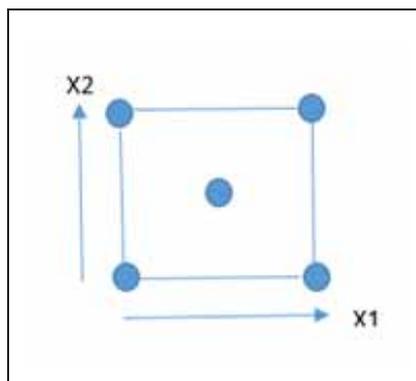


Figura 3.3. Representación de un diseño factorial 2^k para $k=2$ con réplica en el punto central del diseño. (Ayala y Pardo, 1995, p. 81)

Los niveles para las variables consideradas en escala codificada se muestran en la tabla 3.5:

Tabla 3.5. Niveles de variables codificadas (Ayala y Pardo, 1995, p.80).

N°	Escala Codificada		Y (obs)
	X1	X2	
1	-1	-1	
2	1	-1	
3	-1	1	
4	1	1	
5	0	0	
6	0	0	
7	0	0	
8	0	0	
9	0	0	

Se muestra la matriz del diseño a escala codificada y a escala natural para el diseño factorial simple, tabla 3.6.

Tabla 3.6 Matriz de diseño a escala codificada y natural (elaboración propia)

N°	Escala Codificada		Escala Natural		Y (obs)
	X1	X2	Distancia entre electrodo (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	
1	-1	-1	0.5	1	
2	1	-1	2	1	
3	-1	1	0.5	10	
4	1	1	2	10	
5	0	0	1.25	5.5	
6	0	0	1.25	5.5	
7	0	0	1.25	5.5	
8	0	0	1.25	5.5	
9	0	0	1.25	5.5	

Dónde:

X1: Densidad de corriente (mA/cm²).

X2: Distancia entre electrodos. (cm).

3.11. GRÁFICOS DE SUPERFICIES PARA LA DBO₅, DQO Y TSS

Se realizó gráficos de superficie para la DBO₅ y TSS para un tiempo de 30 minutos, DQO para 120 minutos, para el diseño preliminar y final mediante el programa Minitab v.17, 1991-2004.

3.12. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO). COMPORTAMIENTO DE LA REMOCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).

Si el orden que asumimos es correcto, la gráfica apropiada (determinada a partir de la Integración) de los datos de concentración-tiempo debería ser lineal (Fogler H., 2008, p.267). Para la determinación del orden de reacción se realizó con el ajuste de curva.

Se realizaron corridas para órdenes de reacción 2, 1 y cero (ver Apéndice B.10. Y B.11.)

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE LIXIVIADOS

Se realizó la caracterización de las muestras de lixiviados crudos antiguo y nuevo donde se muestra el rango de mínimos y máximos en la tabla 4.1.

*Tabla 4.1. Caracterización de los parámetros fisicoquímico del relleno sanitario de Jaquira.
(Elaboración propia)*

Parámetros Fisicoquímicos	Lixiviado Crudo Antigo	Lixiviado Crudo Nuevo
pH	7.3-7.7	7.9-8.02
Temperatura (°C)	17.9-21.2	17.7-21.90
Conductividad (µS/cm)	27220-30220	29960-30428
Turbiedad (NTU)	>1000	>1000
TSS (mg/l)	2420-4520	1160-1850
DQO (mg/l)	3920-5070	7680-9680
DBO ₅ (mg/l)	1850-3108	3256-3848
DBO ₅ /DQO	0.47-0.61	0.42-0.40

En la tabla 4.1 la relación de DBO₅/DQO del lixiviado crudo antiguo varia de 0.47 a 0.61 y para el lixiviado crudo nuevo la DBO₅/DQO varia de 0.40 a 0.42, estos parámetros son posibles comparar con la tabla 4.2 por laboratorio AGQ Labs & Technological Services (Municipalidad Provincial del Cusco, 2017) para el lixiviado antiguo la DBO₅/DQO = 0.46. Según Ozzane (recomendado por Chevarria y Loayza, 2011, p. 10) y (Ávila y Silva, 2010, p.44) mencionado en el capítulo 2.3.2.1 y 2.3.2.3 la relación de la materia orgánica biodegradable para el lixiviado antiguo DBO₅/DQO = 0.1 y para el lixiviado nuevo DBO₅/DQO = 0.3.

En la tabla 2.1 se menciona las características de pH, las concentraciones de DBO₅ y DQO para los lixiviados nuevo y antiguo (según Giraldo, 1997, p.47), las cuales guarda una relación al comparar las concentraciones de DBO₅ y DQO, muy alto para el lixiviado nuevo y

bajo para el lixiviado antiguo con las tablas 4.1 y 4.2. En caso del pH muy bajo para el lixiviado nuevo y bajo para el lixiviado antiguo guarda una relación donde el pH es alrededor de 6.5 para el lixiviado nuevo y 8 para el lixiviado antiguo, Ozzane (según Chavarría y Loayza, 2011, p. 10); mientras que para la tabla 4.1 y 4.2 los valores de pH son muy bajo para el lixiviado antiguo y bajo para el lixiviado nuevo.

La tabla 4.2 muestra un resumen del informe de ensayo de la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del relleno sanitario de Jaquira realizado por el laboratorio AGQ Labs & Technological Services, realizado en el mes de enero del 2018, (ver anexo D3). (Municipalidad Provincial del Cusco, 2017).

Tabla 4.2 Caracterización de los parámetros fisicoquímicos del relleno sanitario de Jaquira por laboratorio AGQ Labs & Technological Services (Municipalidad Provincial del Cusco, 2017).

Parámetros Fisicoquímicos	Lixiviado Crudo antiguo	Lixiviado Crudo nuevo
pH	6.52	6.84
Temperatura (°C)	25	25
Conductividad (µS/cm)	17540	27300
Turbiedad (NTU)	>1000	>1000
TSS (mg/l)	530	790
DQO (mg/l)	4841	>5000
DBO ₅ (mg/l)	2250	>10000
DBO ₅ /DQO	0.46	-

4.2. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES PARA LOS LIXIVIADOS ANTIGUO Y NUEVO.

Los resultados se analizaron en función a la reducción de concentraciones y obteniendo el porcentaje de remoción de DBO₅, DQO y TSS como la variable de respuesta en función al tiempo con intervalos de tiempo de residencia de 15, 30, 60, 90 y 120 minutos. Cada corrida se realizó en diferentes fechas por el tiempo de tratamiento y análisis de DBO₅, DQO y TSS (Apéndice B.3 y B.4).

Los mejores resultado para el lixiviado antiguo se dieron apartir de 5.5mA/cm² a pH inicial de 7.4, temperaturas iniciales que varían de 18.6 a 21.2°C y conductividad inicial de 28840 a 29260 μ s/cm (ver Tabla B3, Apendice B3), y para el lixiviado nuevo se dieron apartir de 5.5mA/cm² a pH inicial de 7.9 a 8, temperaturas iniciales que varían de 19.0a 21.9°C y conductividad inicial de 29960 a 3014 μ s/cm (ver Tabla B3, Apéndice B4).

4.2.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO

Se muestra en el gráfico 4.1, las 5 corridas para la concentración de la DBO₅ en función al tiempo. Ver tabla B1, Apéndice B.1, (valores para la gráfica 4.1).

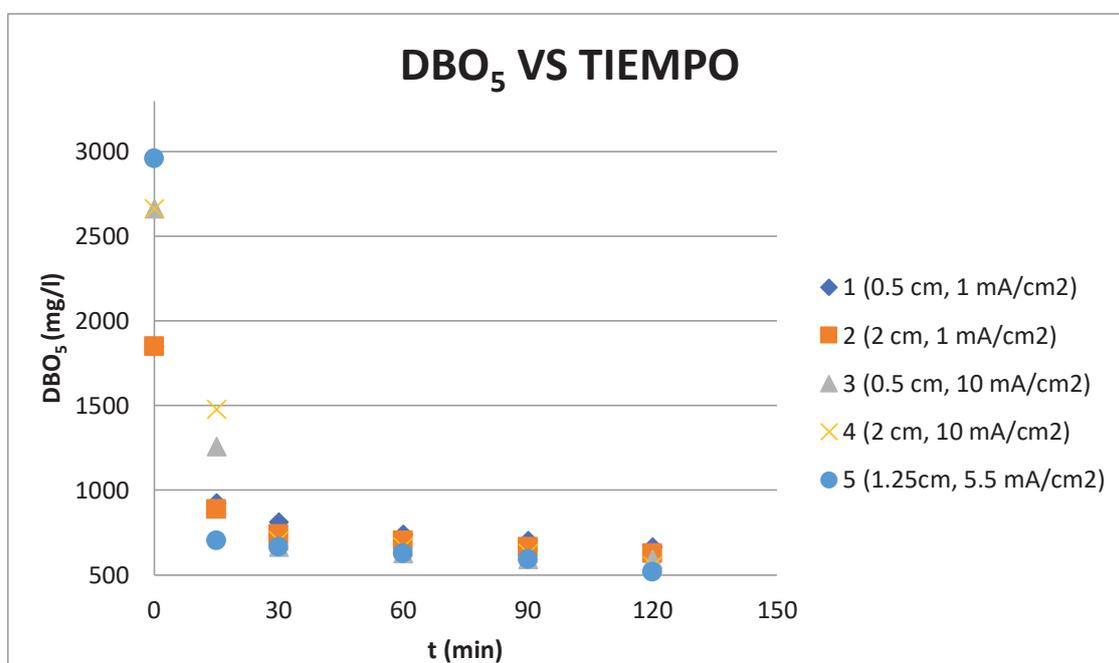


Gráfico 4.1 Efecto de la densidad de corriente y distancia entre electrodos en la reducción de la DBO₅.

Las concentraciones iniciales DBO₅ varían en el rango de 1850 a 2960 mg/l de oxígeno necesario para la biodegradación de la materia orgánica en 5 días a través de los microorganismos presentes del lixiviado, reduciendo a 814 y 666 mg/l, para 30 minutos, después de este tiempo no se tiene una significativa reducción de la concentración de DBO₅ (grafico 4.1). Así mismo puede deberse a que, durante los primeros 30 minutos, se da la disolución del ánodo y la formación de los respectivos hidróxidos y polihidróxidos que reaccionan con la materia orgánica.

La tabla 4.3 muestra los resultados obtenidos en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares para las concentraciones iniciales, concentración y porcentajes de remoción de DBO₅ para un tiempo de 30 minutos.

Tabla 4.3 Concentración y porcentaje de remoción para DBO₅ del lixiviado antiguo. Elaboración propia

N°	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial de la DBO ₅ (mg /l)	Concentración DBO ₅ (mg/l) a 30 min	% Remoción DBO ₅ a 30 min.
1	28/04/2018	0.5	1	1850	814	56.00
2	28/04/2018	2	1	1850	740	60.00
3	24/04/2018	0.5	10	2664	666	75.00
4	24/04/2018	2	10	2664	703	73.61
5	30/04/2018	1.25	5.5	2960	666	77.50

Se puede apreciar, que los mejores porcentajes de remociones de DBO₅ se dan a partir de 5.5 mA/cm² y una distancia variable; como se ve en la tabla 4.3 y en el grafico 4.2 para las corridas N°3, 4, y 5 obteniendo 75%, 73.61% y 77,50% respectivamente. Estos resultados pueden atribuirse al hecho de que, según la ley de Faraday la cantidad de masa disuelta en la solución electrolítica o depositada de uno de los electrodos es proporcional a la cantidad de electricidad (Q) que pasa por el electrolito. Burbano *et al.* (según Mendieta, 2013, p.3-4); Ramírez *et al.* (Según Cazco y Jarrin, 2010, p. 18).

Gráfico 4.2 de superficie, para porcentaje de remociones de la DBO₅ corrido en el programa (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos (valores de la tabla 4.3).

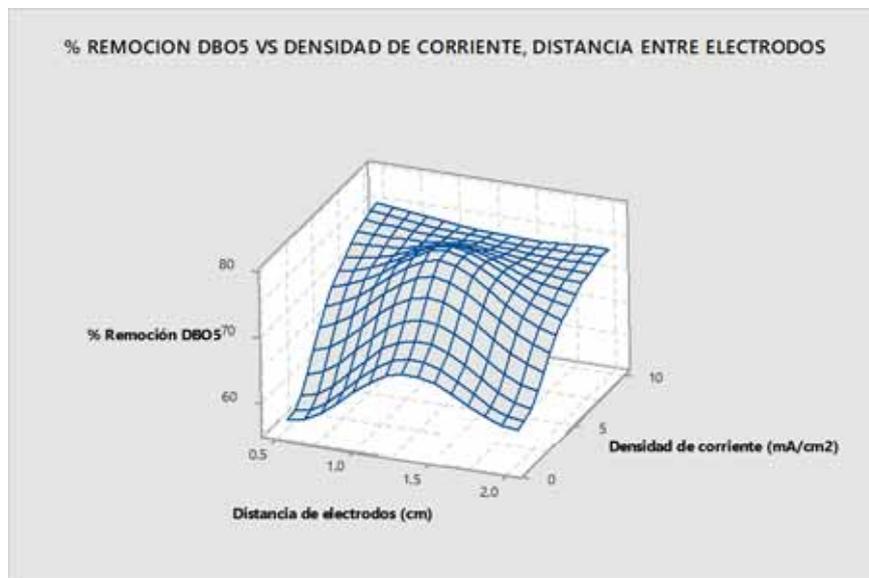


Gráfico 4.2 Superficie de porcentaje de remoción de la DBO₅

Los resultados obtenidos no cumplen con lo mencionado por Chen *et al.* (según Cazco y Jarrin, 2010, p. 33); Mlakootian e Yousefi (según Mendieta, 2013, p. 17), donde mencionan que la remoción de los contaminantes es mayor a distancias cortas de separación entre electrodos, ya que la distancia entre electrodos no tiene una diferencia significativa en los resultados para remociones mayores a 70%. (ver tabla 4.3, prueba N° 3, 4 y 5).

4.2.2. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS) PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO.

En el gráfico 4.3, se muestran las 5 corridas para la concentración de los TSS en función al tiempo hasta los 120 minutos. Ver tabla B1, Apéndice B.1 (valores para la gráfica 4.3).

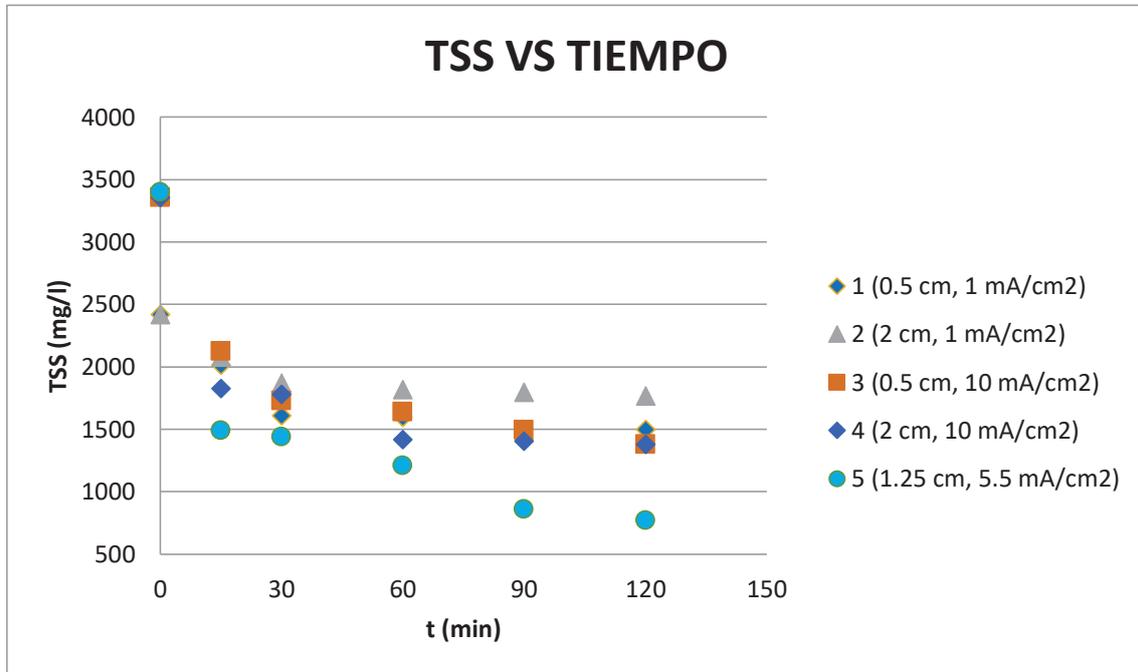


Gráfico 4.3 Efecto de la densidad de corriente y distancia entre electrodos en la reducción de los TSS.

Como se puede observar en el gráfico 4.3 las concentraciones iniciales de los TSS varían en el rango de 2420 a 3400 mg/l. En los primeros 30 minutos la velocidad de reacción es más rápida llegando a reducirse para todas las corridas a 1870 y 1440 mg/l y después de 30 minutos no se tiene una significativa reducción de la concentración de los TSS.

La tabla 4.4 muestra Los resultados obtenidos en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares para las concentraciones iniciales, concentración y porcentajes de remoción de TSS para un tiempo de 30 minutos.

Tabla 4.4 Concentración y porcentaje de remoción para los TSS del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

N°	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial de los TSS (mg/l)	Concentración a 30 min de los TSS (mg/l)	% Remoción TSS a 30 min.
1	28/04/2018	0.5	1	2420	1610	33.47
2	28/04/2018	2	1	2420	1870	22.73
3	24/04/2018	0.5	10	3360	1730	48.51
4	24/04/2018	2	10	3360	1780	47.02
5	30/04/2018	1.25	5.5	3400	1440	57.65

Se puede apreciar, que las mejores reducciones de concentración de TSS se dan a partir de 5.5 mA/cm² de densidad de corriente y una distancia variable; como se ve en la tabla 4.4 y en el grafico 4.4 para las corridas N° 3, 4 y 5 con remociones de 48.51%, 47.02% y 57.65% respectivamente.

Gráfico de superficie para porcentaje de remociones de los TSS corrido en el programa (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos (tabla 4.4)

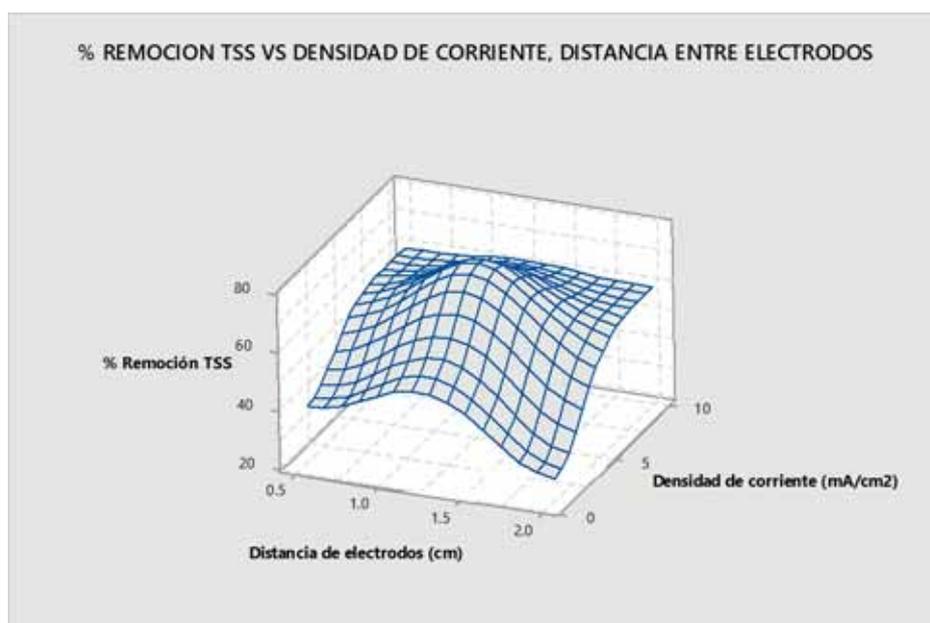


Grafico 4.4 Superficie de porcentaje de remoción de la TSS.

(Hariraj y Brijesh, 2016, p. 24,25), demostro que a mayor densidad de corriente la eficiencia de remoción de TSS es >76% de agua sintética (135mg/l concentración inicial), a una densidad de corriente de 5.3mA/cm² a pH 7, a 2cm de distancia entre electrodos y después de 30 minutos no se tiene una significativa remoción de los TSS al igual que los resultados del trabajo.

Al igual que (Hariraj y Brijesh, 2016, p. 6); Mollah, 2001; Mollah, 2004; Holt, 2005; Zumdahl, 2000 (segun Gilpavas, 2008, p. 31), las burbujas formadas por la electrocoagulación no son suficientes para una alta eficiencia de eliminación de sólidos en suspensión. La razón podría deberse a la superficie del electrodo, debido a la pasivación, tiene una superficie áspera, que proporciona mayores fuerzas de adherirse a las burbujas que a las superficies lisas, disminuyendo así su generación. A medida que transcurre el tiempo de reacción se acumulan burbujas de O₂ e H₂ en los electrodos, las cuales incrementan la resistencia de la solución.

4.2.3. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO.

Se muestra en la graficas 4.5 las 5 corridas para la concentración de la DQO en función al tiempo para 120 minutos. Ver tabla B1, Apéndice B.1. (Valores para la gráfica 4.5).

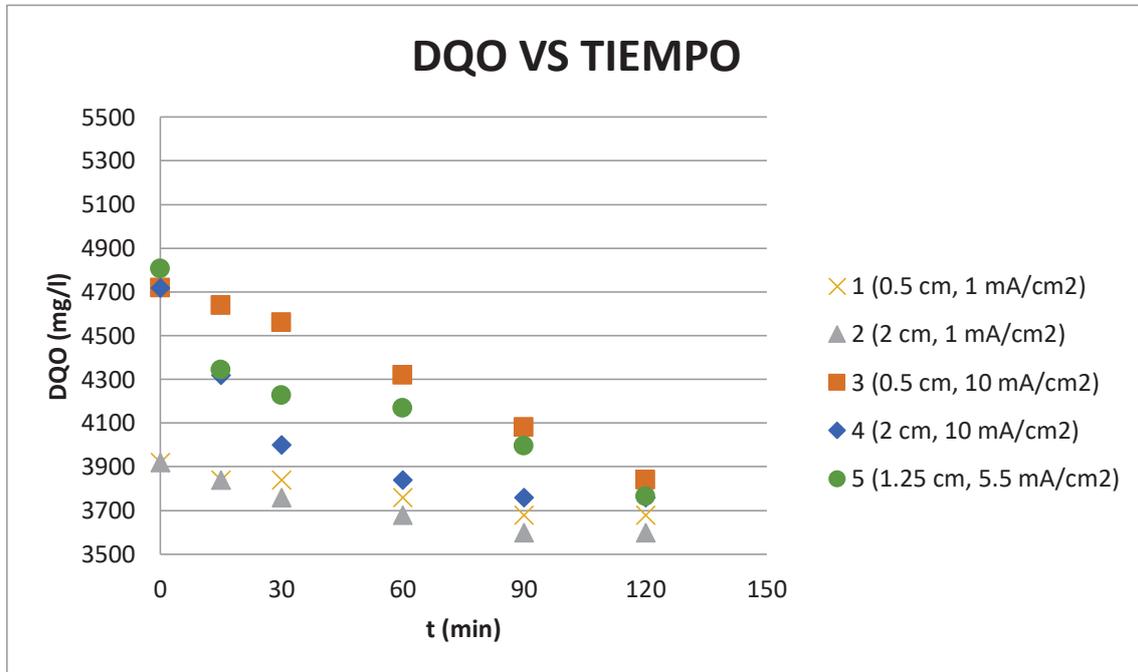


Grafico 4.5 Efecto de la densidad de corriente y distancia entre electrodos en la reducción de la DQO.

Como se observa en el grafico 4.5 la concentración de la DQO inicial varia en el rango de 3920 mg/l a 4808 mg/l de oxígeno necesario para que reaccione toda la materia presente del lixiviado, la reducción de concentración continúa bajando según el incremento del tiempo, es por esta razón que se hace el estudio hasta 120 minutos llegando a reducirse a 3600 y 3840mg/l.

En la tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares para las concentraciones iniciales, concentraciones y porcentajes de remoción de DQO para un tiempo de 120 minutos.

Tabla 4.5 Concentración y porcentaje de remoción para la DQO del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial de la DQO (mg/l)	Concentración a 120 min de la DQO (mg/l)	% Remoción DQO a 120 min.
1	28/04/2018	0.5	1	3920	3680	6.12
2	28/04/2018	2	1	3920	3600	8.16
3	24/04/2018	0.5	10	4720	3840	18.64
4	24/04/2018	2	10	4720	3760	20.34
5	30/04/2018	1.25	5.5	4808	3764	21.71

Se puede apreciar, que las mejores remociones de DQO se dan a partir de 5.5 mA/cm² y una distancia entre electrodos variable, como se ve en la tabla 4.5 y en el grafico 4.6, para las pruebas N°3, 4 y 5 con remociones de 18.64%, 20.34% y 21.71% respectivamente.

Gráfico de superficie para porcentaje de remociones de la DQO corrido en el programa (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 120 minutos (tabla 4.5).

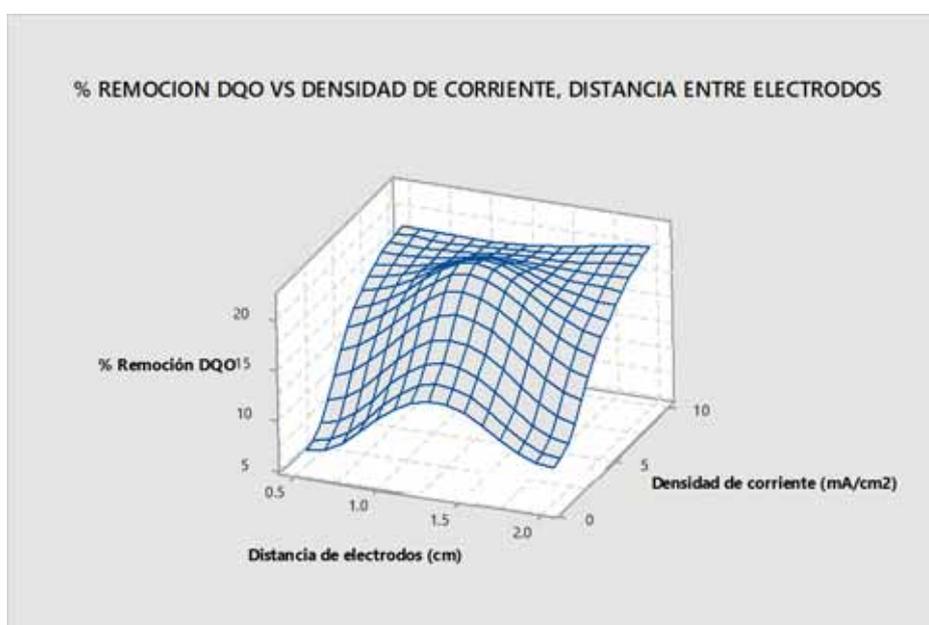


Grafico 4.6 Superficie de porcentaje de remoción de la DQO.

Los resultados obtenidos por este método no son eficientes para la remoción de la DQO por estar en función al tiempo. Las corridas N°1 y 2 presentan remociones muy bajas menores a

9% de DQO para una densidad de corriente de $1\text{mA}/\text{cm}^2$, estos resultados pueden atribuirse al hecho de que la calidad del agua tratada depende de la cantidad de iones producidos (mg) o de la carga, así como del producto de la corriente y del tiempo (Ah) suministrados al sistema según (Barrera, 2014, p.172).

El porcentaje de remoción de DQO para 120 minutos fue de 20.34% para una concentración inicial de $4720\text{mg}/\text{l}$, 2cm distancia entre electrodos, densidad de corriente de $10\text{mA}/\text{cm}^2$, a pH 8, mientras que en el trabajo realizado por (Hadj et al., 2010, p 268, 270). se tiene una remoción de 90% de DQO para un pH inicial de 8 a $16\text{mA}/\text{cm}^2$, para una concentración inicial de $8200\text{mg}/\text{l}$.

4.2.4. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) PARA EL LIXIVIADO NUEVO

En el gráfico 4.7 se muestra las 5 corridas para la concentración de la DBO₅ en función al tiempo respectivamente para el lixiviado nuevo para tiempo de 120 minutos. Ver tabla B2, Apéndice B.2. (Valores para la gráfica 4.7).

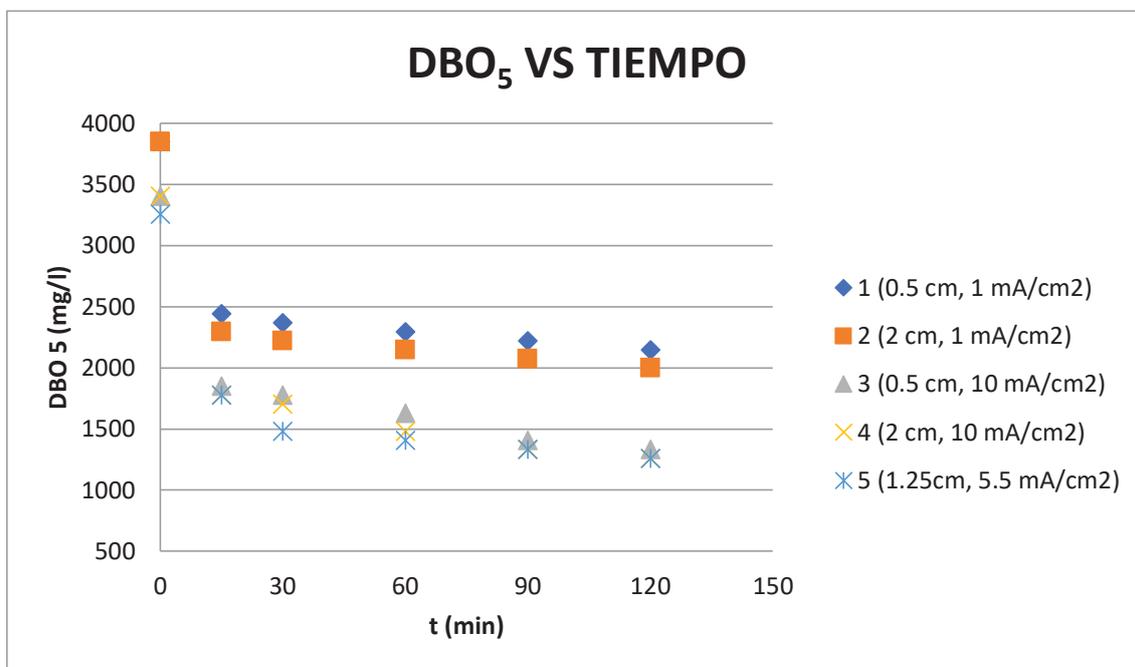


Gráfico 4.7 Efecto de la densidad de corriente y distancia entre electrodos en la reducción de la DBO₅
(Elaboración propia)

Las concentraciones iniciales DBO₅ varían en el rango de 3256 a 3848 mg/l, como se observa en el gráfico 4.7, en los primeros 30 minutos la velocidad de reacción es más rápida llegando a reducirse 1480 y 2368 mg/l y después de 30 minutos no se tiene una significativa reducción de la concentración de DBO₅ al igual que en el lixiviado antiguo.

En la tabla 4.6 muestra Los resultados obtenidos en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares para lixiviado nuevo con concentraciones iniciales, concentración y porcentajes de remoción de DBO₅ para un tiempo de 30 minutos.

Tabla 4.6 Concentración y porcentaje de remoción para DBO₅ del lixiviado nuevo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial de la DBO ₅ (mg/l)	Concentración a 30 min de la DBO ₅ (mg/l)	% Remoción DBO ₅ a 30 min.
1	07/05/2018	0.5	1	3848	2368	38.46
2	07/05/2018	2	1	3848	2220	42.31
3	05/05/2018	0.5	10	3404	1776	47.83
4	05/05/2018	2	10	3404	1702	50.00
5	09/05/2018	1.25	5.5	3256	1480	54.55

Se puede apreciar, que las mejores reducciones de concentración de DBO₅ se dan a partir de 5.5 mA/cm² y una distancia variable; como se ve en la tabla 4.6 y grafico 4.8 para las corridas N° 3, 4 y 5 con remociones de 47.83%, 50.0% y 54.55% respectivamente. La densidad de corriente es el más influyente en este tipo de tecnología como ya se mencionó en el lixiviado antiguo. Sin embargo, las remociones del lixiviado nuevo son más bajas que el lixiviado antiguo, esto podría deberse a que las concentraciones iniciales son más altas para el lixiviado nuevo.

Gráfico de superficie para porcentaje de remociones de la DBO₅ corrido en el programa (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos (tabla 4.6)

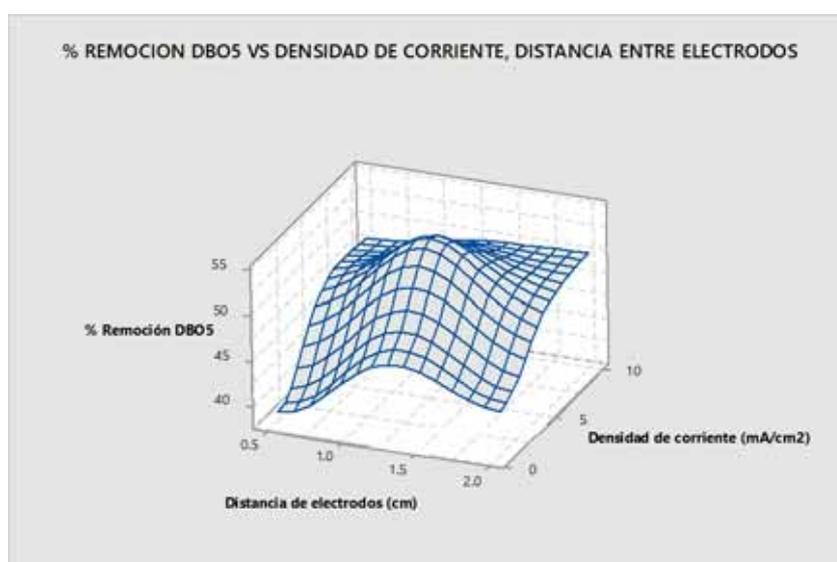


Grafico 4.8 Superficie de porcentaje de remoción de la DBO₅ (Elaboración propia)

4.2.5. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS) PARA EL LIXIVIADO NUEVO.

En el grafico 4.9, se muestran las 5 corridas para la concentración de los TSS en función al tiempo del lixiviado nuevo para un tiempo de 120 minutos. Ver tabla B2, Apéndice B.2 (valores para la gráfica 4.9)

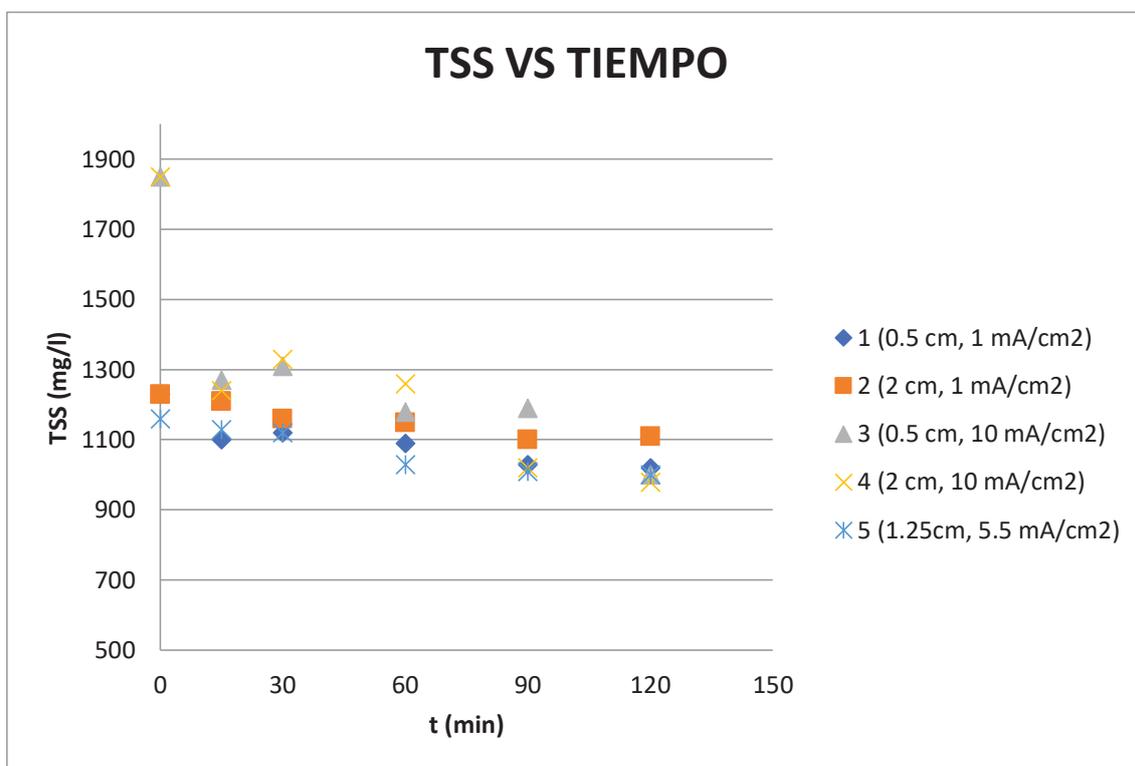


Grafico 4.9 Efecto de la densidad de corriente y distancia entre electrodos en la reducción de los TSS.
(Elaboración propia)

Como se puede observar en el grafico 4.9 las concentraciones iniciales de los TSS varían en el rango de 1160 a 1850 mg/l, en los primeros 30 minutos la velocidad de reacción es más rápida llegando a reducirse a 1120 y 1330 mg/l, y después de 30 minutos no tiene una reducción significativa de la concentración de los TSS al igual que el lixiviado antiguo.

En la tabla 4.7 muestra Los resultados obtenidos en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares para las concentraciones iniciales, concentración y porcentajes de remoción de TSS para un tiempo de 30 minutos.

Tabla 4.7 Concentración y porcentaje de remoción para los TSS del lixiviado nuevo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial de los TSS (mg/l)	Concentración a 30 min de los TSS (mg/l)	% Remoción TSS a 30 min.
1	07/05/2018	0.5	1	1230	1120	8.94
2	07/05/2018	2	1	1230	1220	5.69
3	05/05/2018	0.5	10	1850	1310	29.19
4	05/05/2018	2	10	1850	1330	28.11
5	09/05/2018	1.25	5.5	1160	1120	3.45

En los resultados para las corridas N° 3 y 4 se tiene remociones de 29.19% y 28.11% de TSS respectivamente como se observa en la tabla 4.7 y gráfico 4.10, con densidad de corriente de 10 mA/cm² con distancias variables de 0.5 y 2 cm para 30 minutos, a comparación con los resultados del lixiviado antiguo se obtuvo remociones de TSS mayores a 5.5mA/cm² que el lixiviado nuevo, esto podría atribuirse a que las concentraciones del lixiviado nuevo son más bajos.

Gráfico de superficie para porcentaje de remociones de los TSS corrido en el programa (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos.

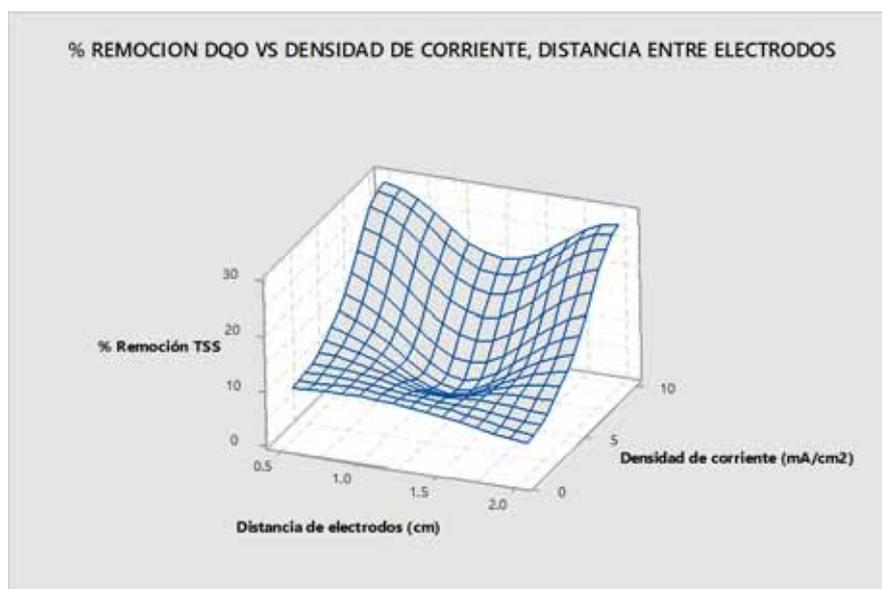


Gráfico 4.10 Superficie de porcentaje de remoción de los TSS. (Elaboración propia)

4.2.6. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA EL LIXIVIADO NUEVO.

Se muestra en la graficas 4.11 las 5 corridas para la concentración de la DQO en función al tiempo para el lixiviado nuevo para un tiempo de 120 minutos. Ver tabla B2, Apéndice B.2 (valores para la gráfica 4.11).

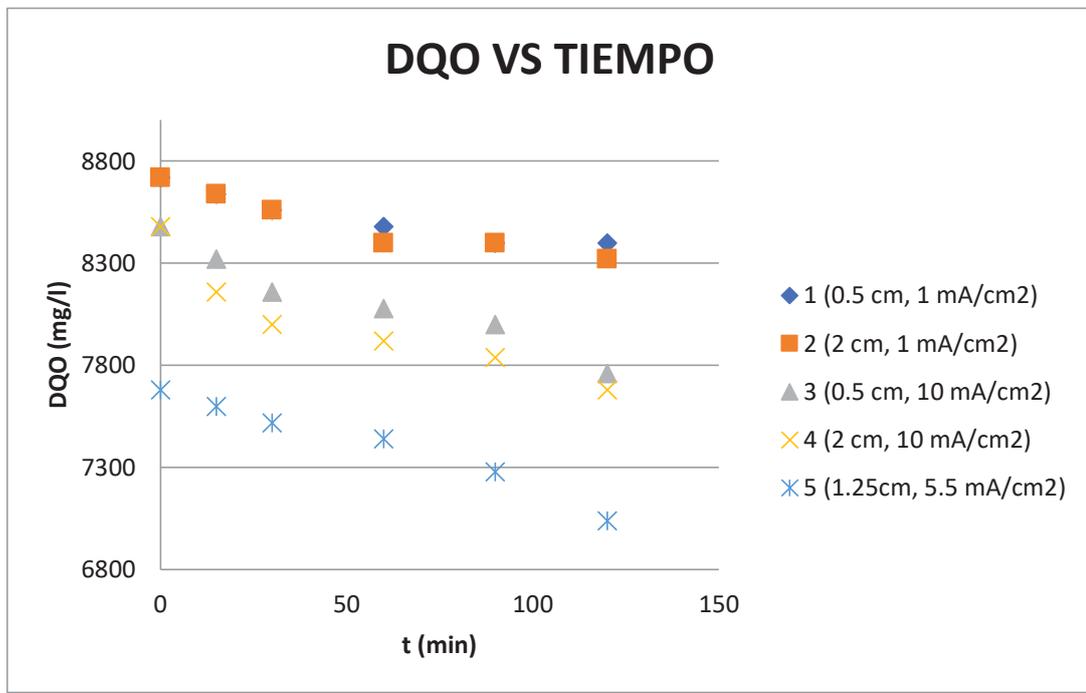


Gráfico 4.11 Efecto de la densidad de corriente y distancia entre electrodos en la reducción de la DQO.
(Elaboración propia)

Como se observa en el gráfico 4.11 la reducción de la concentración de la DQO inicial que está en el rango de 7680mg/l a 8720 mg/l, continúa bajando según el incremento del tiempo, es por esta razón que se muestra y se hace el estudio para el tiempo de 120 minutos al igual que el lixiviado nuevo.

En la tabla 4.8 muestra los resultados obtenidos en el diseño de experimentos de los ensayos preliminares para las concentraciones iniciales, concentraciones y porcentajes de remoción de DQO para un tiempo de 120 minutos.

Tabla 4.8 Concentración y porcentaje de remoción para la DQO del lixiviado nuevo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial de la DQO (mg/l)	Concentración a 30 min de la DQO (mg/l)	% Remoción DQO a 30 min.
1	07/05/2018	0.5	1	8720	8400	3.67
2	07/05/2018	2	1	8720	8320	4.59
3	05/05/2018	0.5	10	8480	7760	8.49
4	05/05/2018	2	10	8480	7680	9.43
5	09/05/2018	1.25	5.5	7680	7040	8.33

Se puede apreciar, que las mejores remociones de DQO se dan a partir de 5.5 mA/cm² y una distancia entre electrodos variable de 0.5, 1.25 y 2cm, como se ve en la tabla 4.8 y grafico 4.12 para las pruebas N°3, 4 y 5 con remociones de 8.49%, 9.43% y 8.33% respectivamente para 120 minutos. Las remociones de DQO para el lixiviado nuevo son muy bajas a comparación con los resultados del lixiviado antiguo, esto podría deberse a que las concentraciones iniciales son más altas para el lixiviado nuevo.

Gráfico de superficie para porcentaje de remociones de la DQO corrido en el programa (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 120 minutos (tabla 4.8).

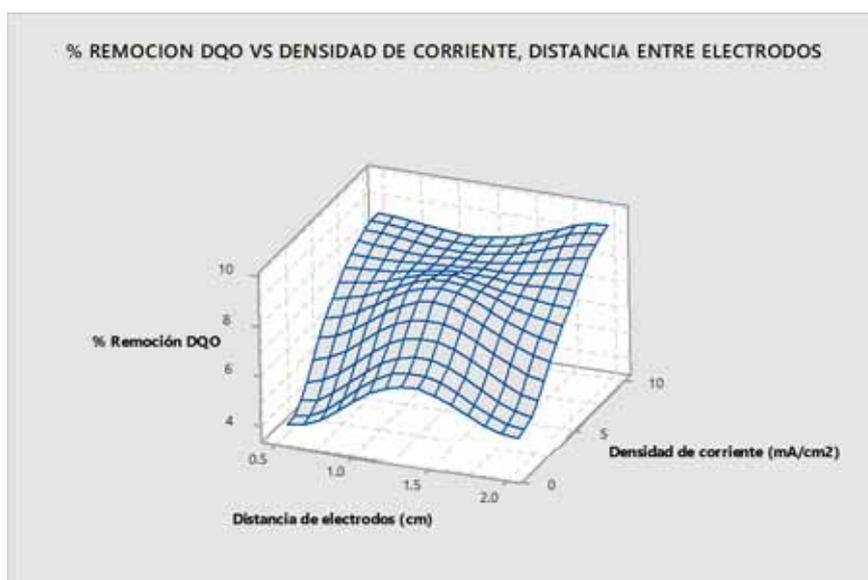


Grafico 4.12 Superficie de porcentaje de remoción de los TSS. (Elaboración propia)

4.3. DISEÑO EXPERIMENTAL FINAL PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO.

Para el análisis de diseño experimental se corrió con el lixiviado antiguo, ya que se tiene mayores porcentajes de remociones de la DBO₅, DQO y TSS a comparación del lixiviado nuevo analizados en el diseño preliminar.

Los experimentos se realizaron sin ninguna modificación previa, es decir, manteniendo intactas la concentración inicial de 2516mg/l de DBO₅, 4040mg/l para TSS y 5018mg/l de DQO, pH=7.74, conductividad de 28402μs/cm y temperatura de 15.5°C, para las 9 corridas realizados el 18 y 19 de junio del 2018, las corridas se realizaron en 30 minutos para la DBO₅ y TSS, 120 minutos para DQO. En el caso de la DBO₅ y los TSS la velocidad de reacción es rápida durante los primeros 30 minutos como se observó en los gráficos 4.1 y 4.3 y para la DQO la velocidad de reacción es lenta y está en función al tiempo como se observa en el grafico 4.5, el estudio se realiza hasta los 120min.

Se determinó la desviación estándar y t estudent para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (TSS) para el diseño experimental final 2^K para las 5 réplicas en el punto central. (Apéndice B13).

4.3.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

Se muestra en el grafico 4.13, las 9 corridas para la concentración de la DBO₅ en función de la distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos. Ver tabla 4.9 valores para la gráfica 4.13).

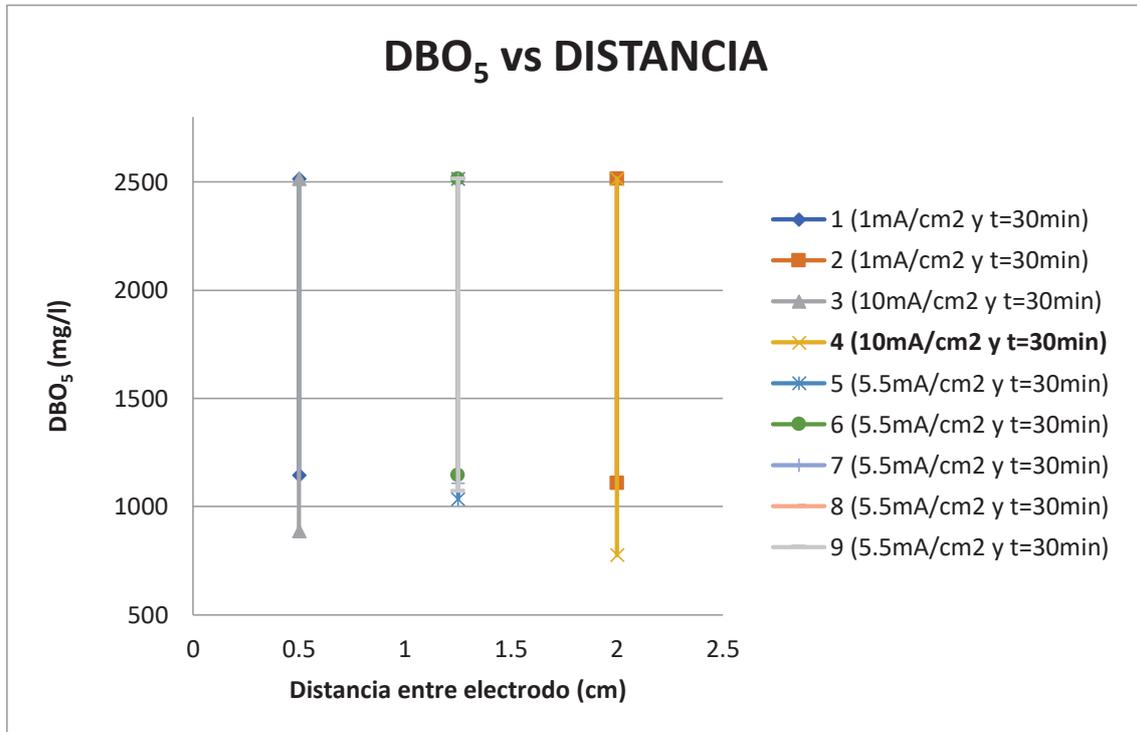


Gráfico 4.13 Concentración de la DBO₅ vs distancia entre electrodo del lixiviado antiguo (Elaboración propia)

Como se puede observar en el grafico 4.13 para una concentración inicial de 2516mg/l de oxígeno necesario para la biodegradación de la materia orgánica en 5 días a través de los microorganismos presentes del lixiviado, reduciendo a 888 y 777mg/l para las corridas N°3 y 4, a 30 minutos.

En la tabla 4.9 se muestra los resultados obtenidos en el diseño de experimentos para los porcentajes de remoción DBO₅ para un tiempo de 30 minutos.

Tabla 4.9 Concentración y porcentaje de remoción para la DBO₅ del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial DBO ₅ (mg/l)	Concentración final DBO ₅ (mg/l) 30min	%Remoción DBO ₅
1	18/06/2018	0.5	1	2516	1147	54.41
2	18/06/2018	2	1	2516	1110	55.88
3	18/06/2018	0.5	10	2516	888	64.71
4	18/06/2019	2	10	2516	777	69.12
5	18/06/2018	1.25	5.5	2516	1036	58.82
6	18/06/2020	1.25	5.5	2516	1147	54.41
7	19/06/2018	1.25	5.5	2516	1110	55.88
8	19/06/2021	1.25	5.5	2516	1073	57.35
9	19/06/2018	1.25	5.5	2516	1073	57.35

Los mejores resultados de remoción de DBO₅ son las corridas N° 3 y 4, con remociones de 64.71% y 69.12% como se observa en la tabla 4.9 y grafico 4.14 con una densidad de corriente de 10 mA/cm² y un a distancia entre electrodos de 0.5 y 2 cm. Esto se podría atribuir a que la densidad de corriente tiene mayor influencia en esta tecnología como ya se había visto en el ensayo preliminar.

Grafica de superficie para el porcentaje de remociones de la DBO_5 (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos.

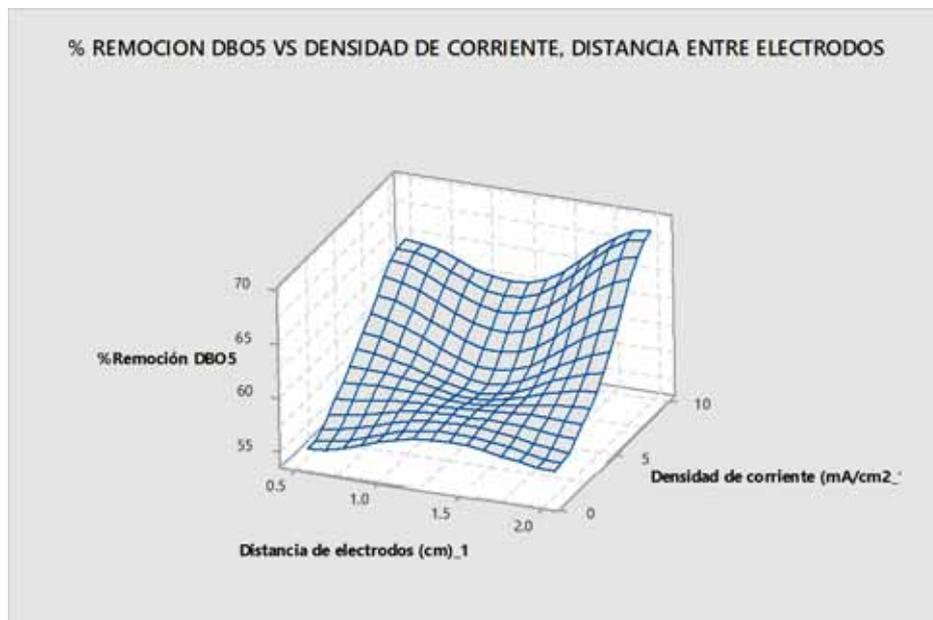


Grafico 4.14 Superficie de porcentaje de remoción de la DBO_5 . (Elaboración propia)

4.3.2. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).

Se muestra en el grafico 4.15, las 9 corridas para la concentración de los TSS en función de la distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos. Ver tabla 4.10 valores para la gráfica 4.15.

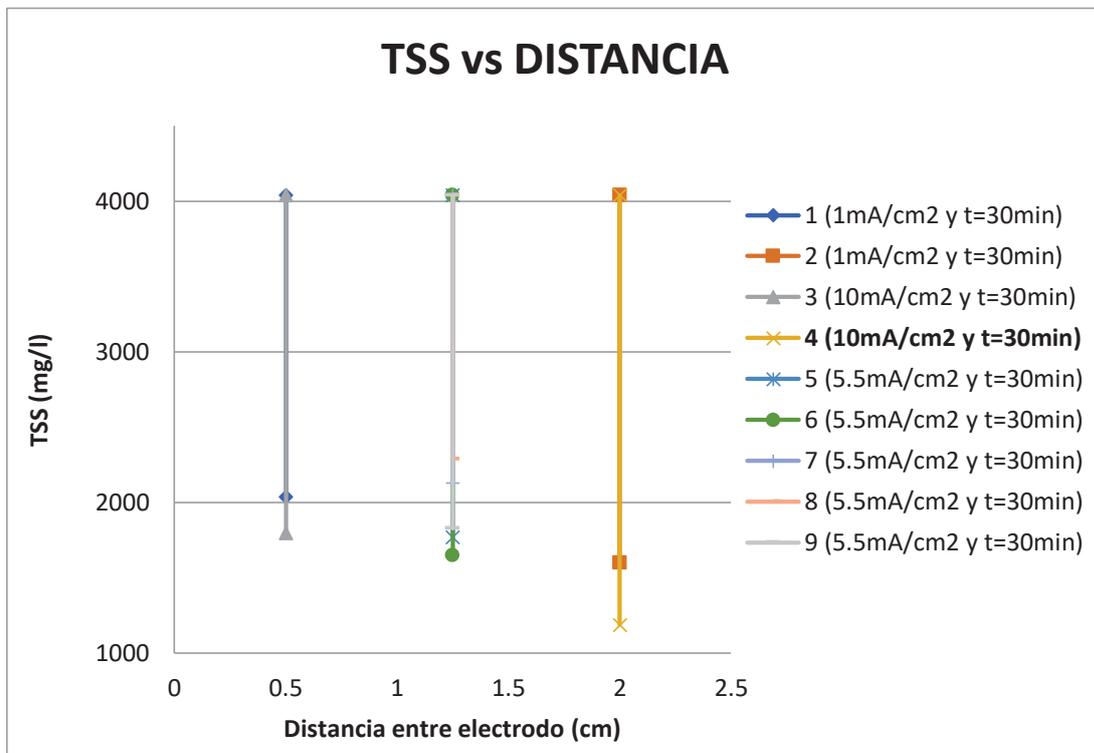


Gráfico 4.15 Porcentaje de remoción de los TSS vs distancia del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Como se puede observar en el grafico 4.15 para una concentración inicial de 4040mg/l de TSS se reduce a 1190mg/l para las corridas N°4, a 30 minutos.

En la tabla 4.10 se muestra los resultados obtenidos en el diseño de experimentos para los porcentajes de remoción TSS para un tiempo de 30 minutos.

Tabla 4.10 Concentración y porcentaje de remoción para los TSS del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial TSS (mg/l)	Concentración final TSS (mg/l) 30min	%Remoción TSS
1	18/06/2018	0.5	1	4040	2040	49.50
2	18/06/2018	2	1	4040	1600	60.40
3	18/06/2018	0.5	10	4040	1800	55.45
4	18/06/2019	2	10	4040	1190	70.54
5	18/06/2018	1.25	5.5	4040	1770	56.19
6	18/06/2020	1.25	5.5	4040	1650	59.16
7	19/06/2018	1.25	5.5	4040	2130	47.28
8	19/06/2021	1.25	5.5	4040	2290	43.32
9	19/06/2018	1.25	5.5	4040	1830	54.70

El mejor resultado de remoción de TSS de la corrida N°4, con remociones de 70.54% como se observa en la tabla 4.10 y grafico 4.16 con una densidad de corriente de 10 mA/cm² a 2 cm distancia entre electrodos para 30 minutos.

Grafica de superficie para porcentaje de remociones de los TSS (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 30 minutos.

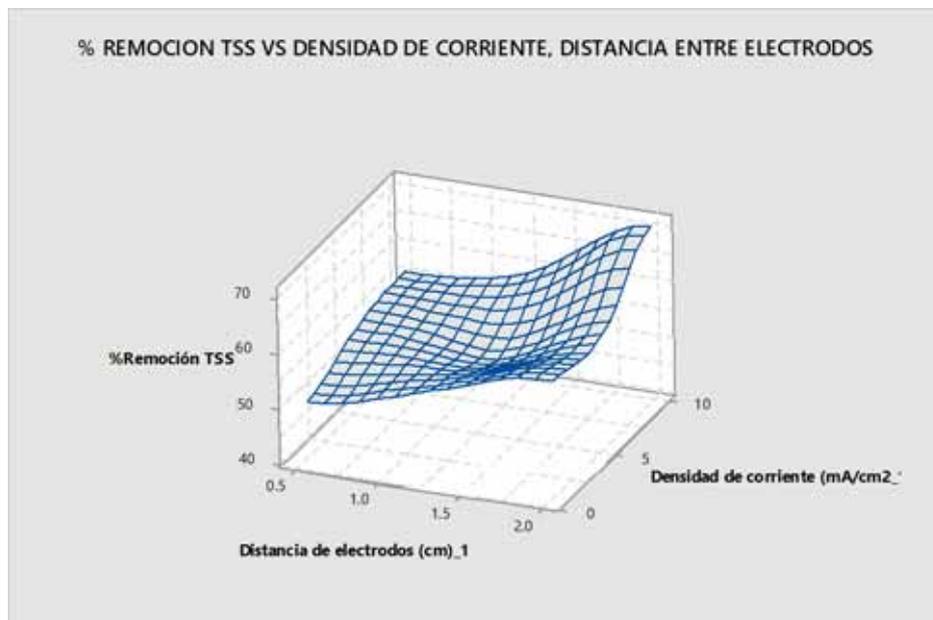


Grafico 4.16 Superficie de porcentaje de remoción de los TSS. (Elaboración propia)

4.3.3. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Se muestra en el grafico 4.17, las 9 corridas para la concentración de la DQO en función de la distancia entre electrodos para un tiempo de 120 minutos. Ver tabla 4.11 valores para la gráfica 4.17.

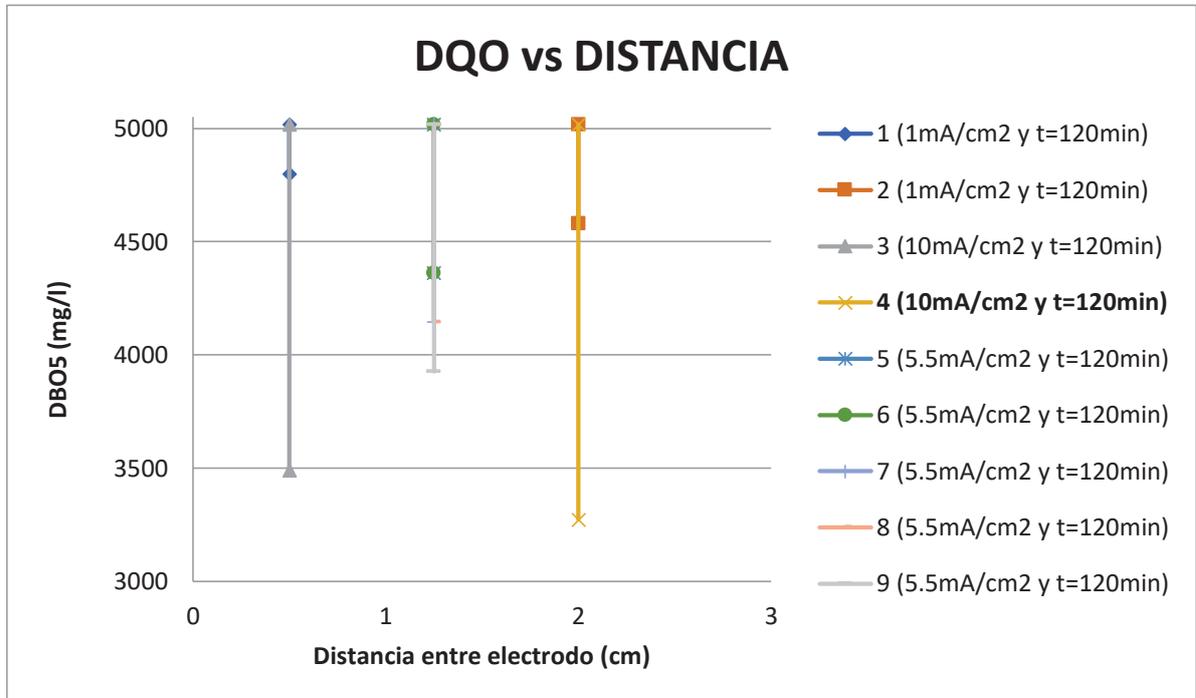


Gráfico 4.17 Porcentaje de remoción de la DQO vs distancia del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Como se puede observar en el gráfico 4.17 para una concentración inicial de 5018mg/l de oxígeno necesario para que reaccione toda la materia del lixiviado, reduciendo a 3491 y 3273mg/l para las corridas N°3 y 4 respectivamente, a 30 minutos.

En la tabla 4.11 muestra los resultados obtenidos en el diseño de experimentos para el porcentaje de remoción de la DQO para un tiempo de 120 minutos.

Tabla 4.11 Concentración y porcentaje de remoción para la DQO del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial DQO (mg/l)	Concentración final DQO (mg/l) 120min	%Remoción DQO
1	18/06/2018	0.5	1	5018	4800	4.35
2	18/06/2018	2	1	5018	4582	8.70
3	18/06/2018	0.5	10	5018	3491	30.43
4	18/06/2019	2	10	5018	3273	34.78
5	18/06/2018	1.25	5.5	5018	4364	13.04
6	18/06/2020	1.25	5.5	5018	4364	13.04
7	19/06/2018	1.25	5.5	5018	4145	17.39
8	19/06/2021	1.25	5.5	5018	3927	21.74
9	19/06/2018	1.25	5.5	5018	3709	26.09

Los mejores resultados de remoción de DQO son las corridas N° 3 y 4, con remociones de 30.43% y 34.78% como se observa en la tabla 4.11 y grafico 4.18 con una densidad de corriente de 10 mA/cm² y un a distancia entre electrodos de 0.5 y 2 cm. Esto se podría atribuir a que la densidad de corriente tiene mayor influencia en esta tecnología, como ya se había visto en el ensayo preliminar. Esta tecnología no es eficiente para la remoción de DQO ya que presenta remociones bajas.

Grafica de superficie para el porcentaje de remociones de la DQO (Minitab v.17, 1991-2004) donde se muestra la mayor influencia de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para un tiempo de 120 minutos.

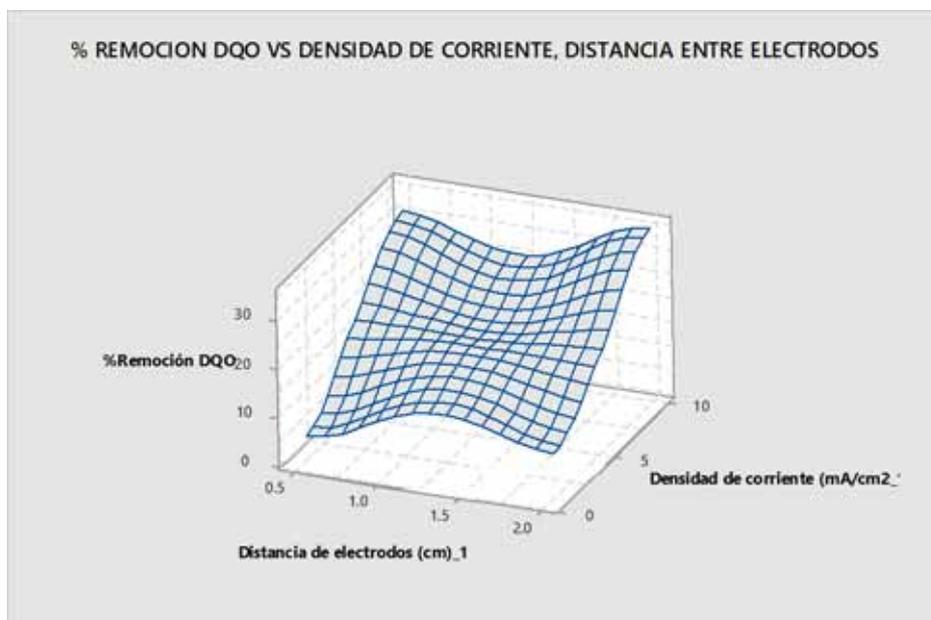


Grafico 4.18 Superficie de porcentaje de remoción de la DQO. (Elaboración propia)

4.4. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) Y LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).

Las pruebas de cinéticas de degradación para la determinación del orden de reacción se realizaron con el lixiviado antiguo el 06 de julio del 2018, con 2 cm de distancia entre electrodos y 10mA/cm² de densidad de corriente, siendo estas condiciones las óptimas en los resultados del diseño experimental final. Se tomaron muestras a 1.5, 3, 8, 15 y 30 minutos para la DBO₅. En caso de la DQO se tomaron muestras a los 10, 20, 40, 80 y 120 minutos. Las corridas se realizaron con réplica y con las mismas dimensiones de los electrodos, manteniendo constantes el pH y conductividad inicial de la muestra, con el fin de evaluar el comportamiento de la remoción de DBO₅ y DQO a través del tiempo. Ver apéndice B.6 y B.7.

4.4.1. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

Con el fin de predecir comportamientos y simular el efecto de variar las condiciones de operación dentro de su intervalo de validez, los datos se ajustaron a un modelo, por medio de la asignación de la función que mejor se ajuste a una línea recta, determinando el orden de reacción a partir de la mejor correlación obtenida para los datos evaluados. La cinética de DBO₅ que mejor se ajustó para la muestra del lixiviado antiguo fue la de segundo orden, como se puede apreciar en el grafico 4.19. A los 30 minutos se alcanzó una remoción promedio 66.46%.

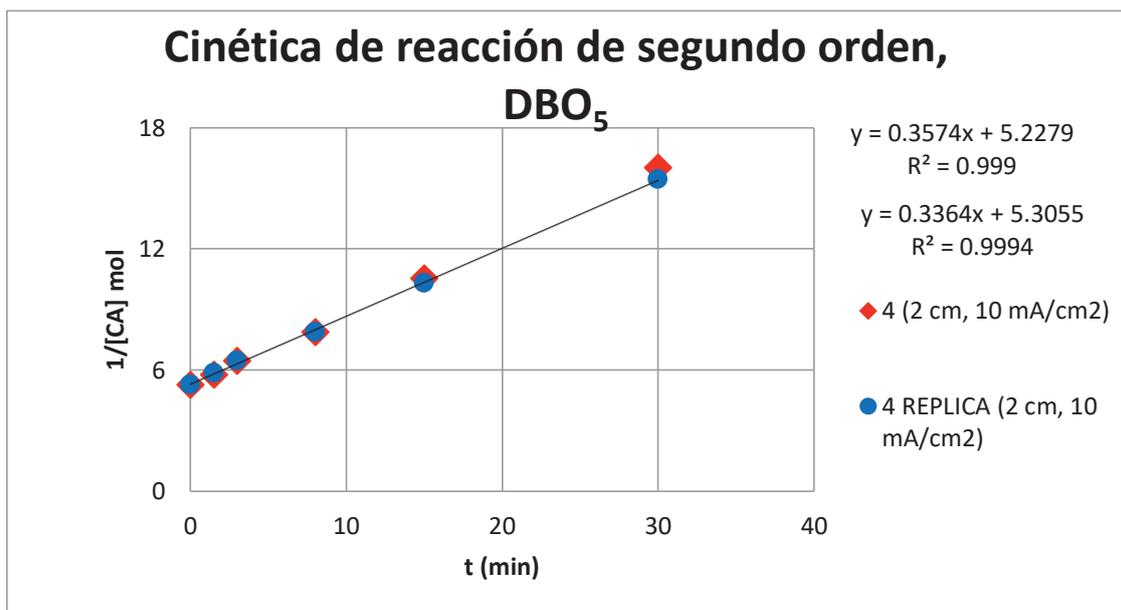


Gráfico 4.19 Cinética de reacción de segundo orden para la DBO₅ del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A^2 \quad \text{Ec.4.1}$$

$$[k] = \text{dm}^3/\text{mol} * \text{s}$$

De la gráfica 4.19 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas como se muestran los valores en el apéndice B.10.1, tabla B10-1 y B10-2 Obteniendo como resultado la ecuación cinética siguiente:

$$-r_A = 0.3469 C_A^2 \quad (\text{l/mol} * \text{min}) \quad \text{Ec.4.2}$$

Ecuación promedio de la recta de ajuste del gráfico 4.19:

$$Y = 0.3469X + 5.2667 \quad \text{Ec.4.3}$$

Y: DBO₅ (mg/l)

X: tiempo (min)

Teniendo en cuenta el promedio de la constante cinética de la reacción 0.3460 (l/mol*min) de la ecuación 4.3, se puede deducir que, si la reacción mantiene el mismo comportamiento, el objetivo final de reducir hasta 20 mg/l de DBO₅, para este tratamiento no es posible llegar al límite máximo permisible (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad, ver anexo C.2. Así mismo no es posible llegar a los límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de PTAR, para 100mg/l de DBO₅ ver anexo C.3. Como también no es posible llegar 15mg/l de DBO₅ para la norma legal peruana en aguas para bebidas de animales y riego de vegetales (categoría 3) Riego de vegetales y bebida de animales, ver anexo C.1. Ya que no se tiene mayor remoción después de los 30 min.

4.4.2. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).

Los datos se ajustaron a un modelo, por medio de la asignación de la función que mejor se ajuste a una línea recta, determinando el orden de reacción a partir de la mejor correlación obtenida para los datos evaluados. La cinética de DQO que mejor se ajustó para la muestra del lixiviado antiguo fue la de segundo orden, como se puede apreciar en el grafico 4.20

Se muestra como a medida que transcurre el tiempo, se obtiene un mayor porcentaje de remoción de DQO, con las mejores condiciones de operación. A los 120 minutos se alcanzó una remoción promedio 40.48%, pero a medida que transcurre el tiempo de reacción se ve favorecida la eficiencia de remoción.

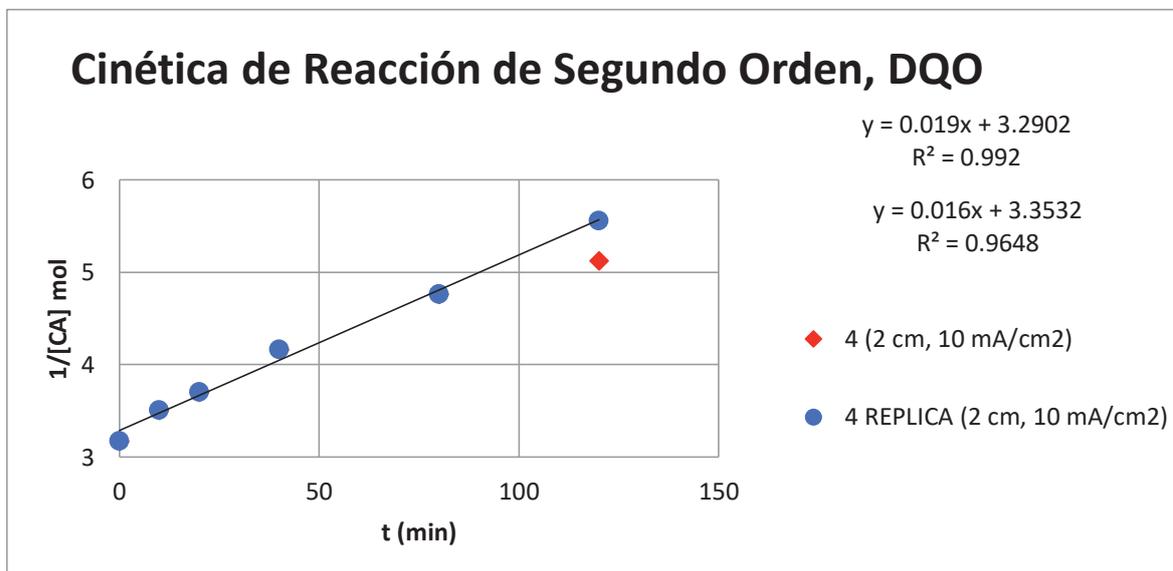


Gráfico 4.20 Cinética de reacción de segundo orden para la DQO del lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A^2 \quad \text{Ec.4.1}$$

$$[k] = \text{dm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$$

De la gráfica 4.20 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas como se muestran los valores en el apéndice B.10.2, tablas B10-3 y B10-4. Obteniendo como resultado la ecuación cinética siguiente:

$$-r_A = 0.0175C_A^2 \text{ (l/mol * min)} \quad \text{Ec.4.4}$$

Ecuación promedio de la recta de ajuste del grafico 4.22:

$$Y = 0.0175X + 3.3217 \quad \text{Ec.4.5}$$

Y: DBO₅ (mg/l)

X: tiempo(min)

Teniendo en cuenta el promedio de la constante cinética de la reacción (0.0175 l/mol*min) de la ecuación 4.5 se puede deducir que, si la reacción mantiene el mismo comportamiento, el objetivo final de reducir hasta 40 mg/l de DQO se lograría a un tiempo mayor a dos horas, para la norma legal peruana en aguas Riego de vegetales y bebida de animales (categoría 3), ver anexo C.1. Para los límites máximos permisibles (LMP) de descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad para 120mg/l de DQO, ver anexo C.2., y para los límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de PTAR, para 200mg/l de DQO ver anexo C.3. se podría lograr a un tiempo mayor a dos horas.

Es posible observar y comparar estos valores de orden de reacción con los obtenidos por (Gilpavas, 2008, p. 57,60), (en la siguiente tabla, donde se indican los contaminantes tratados, el método para determinar el orden de reacción.

Tabla 4.12 Comparación de orden de reacción. (Elaboración propia)

Autor	Contaminante	Método	K (l/mol*min)	Orden de reacción	Remoción:
Elaboración propia.	Lixiviado antiguo de relleno sanitario.	Integral	0.0175	2(DQO)	40.48% a 120min
(Gilpavas, 2008)	agua residual del proceso de teñido en un floricultivo	Integral	0.0002	2 (DQO)	38.2% a 4 min 59.31% a 10 min
		Integral	8E-05	2 (DQO)	57.96% a 6 min 68.26% a 10 min

Como se puede observar en la tabla 4.12, el orden de reacción obtenido por (Gilpavas, 2008, p. 57,60) es igual al segundo orden correspondiente al tratamiento.

4.5. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN DE LOS TSS EN FUNCIÓN AL TIEMPO

Se realizaron pruebas para ver el comportamiento de la concentración de los TSS en función al tiempo. Se realizaron con el lixiviado antiguo el 06 de julio del 2018, con 2 cm de distancia entre electrodos y $10\text{mA}/\text{cm}^2$ de densidad de corriente siendo estas condiciones las óptimas en los resultados del diseño experimental final. Se tomaron muestras a 1.5, 3, 8, 15 y 30 minutos para los TSS. La prueba se realizó con réplica y con las mismas dimensiones de los electrodos, manteniendo constantes el pH y conductividad inicial de la muestra, con el fin de evaluar el comportamiento de la remoción de los TSS a través del tiempo. Ver apéndice B.8.

Se presentan los valores y el grafico 4.13 y 4.21 de concentración y porcentaje de remoción para los TSS en función al tiempo, con las condiciones óptimas.

Tabla 4.13 Concentración y remocion para los TSS en funcion del tiempo. (Elaboración propia)

t (min)	TSS (mg/l) Corrida 1	TSS (mg/l) Corrida 2	% Remoción TSS Corrida 1	% Remoción TSS Corrida 2
0	4520	4520	0.00	0.00
1.5	3090	2730	31.64	39.60
3	2220	2510	50.88	44.47
8	1800	2390	60.18	47.12
15	1700	2330	62.39	48.45
30	1420	2180	68.58	51.77

La tabla 4.13 es el resumen de las corridas 1 y 2 para las concentraciones y remociones de los TSS en intervalos de tiempo de 1.5, 3, 8, 15 y 30 min.

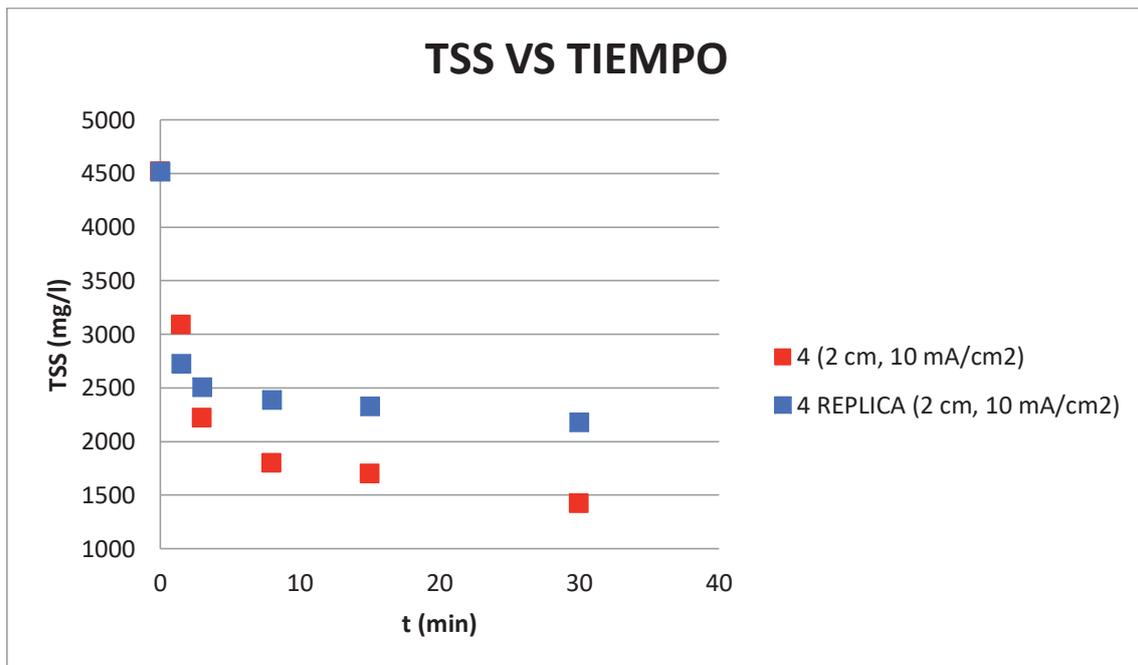


Gráfico 4.21 Concentración de los TSS vs tiempo para el lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

En el gráfico 4.21 se puede observar que se presenta un alto porcentaje de remoción promedio 47.68% durante los primeros 8 minutos de reacción, comparado con los otros tiempos, en los cuales el porcentaje de remoción aumenta de manera menos acelerada. Demostrando que en este tiempo se han formado los flocúlos de tamaños suficientemente grandes como para precipitar con velocidad.

Los resultados obtenidos son mayores (ver concentraciones finales en el apéndice B.8) a los límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad, para 30mg/l de TSS, ver anexo C.2., y los límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de PTAR, para 150mg/l de TSS, ver anexo C.3. Ya que no se tiene mayor remoción después de los 30 min al igual que la DBO₅.

4.6. COMPORTAMIENTO DEL TIEMPO, DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS Y DENSIDAD DE CORRIENTE.

Se muestra los comportamientos del tiempo, distancia entre electrodos y densidad de corriente con los valores mostrados en la tabla B.12, Apéndice B.12, obtenidos mediante el programa (Minitab v.17, 1991-2004).

En los gráficos 4.22, 4.23 y 4.24 se observa la mayor influencia del tiempo, seguido de la densidad de corriente y distancia entre electrodos para el porcentaje de remoción.

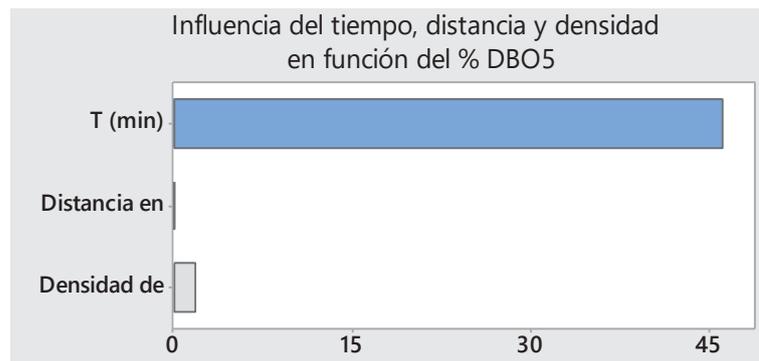


Grafico 4.22 Comportamiento del tiempo, distancia y densidad para la DBO₅.

La DBO₅ presenta un alto porcentaje de remoción durante los primeros 30 minutos de reacción, comparado con los otros tiempos, en los cuales el porcentaje de remoción aumenta de manera menos acelerada y se da a partir de 5.5mA/cm² y una distancia entre electrodos variable.

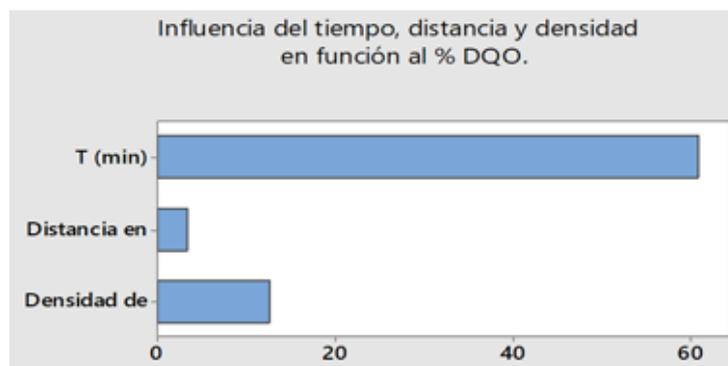


Grafico 4.23 Comportamiento del tiempo, distancia y densidad para el % DQO.

En el gráfico 4.23, muestra la mayor influencia del tiempo a medida que transcurre el tiempo, se obtiene un mayor porcentaje de remoción de DQO a partir de 5.5 mA/cm² de densidad de corriente y 1.25cm de distancia entre electrodos.

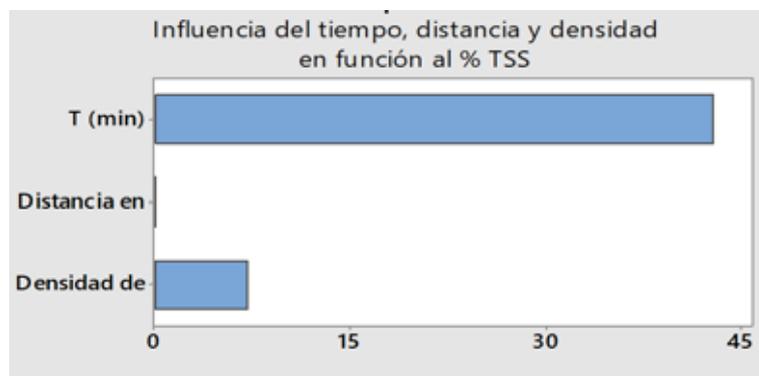


Grafico 4.24 Comportamiento del tiempo, distancia y densidad para él % TSS. (Elaboración propia)

En la gráfica 4.24 el porcentaje de remoción de los TSS se dan a 30 minutos con una densidad de corriente a partir de 3.25 mA/cm² y una distancia entre electrodos variable, comparado con los otros tiempos, en los cuales el porcentaje de remoción aumenta de manera menos acelerada.

4.7. RESUMEN EXPERIMENTAL

En las pruebas preliminar la DBO₅ presenta un alto porcentaje de remoción durante los primeros 30 minutos de reacción, comparado con mayores tiempos, en los cuales el porcentaje de remoción aumenta de manera menos acelerada, el porcentaje de remoción para la DBO₅ es mayor a 70% para el lixiviado antiguo, y mayor a 50% para el lixiviado nuevo, ambas remociones se dan a 30 minutos con una densidad de corriente a partir de 5.5 mA/cm² siendo la distancia entre electrodos menos relevante, las distancias entre electrodos trabajadas son de 0.5cm a 2cm, por términos operativos se prefiere la mayor distancia, (ver tabla 4.3 y 4.6). Para las pruebas finales el porcentaje de remoción para la DBO₅ es mayor a 64% para un tiempo de 30 minutos con una densidad de corriente de 10 mA/cm² y una distancia variable de 0.5cm y 2cm (ver tabla 4.9), para el lixiviado antiguo. Se destaca que la densidad de corriente influye sobre el rendimiento de la remoción de la DBO₅.

En la prueba preliminar el porcentaje de remoción para los TSS es mayor a 45% para el lixiviado antiguo, y mayor a 28% para el lixiviado nuevo, ambas remociones se dan a 30 minutos. Para el lixiviado antiguo se da con una densidad de corriente a partir de 5.5 mA/cm² y una distancia variable de 0 a 2cm. Para el lixiviado nuevo se da con una densidad de corriente de 10 mA/cm² y una distancia variable de 0.5cm a 2cm (ver tabla 4.4 y 4.7). Para las pruebas finales el porcentaje de remoción para los TSS es mayor a 70% para un tiempo de 30 minutos. Con una densidad de corriente de 10 mA/cm² y con una distancia de 2 cm (ver tabla 4.10). De manera semejante a la DBO₅, la densidad de corriente influye sobre la remoción de los TSS.

En las pruebas preliminar el porcentaje de remoción para la DQO es mayor a 20% para el lixiviado antiguo y mayor a 8.0% para el lixiviado nuevo, ambas remociones se dan a 120 minutos con una densidad de corriente a partir de 5.5 mA/cm². Para el lixiviado antiguo se da a una distancia mayor a 1.25 cm y para el lixiviado nuevo se da con una distancia variable de 0.5cm a 2cm (ver tabla 4.5 y 4.8). Para las pruebas finales el porcentaje de remoción para la DQO es mayor a 34% para un tiempo de 120 minutos con una densidad de corriente de 10 mA/cm² y una distancia entre electrodos de 2cm (ver tabla 4.11).

Para la cinética de la DBO₅ y DQO se corrió con 10 mA/cm² de densidad de corriente y 2 cm de distancia entre electrodos por tener mejores resultados en la remoción. Donde se determinó reacciones de segundo orden para la DBO₅ y DQO, con remociones promedio de 66.46% a 30 minutos (tabla B6-1. y tabla B6-2.) ANEXO B y remociones promedio de 40.48% a 120 minutos (tabla B7) ANEXO B respectivamente.

Para el comportamiento de los TSS se tuvo una eficiencia de 60.18% en 30 minutos (tabla B8) ANEXO B para la precipitación de los flóculos conformados.

Tabla 4.14: Resumen - efecto entre variables dependientes e independientes.

Efecto Parámetro	Distancia entre electrodos	Densidad de Corriente	Tiempo (para medir efectos)
DBO₅	Poco relevante	Gran efecto	Corto
DQO	Poco relevante	Poco efecto	Largo
TSS	Poco relevante	Gran efecto	Bastante corto

La tabla 4.14 resume el comportamiento de las diferentes variables que intervienen en el proceso de electrocoagulación. Los mejores resultados se dan en lixiviados antiguos por lo que la presente investigación recomienda trabajar con esta clase de lixiviados con la técnica de electrocoagulación.

Los experimentos se realizaron a pH natural de los lixiviados, que se encuentra dentro del rango de 7.3 a 8.02, no se realizó ninguna variación ya que se encuentra dentro de los valores para la remoción de la DBO₅, DQO y TSS como se muestra en el capítulo 2.11 y resumen de la tabla del ANEXO D.2.

Con los datos de la investigación se construyó el sistema de electrocoagulación para los lixiviados del relleno sanitario de Jaquira (ver figura 4.7).



Figure 4.7. Imágenes de la planta de tratamiento de electrocoagulación.

CONCLUSIONES

- Los mejores resultados de porcentajes de remoción se dan con el lixiviado antiguo para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Sólidos Suspendidos Totales (TSS), para el tratamiento por electrocoagulación en reactor monopolar batch a un tiempo corto, durante los primeros 30 minutos, donde la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos. Mientras que para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) no son muy eficientes ya requieren más tiempo.
- Las concentraciones iniciales de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (TSS) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) del lixiviado antiguo es baja a comparación del lixiviado nuevo, siendo el más eficiente para esta tecnología el lixiviado antiguo, mostrando mejores resultados de porcentajes de remoción de DBO_5 , TSS y DQO.
- Existe mayor influencia de la densidad de corriente sobre la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Sólidos Suspendidos Totales (TSS) para los cuales se tienen las mayores velocidades de remoción hasta los 30 min. Para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) el tiempo requerido es mucho mayor con bajos niveles de separación. La distancia entre electrodos muestra poco efecto en la remoción de parámetros, para los lixiviados de estudio, por lo que se prefiere la mayor distancia por cuestiones operativas del proceso.
- La eficiencia de tratamiento es superior en el lixiviado antiguo, siendo la remoción en un rango de 60 a 70% de DBO_5 , 45 a 70% para los TSS, ambos para un tiempo de 30 minutos. En el caso de la DQO se da en un rango de 20 a 40%, para un tiempo de 120 minutos.
- La cinética de degradación de la DBO_5 y DQO se determinó segundo orden de reacción, permitiendo deducir que, si la reacción mantiene el mismo comportamiento no será posible llegar a los límite máximos permisibles para la descarga de efluente líquido de tratamiento de residuos sólidos, lixiviados de relleno sanitario y de seguridad, ya que no se tiene mayor remoción después de los 30 minutos para la DBO_5 y en el caso de la DQO se podría llegar a los límites máximos permisibles, para un tiempo mayor a dos horas manteniendo el mismo comportamiento de la reacción.

RECOMENDACIONES

- En este estudio no se probó con configuraciones bipolares en serie y según algunos artículos pueden disminuir el consumo de energía, por lo cual se sugiere hacer pruebas para su verificación.
- Realizar estudios de post tratamiento para reducir las concentraciones del efluente de electrocoagulación.
- Hacer un estudio de los gases generados de la descomposición de los residuos sólidos del relleno sanitario de Jaquira para aprovechar como energía para esta tecnología de electrocoagulación.

BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Nacional del Agua (ANA), M. (Marzo de 2016). Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural n° 010-2016-ANA). ANA, 86.
- Aguilar, E. (Junio de 2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Instituto de Investigación (RIIGO), FIGMMG-UNMSM, Vol. 18*(número. 35), 69-73.
- Aguilar Ascon, E. A. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima: La Universidad.
- APHA. (2005). *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales*. EEUU.: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION (WPCF). Edición 2005.
- Arango Ruiz, A. Á. (Enero-Junio de 2005). La electrocoagulación una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *LASALLISTA de investigación, Vol.2*(número. 001), 49-56.
- Arango Ruiz, A., & Garcéz Giraldo, L. F. (15 de Setiembre de 2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad EAFIT, Vol. 43*(número. 147), 56-67.
- Arizaca Cacha, V., & Huaman Arizaca, R. (2013). *Capacidad de Adsorción de Materia Orgánica de los Lixiviados del Botadero de Jaquira con Carbono Activado*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco: La Universidad.
- Ávila Armas, D., & Silva Vásquez, C. (2010). *Tratamiento de Lixiviados Diluidos con Aguas Residuales en una Planta Piloto a Escala de un Sistema de Lodos Activados con el Fin de Lograr un Efluente Óptimo*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima: La Universidad.
- Ayala Mina, J., & Pardo Mercado, R. (1995). *Optimización por Diseños Experimentales con Aplicaciones en Ingeniería*. Lima: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC.
- Barrera Díaz, C. E. (2014). *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. D.F, México: Reverte, S.A.
- Brion, J. R. (2004). *Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos*. (L. Universidad, Ed.) Buenos Aires, República Argentina: Academia Nacional de Ingeniería.
- Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Castillo Alvarado, H., & Rivera García, A. (2002). "Ambiente y Desarrollo Impulsores del Progreso" Electrocoagulación, Electroflotación, Electroflotación y Producción, in-situ, de Cloro. X Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (pág. 60). Proselquin (Productos y servicios Electroquímicos).
- Cazco Sánchez, A. J., & Jarrin Flores, S. A. (Diciembre de 2010). *Diseño, Construcción y Análisis de Parámetros de Operación de un Sistema de Electrocoagulación*. Escuela Politécnica Nacional. Quito: La Universidad.
- Chevarría, N., & Loayza, S. G. (2011). *Tratamiento de los Lixiviados de Jaquira con Coagulantes Naturales*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco: La Universidad.

- Diario Correo. (09 de Junio de 2015). *Salud pública en riesgo por botadero de Haqaira*. Recuperado el 24 de Enero de 2018, de Salud pública en riesgo por botadero de Haqaira: <https://diariocorreo.pe/ciudad/salud-publica-en-riesgo-por-botadero-de-haquira-593494/>
- Diario el Sol. (19 de Abril de 2017). *Diario el Sol*. Obtenido de El Botadero de Jaqaira un Problema que se Pudo Resolver: <http://www.diarioelsolcusco.pe/2017/04/19/el-botadero-de-jaqaira-un-problema-que-se-pudo-resolver/>
- Discovskiy Rioboo, L. M. (2008). *Estadística Básica*. Nicaragua: UNI- Norte.
- Fogler H., S. (2008). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas* (Cuarta ed.). (R. F. Rivera, Ed.) Mexico: Pearson Educación.
- García Herrera, J. C. (2014). *Proceso Fenton y Foto-Fenton para el Tratamiento de Aguas Residuales del Laboratorio Microbiológico Empleando Fe₂O₃ Soportado en Manotubos de Carbono*. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá: La Universidad.
- Gilpavas, E. (2008). *Aplicación de la Electroquímica en el Tratamiento de Aguas Residuales*. Universidad EAFIT. Medellín: La Universidad.
- Giraldo Gomez, G. I. (1995). *Manual de Análisis de Agua*. Manizales .
- Giraldo, E. (1997). Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios. 44-55.
- Hadj Hmida, E., Bellakhal, N., & Mansour, D. (December de 2010). Treatment of Lixivate from Jabel Chakir-Tunis by Electrocoagulation. *Desalination and water treatment*, 266-272.
- Hariraj, S., & Brijesh Kumar, M. (2016). Assessment of kinetics behavior of electrocoagulation process for the removal of suspended solids and metals from synthetic water. (K. S. Engineers, Ed.) *Environmental Engineering Research*, 1-26.
- Harris, D. C. (2001). *Análisis Químico Cuantitativo* (Segunda/correspondiente a la quinta ed. original norte americana ed.). Barcelona, España: Reverté.S.A.
- Huaman, S., & Jordan, J. C. (2013). *Tratamiento de los Lixiviados de Jaqaira con Coagulantes Naturales*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco: La Universidad.
- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente . Lima: Organización Panamericana de la Salud.
- Jimeno Blasco, E. (1998). *Análisis de Aguas y Desagües* (2 ed.). Lima, Perú.
- López, Pereira, & Rodríguez. (1980). *Eliminación de los Residuos Sólidos Urbanos*. Barcelona: Editores Tecnicos Asociados, S.A.
- Martínez Lopez, A. G., Padrón Hernández, W., Rodríguez Bernal, O. F., Chiquito Coyetl, O., Escarola Rosas, M. A., Hernández Lara, J. M., . . . Martínez Castillo, J. (24 de Abril de 2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances en Química, Vol.9*(núm.1), 37-47.
- Martínez Navarro, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación*. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real: La Universidad.
- Mendieta Cabrera, M. A. (Abril de 2013). *Dimensionamiento de un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas lixiviadas del relleno sanitario "el Inga"*. Escuela Politécnica Nacional. Quito: La Universidad.

- Mercado Martínez, I. D., Reyes Ávila, D., & Agrono Hurtado, V. E. (2008). La electrocoagulación, una alternativa para la depuración de lixiviados. *ResearchGate*, 55-58.
- Metcalf, & Eddy. (1995). *Características del Agua Residual* (Vol. 1). España: McGRAW-HILL.
- MINAM. (24 de Julio de 2004). DECRETO SUPREMO N° 057-2004/LEY GENERAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS N° 27314. *El Peruano*, págs. 273154-273179. Obtenido de Decreto Supremo N° 057-2004-PCM.
- MINAM. (31 de Julio de 2008). DECRETO SUPREMO N°002-2008/ESTANDARES NACIONALES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA AGUA. *El Peruano*, págs. 377219-377254.
- MINAM. (2009). *DECRETO SUPREMO N° 001-2009/APRUEBA LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) DE EFLUENTES DE INFRAESTRUCTURAS DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Lima.
- MINAM. (17 de Marzo de 2010). DECRETO SUPREMO N° 003-2010/LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS O MUNICIPALES. *El Peruano*, págs. 415675-415676.
- MINAM. (23 de Diciembre de 2016). DECRETO LEGISLATIVO N° 1278/ LEY DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS. *El Peruano*, págs. 607472-607488.
- MINAM. (7 de Junio de 2017). DECRETO SUPREMO N° 004/ APRUEBAN ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA Y ESTABLECEN DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS. *El Peruano*, págs. 10-19.
- MINAM. (21 de Diciembre de 2017). DECRETO SUPREMO N° 014-2017/ LEY DE GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS N°1278. *El Peruano*, págs. 18-49.
- Minitab v.17, S. S. (1991-2004). Minitab® 17.1.0. *Minitab Statistical Software v.17 English [PortableDance] [MF]*. Pennsylvania State University.
- Mollah A., Y. M., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)—science and applications. *Journal of Hazardous Materials B84-*, 29-41.
- Monroe, M. (02 de Agosto de 2010). Tratamiento de Lixiviado de Relleno Sanitario. *New Logic International-VOSEP*, 1-4.
- Morales, C. J. (2007). *Estudio para la Remoción de Metales Pesado de Rellenos Sanitarios*. Universidad Nacional de Colombia. Manizales: La Universidad.
- Municipalidad Provincial del Cusco. (2017). *MEJORAMIENTO AMPLIACION DE LA DISPOSICION FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DEL CUSCO EN LA COMUNIDAD DE HAKIRA, DISTRITO SANTIAGO, PROVINCIA CUSCO DEPARTAMENTO CUSCO*". Cusco: Oligo consultores.
- OEFA. (2013). *Fiscalización Ambiental en Residuos Sólidos de Gestión Municipal Provincial*. Lima.
- OEFA. (11 de Junio de 2016). *El OEFA Supervisa Botadero de Haquira en Cusco*. Obtenido de OEFA: <https://www.oefa.gob.pe/noticias-institucionales/el-oefa-supervisa-botadero-de-haquira-en-cusco>
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. (1978). *Procedimientos Simplificados para el Examen de Aguas-Manual de laboratorio de la American Water Works Association* (Segunda ed.). Washington, E.U.A. : Organización Panamericana de la salud - Oficina Sanitaria Panamericana.

- Pesantez Pizarro, L. E., & Ruiz Beltran, V. V. (Agosto de 2017). *Estudio Piloto para el Tratamiento de Lixiviados Generados en el Botadero San Miguel de los Bancos*. Escuela Politécnica Nacional. Quito: La Universidad.
- Piña Soberanis, M., Martín Domínguez, A., Gonzáles Ramírez, C. A., Prieto García, F., Guevara Lara, A., & García Espinoza, J. E. (Abril de 2011). Revisión de Variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA QUÍMICA*, Vol.10(núm. 2), 257-271.
- Poma Javier , J. R., & Quispe Sanca, P. A. (2016). *Remocion de Contaminantes de Aguas Residuales Urbanas por e Metodo de Electrocoagulación*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú: La Universidad.
- Procontrol, S. L. (2010). *Patente nº 200502291*. Barcelona.
- Restrepo Mejía, A. P., Arango Ruiz, Á., & Garcés Giraldo, L. F. (2006). *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el Tratamiento de Aguas*, 59-77.
- Reutelshöfer, T., & Guzmán Bejarano, L. (2015). GUIA PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL. (S. N. Básico, Ed.) *CALIDAD DE AGUA(1)*, 1-38.
- Reyes Ávila, D., & Mercado Martínez, I. D. (Diciembre de 2003). *Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario "la esmeralda"*. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Manizales: La Universidad.
- SEDESOL. (1996). Problematica del tiradero a cielo abierto. *Manual de Rehabilitacion y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto*, 33-41.
- Tibanlobo Chisag, N. M. (2014). *Diseño de una Planta de Tratamiento de Lixiviados para el Botadero de Curgua del Canton Guaranda Provincia de Bolivar* . Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba: La Universidad .
- Vogel , A. (1960). *Química Analítica Cuantitativa*. Buenos Aires, Argentina: KAPELUSZ.

APÉNDICE

APÉNDICE A.

A.1. GENERALIDADES DE PUNTOS DE MUESTREO, CARACTERIZACIÓN Y ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN.

A.1.1. PUNTOS DE MUESTREO DEL LIXIVIADO NUEVO Y ANTIGUO.

La muestra se tomó de los pozos de lixiviado antiguo y nuevo generados en el relleno sanitario de Jaquira, Hasta la fecha toda la basura de la provincia del Cusco, viene siendo dispuesto en el relleno sanitario de Jaquira, el mismo que está ubicado a 7.5 Km del tramo carretero de Cusco – Ccorcca, al Sur Oeste de la ciudad del Cusco, comprendida en la Comunidad de Jaquira Grande en el Distrito de Santiago, Provincia y Departamento del Cusco. (Diario el Sol, 2017).

Este relleno sanitario recibe 395 toneladas de residuos sólidos por día y almacena desde el año 2002, 1 400 000 toneladas de residuos, de los distritos de Cusco, Santiago, Wanchaq, San Sebastián, San Jerónimo y Sayalla (OEFA, El OEFA Supervisa Botadero de Haquira en Cusco, 2016) como se muestra en la Imagen A.1.

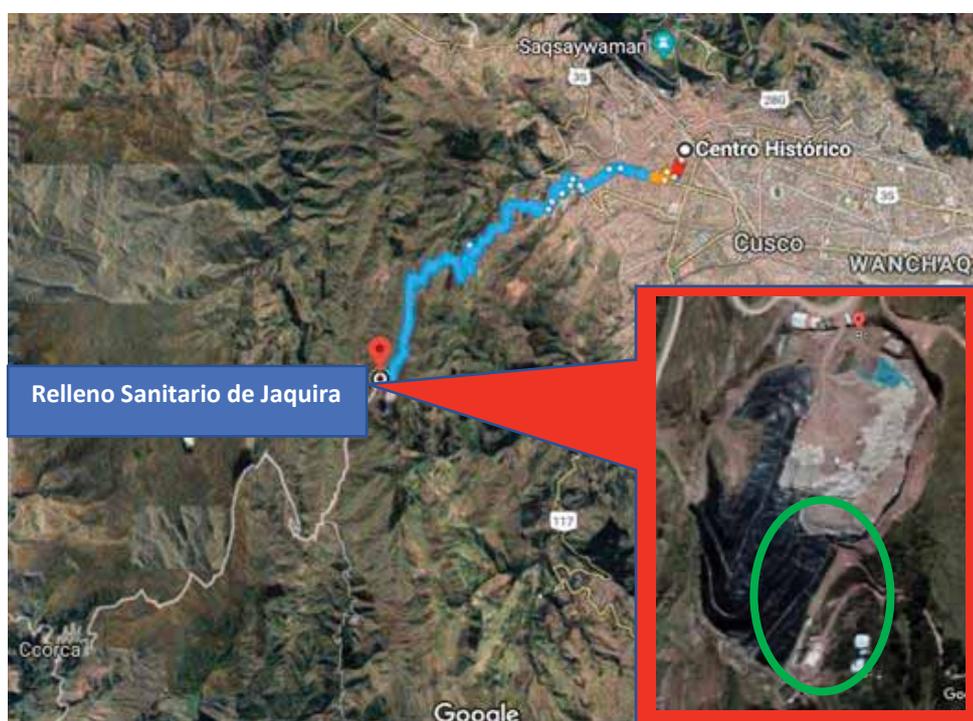


Imagen A.1 Mapa satélite del Relleno Sanitario de Jaquira.

Los pozos N°1 y N°2 son puntos de muestreo de lixiviado nuevo y antiguo respectivamente. El pozo N° 1 es la captación del lixiviado de la reciente disposición final de la basura como se muestra en el círculo de color verde de la Imagen 4.1 y el pozo N° 2 es la captación del lixiviado antiguo es la disposición final de la basura que se almacena desde el año 2002, la basura está recubierto por una geomembrana como se muestra en la imagen A.2.

Los lixiviados se clasifican de acuerdo a la edad del relleno sanitario en lixiviados nuevo y antiguo, teniendo en cuenta que un relleno sanitario se opera por décadas, siempre va a haber una parte del relleno que aporta lixiviado nuevo, la que se está rellenoando en ese momento, mientras que otras partes del relleno tienen lixiviado maduro, las que tienen unos años, y otras lixiviado viejo, las que tienen más de cinco años (Giraldo, 1997, p. 45).

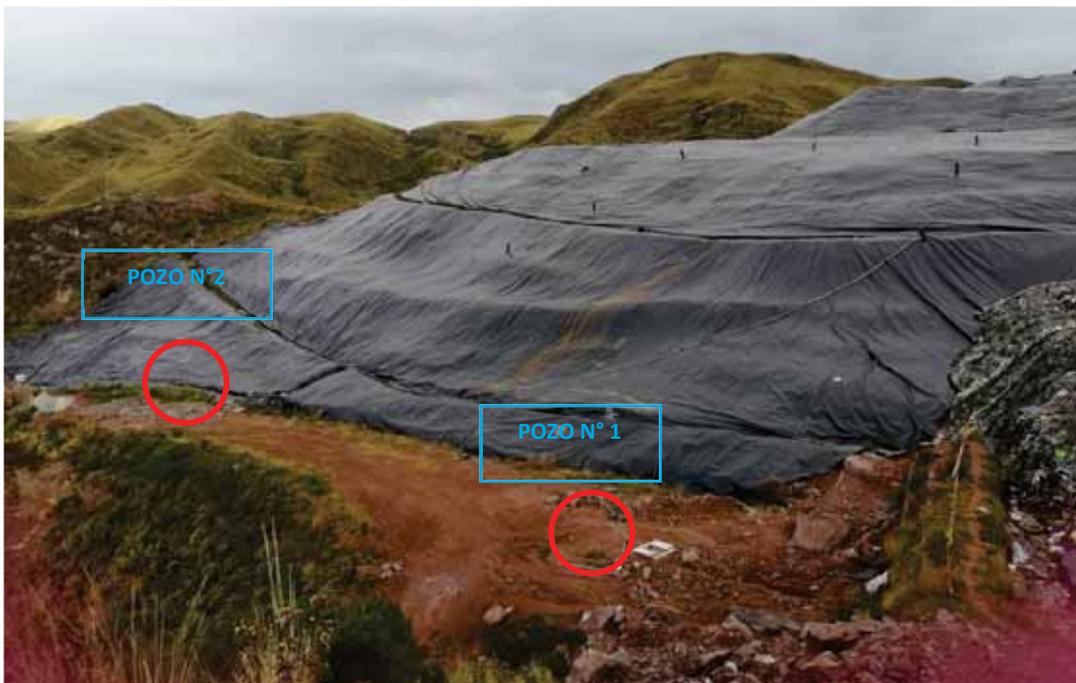


Imagen A.2 Ubicación de los pozos de lixiviado del relleno sanitario de Jaquira.

En la imagen A.3 y A.4 se muestra los pozos N°1 y N°2, para la captación de muestras del lixiviado nuevo y antiguo. La toma de muestras se realizó de acuerdo al protocolo de monitoreo ambiental de efluentes líquidos (APHA, 2005) ANEXO A. con muestra compuesta cualificada (Reutelshöfer y Guzmán, 2015, p. 13)



Imagen A.3 Toma de muestra del lixiviado nuevo (pozo N° 1)



Imagen A.4 Toma de muestra del lixiviado antiguo (pozo N° 2)

En la imagen A.5 muestra los instrumentos para la lectura de los parámetros en campo al momento de tomar la muestras según el Protocolo de monitoreo ambiental de efluentes líquidos (APHA, 2005) ANEXO A.

En la imagen A.6 se observa ambas muestras del lixiviado antiguo y nuevo a sí mismo el rotulado de frasco tabla A.1. El lixiviado siempre se recolectó en horas de la mañana y su utilización fue inmediata.



Imagen A.5. Caracterización del lixiviado



Imagen A.6. Muestras del lixiviado antiguo y nuevo

Tabla A.1. Etiqueta del rotulado de frasco para toma de muestras (elaboración propia)

ETIQUETA DE MUESTREO DE LIXIVIADO		
CÓDIGO: A-1	FECHA: 24/ 04/2018	HORA: 7:25 a.m.
LUGAR: Relleno Sanitario Jaquira.	N° POZO: 2	
TIPO DE MUESTRA: lixiviado	TEMPERATURA (°C): 20.1	
CONDUCTIVIDAD ($\mu\text{S/cm}$) : 27220	pH: 7.3	
RESPONSABLES: Mary Carmen Zambrano y Krizia Giovana Ninan.		

A.1.2. IMÁGENES DEL LIXIVIADO ANTES, DURANTE Y DESPUES DEL TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN.

En la figura A.7 se observa el lixiviado que está siendo tratado, generándose espuma oscura de lodos y en la figura A.8 se observa el lixiviado tratado (con una coloración clara) con generación de espuma más limpia.

Es importante resaltar la formación de gran cantidad de espuma durante la electrocoagulación del lixiviado, tal como se muestra en la figura A.8.

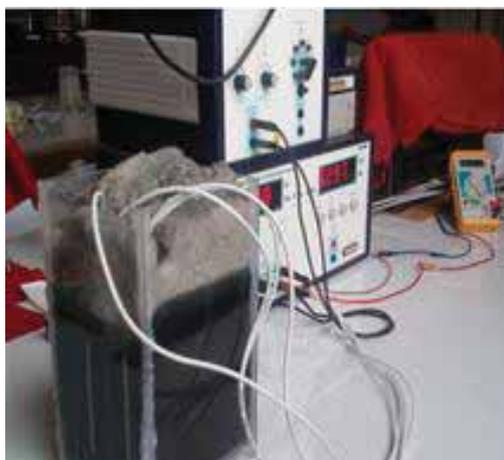


Imagen A.7 lixiviado inicial



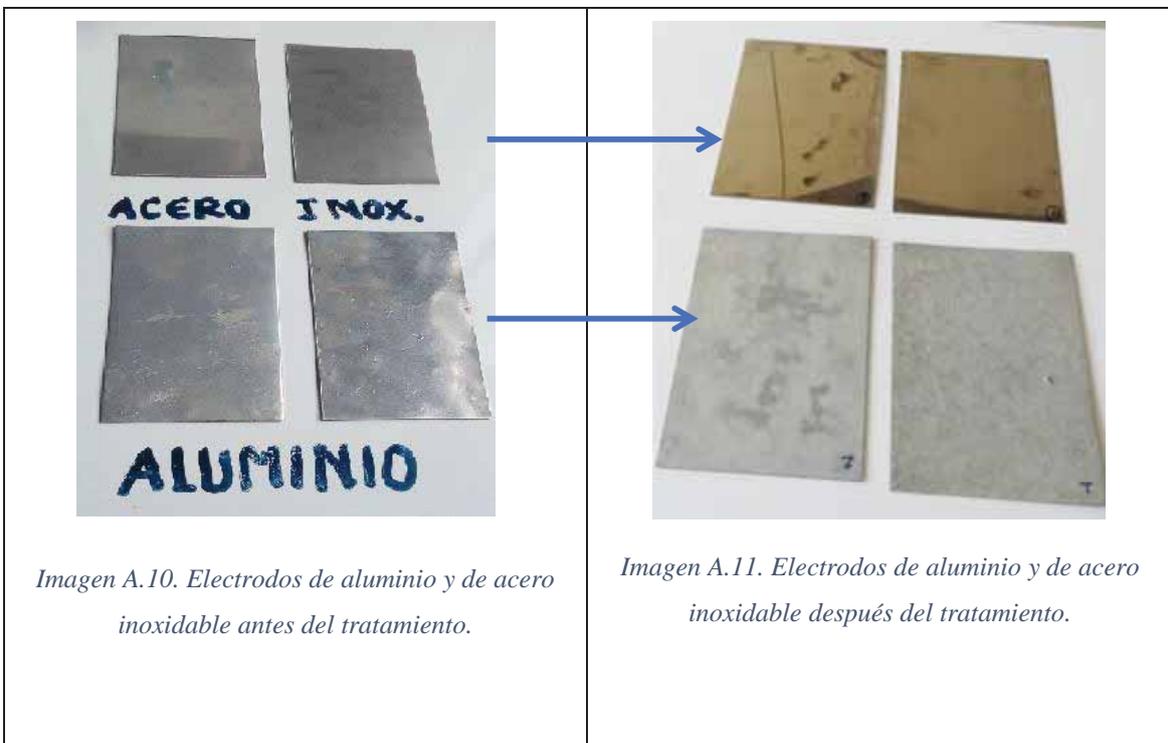
Imagen A.8 lixiviado tratado.

En la imagen A.9 se muestra el lixiviado tratado a diferentes tiempos observándose la aclaración de color según el tiempo.



En las imágenes A.10 y A.11 se muestra las placas antes y después del tratamiento, donde se puede ver las placas de aluminio con un desgaste y las placas de acero intactas.

En su forma más simple de un reactor de electrocoagulación cuando se conectan a una fuente de poder, el material del que está hecho el ánodo se corroe electroquímicamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo es sujeto de pasivación, Beagles (según Barrera, 2014, p.174); (Arango, 2005, p. 51).



A.2. FOTOS DEL ARMADO DE LA CUBA, TOMA DE MUESTRAS, OPERACIÓN, ANÁLISIS DE DBO₅, DQO Y TSS.

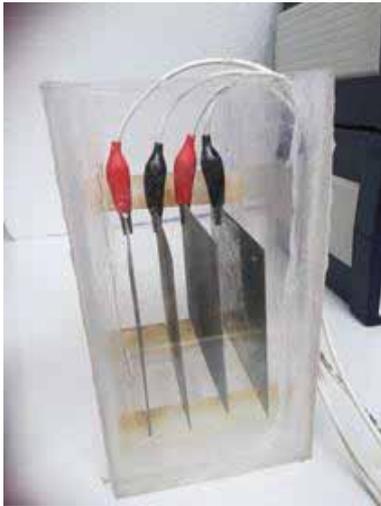


Imagen A.12. Cuba con electrodos separados por rendijas (Elaboración)

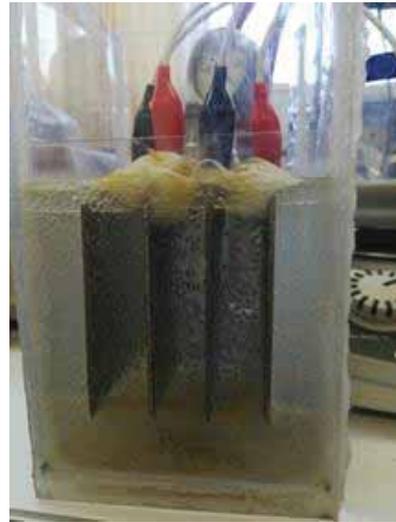


Imagen A.13. Pruebas exploratorias (Elaboración propia)



Imagen A.14. Toma de muestra del pozo.



Imagen A.15. Instalación del sistema de electrocoagulación



Imagen A.16. Arranque del sistema de electrocoagulación



Imagen A.17. Operación del sistema de electrocoagulación



Imagen A.18. Toma de muestra de la cuba electrolítica



Imagen A.19. Lixiviado después del tratamiento



Imagen A.20. Muestras de lixiviados tratados



Imagen A.21. Placas después del tratamiento



Imagen A.22. Filtros con muestras para los TSS.



Imagen A.23. Filtros en el desecador para su posterior peso.



Imagen A.24. Proceso de filtración de los TSS.



Imagen A.25. Muestras para la obtención de la DBO₅.



Imagen A.26. Muestras para la obtención de la DBO₅ después de 5 días.

APÉNDICE B.

B.1 CONCENTRACIÓN Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN PARA EL LIXIVIADO ANTIGUO DE LA DBO₅, DQO Y TSS. DISEÑO PRELIMINAR.

Tabla B1. Porcentaje de remoción de los ensayos preliminares para el lixiviado antiguo. (Elaboración propia)

Nº	PARÁMETROS			CONCENTRACIÓN			% REMOCIÓN		
	T (min)	Distancia entre electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	TSS (mg/l)	DBO ₅	DQO	TSS
1	0	0.5	1	1850	3920	2420	0.00	0.00	0.00
1	15	0.5	1	925	3840	2015	50.00	2.04	16.74
1	30	0.5	1	814	3840	1610	56.00	2.04	33.47
1	60	0.5	1	740	3760	1600	60.00	4.08	33.88
1	90	0.5	1	703	3680	1420	62.00	6.12	41.32
1	120	0.5	1	666	3680	1500	64.00	6.12	38.02
2	0	2	1	1850	3920	2420	0.00	0.00	0.00
2	15	2	1	888	3840	2080	52.00	2.04	14.05
2	30	2	1	740	3760	1870	60.00	4.08	22.73
2	60	2	1	703	3680	1820	62.00	6.12	24.79
2	90	2	1	666	3600	1800	64.00	8.16	25.62
2	120	2	1	629	3600	1770	66.00	8.16	26.86
3	0	0.5	10	2664	4720	3360	0.00	0.00	0.00
3	15	0.5	10	1258	4640	2125	52.78	1.69	36.76
3	30	0.5	10	666	4560	1730	75.00	3.39	48.51
3	60	0.5	10	629	4320	1640	76.39	8.47	51.19
3	90	0.5	10	592	4080	1495	77.78	13.56	55.51
3	120	0.5	10	592	3840	1380	77.78	18.64	58.93
4	0	2	10	2664	4720	3360	0.00	0.00	0.00
4	15	2	10	1480	4320	1830	44.44	8.47	45.54
4	30	2	10	703	4000	1780	73.61	15.25	47.02
4	60	2	10	666	3840	1420	75.00	18.64	57.74
4	90	2	10	629	3760	1405	76.39	20.34	58.18
4	120	2	10	555	3760	1380	79.17	20.34	58.93
5	0	1.25	5.5	2960	4808	3400	0.00	0.00	0.00
5	15	1.25	5.5	703	4344	1490	76.25	9.65	56.18
5	30	1.25	5.5	666	4228	1440	77.50	12.06	57.65
5	60	1.25	5.5	629	4170	1210	78.75	13.27	64.41
5	90	1.25	5.5	592	3996	860	80.00	16.89	74.71
5	120	1.25	5.5	518	3764	770	82.50	21.71	77.35

B.2. CONCENTRACIÓN Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN PARA EL LIXIVIADO NUEVO DE LA DBO₅, DQO Y TSS. DISEÑO PRELIMINAR.

Tabla B2. Porcentaje de remoción de los ensayos preliminares para el lixiviado nuevo. (Elaboración propia)

Nº	PARÁMETROS			CONCENTRACIÓN			% REMOCIÓN		
	T (min)	Distancia entre electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)	TSS (mg/l)	DBO ₅	DQO	TSS
1	0	0.5	1	3848	8720	1230	0.00	0.00	0.00
1	15	0.5	1	2442	8640	1100	36.54	0.92	10.57
1	30	0.5	1	2368	8560	1120	38.46	1.83	8.94
1	60	0.5	1	2294	8480	1090	40.38	2.75	11.38
1	90	0.5	1	2220	8400	1030	42.31	3.67	16.26
1	120	0.5	1	2146	8400	1020	44.23	3.67	17.07
2	0	2	1	3848	8720	1230	0.00	0.00	0.00
2	15	2	1	2294	8640	1210	40.38	0.92	1.63
2	30	2	1	2220	8560	1160	42.31	1.83	5.70
2	60	2	1	2146	8400	1150	44.23	3.67	6.50
2	90	2	1	2072	8400	1100	46.15	3.67	10.57
2	120	2	1	1998	8320	1110	48.08	4.59	9.76
3	0	0.5	10	3404	8480	1850	0.00	0.00	0.00
3	15	0.5	10	1850	8320	1270	45.65	1.89	31.35
3	30	0.5	10	1776	8160	1310	47.83	3.77	29.19
3	60	0.5	10	1628	8080	1180	52.17	4.72	36.22
3	90	0.5	10	1406	8000	1190	58.70	5.66	35.68
3	120	0.5	10	1332	7760	1000	60.87	8.49	45.95
4	0	2	10	3404	8480	1850	0.00	0.00	0.00
4	15	2	10	1776	8160	1240	47.83	3.77	32.97
4	30	2	10	1702	8000	1330	50.00	5.66	28.11
4	60	2	10	1480	7920	1260	56.52	6.60	31.89
4	90	2	10	1332	7840	1020	60.87	7.55	44.86
4	120	2	10	1258	7680	980	63.04	9.43	47.03
5	0	1.25	5.5	3256	7680	1160	0.00	0.00	0.00
5	15	1.25	5.5	1776	7600	1130	45.45	1.04	2.59
5	30	1.25	5.5	1480	7520	1120	54.55	2.08	3.45
5	60	1.25	5.5	1406	7440	1030	56.82	3.12	11.21
5	90	1.25	5.5	1332	7280	1010	59.09	5.21	12.93
5	120	1.25	5.5	1258	7040	1000	61.36	8.33	13.79

B.3. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO PARA EL DISEÑO PRELIMINAR

Tabla B3. Parámetros del lixiviado antiguo para el diseño preliminar. (Elaboración propia).

N°	Fecha	Dist. (cm)	Dens. (mA/cm ²)	PARÁMETROS ANTES DEL TRATAMIENTO			PARÁMETROS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (120 min)		
				Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)
1	28/04/2018	0.5	1	27220	7.3	20.1	25380	8	22.1
2	28/04/2018	2	1	27220	7.3	19.3	24220	7.6	21.9
3	24/04/2018	0.5	10	28840	7.4	18.6	23900	8.7	24.7
4	24/04/2018	2	10	28840	7.4	21.2	22440	8.9	30.15
5	30/04/2018	1.25	5.5	29260	7.4	19.7	25060	8.5	21.1

B.4. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO NUEVO PARA EL DISEÑO PRELIMINAR

Tabla B4. Parámetros del lixiviado nuevo para el diseño preliminar. (Elaboración propia).

N°	Fecha	Dist. (cm)	Dens. (mA/cm ²)	PARÁMETROS ANTES DEL TRATAMIENTO			PARÁMETROS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (120 min)		
				Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)
1	07/05/2018	0.5	1	31080.00	7.9	18.3	31080	8.2	18.5
2	07/05/2018	2	1	31080.00	7.9	21.1	31080	8.1	20.4
3	05/05/2018	0.5	10	30140.00	7.9	19.3	30140	8.1	32.4
4	05/05/2018	2	10	30140.00	8	21.9	30140	8.9	31.6
5	09/05/2018	1.25	5.5	29960.00	7.9	21.2	29960	8.7	27.6

B.5. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL FINAL

Tabla B5. Parámetros del lixiviado nuevo para el diseño experimental. (Elaboración propia).

N°	Fecha	Dist. (cm)	Dens. (mA/cm ²)	PARÁMETROS ANTES DEL TRATAMIENTO			PARÁMETROS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (120 min)		
				Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)
1	18/06/2018	0.5	1	28401	7.74	16.8	27800	7.98	16.2
2	18/06/2018	2	1	28401	7.74	18.2	27140	8.14	18.4
3	18/06/2018	0.5	10	28401	7.74	16.3	26360	8.36	20
4	18/06/2019	2	10	28400	8	20	26680	8	23
5	18/06/2018	1.25	5.5	28402	7.74	16.3	27300	8.19	17.1
6	18/06/2020	0.88	5.5	28402	7.74	15.1	27760	8.2	16.7
7	19/06/2018	1.25	3.25	28403	7.74	14.7	27180	8.29	16.2
8	19/06/2021	1.63	5.5	28403	7.74	14.2	27540	8.32	15.5
9	19/06/2018	1.25	7.75	28404	7.74	14	27500	8.39	15.7

B.6. CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN PARA LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

Las corridas N°1 y N°2, se realizaron el día 06 de julio del 2018.

CORRIDA N° 1 (distancia entre electrodo 2 cm y 10 mA/cm² de densidad de corriente):

Tabla B6-1. Determinación de la DBO₅ corrida N° 1. (Elaboración propia)

t (min)	Volúmenes gastados		OD inicial (mg/l)	OD final (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	% REMOCIÓN
	Inicial (ml)	Final (ml)				
0	2.4	2.75	7104	4070	3034	0.00
1.5	1.9	0.05	2812	37	2775	8.54
3	2.45	1.55	3626	1147	2479	18.29
8	1.4	0.05	2072	37	2035	32.93
15	2.2	2.35	3256	1739	1517	50.00
30	1.1	0.85	1628	629	999	67.07

CORRIDA N° 2:

Tabla B6-2. Determinación de la DBO₅ corrida N° 2. (Elaboración propia)

t (min)	Volúmenes gastados		OD inicial (mg/l)	OD final (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	% REMOCIÓN
	Inicial (ml)	Final (ml)				
0	2.4	2.75	7104	4070	3034	0.00
1.5	1.9	0.1	2812	74	2738	9.76
3	1.7	0.05	2516	37	2479	18.29
8	2.35	1.95	3478	1443	2035	32.93
15	2.25	2.4	3330	1776	1554	48.78
30	2.3	3.2	3404	2368	1036	65.85

Normalidad: 0.037

Dilución: 1:100

Alícuota: 40

B.7. CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN PARA LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Las corridas N°1 y N°2, se realizaron el día 06 de julio del 2018.

CORRIDA N° 1 Y 2. (Distancia entre electrodo 2 cm y 10 mA/cm² de densidad de corriente):

Tabla B7. Determinación de la DQO corrida N° 1 y 2. (Elaboración propia)

t (min)	CORRIDA N° 1			CORRIDA N° 2 (REPLICA)		
	Volumen gastado (ml)	DQO (mg/l)	% Remoción	Volumen gastado (ml)	DQO (mg/l)	% Remoción
0	1.45	5040	0.00	1.45	5040	0.00
10	1.55	4560	9.52	1.55	4560	9.52
20	1.60	4320	14.29	1.60	4320	14.29
40	1.70	3840	23.81	1.70	3840	23.81
80	1.80	3360	33.33	1.80	3360	33.33
120	1.85	3120	38.10	1.90	2880	42.86

Normalidad 0.12

B.8. CONCENTRACIÓN Y REMOCIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).

Las corridas N°1 y N°2, se realizaron el día 06 de julio del 2018.

CORRIDA N° 1 Y 2. (Distancia entre electrodo 2 cm y 10 mA/cm² de densidad de corriente):

Tabla B8. Determinación de los TSS corrida N° 1 y 2. (Elaboración propia)

t(min)	CORRIDA N° 1				CORRIDA N° 2 (REPLICA)			
	Filtro inicial (gr)	Filtro final (gr)	TSS (mg/L)	% remoción	Filtro inicial (gr)	Filtro final (gr)	TSS (mg/L)	% remoción
0	0.18	0.23	4520	0.00	0.1836	0.2288	4520	0.00
1.5	0.19	0.22	3090	31.64	0.1871	0.2144	2730	39.60
3	0.19	0.21	2220	50.88	0.1884	0.2135	2510	44.47
8	0.19	0.21	1800	60.18	0.1883	0.2122	2390	47.12
15	0.19	0.21	1700	62.39	0.1884	0.2117	2330	48.45

B.9. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO PARA LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DBO5 Y DQO.

Las corridas N°1 y N°2, se realizaron el día 06 de julio del 2018.

CORRIDA N° 1 Y 2. (Distancia entre electrodo 2 cm y 10 mA/cm² de densidad de corriente):

Tabla B9. Parámetros antes y después del tratamiento. (Elaboración propia)

N°	PARÁMETROS ANTES DEL TRATAMIENTO			PARÁMETROS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (30 min)			PARÁMETROS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO (120min)		
	Conductividad (µs/cm)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	pH	Temperatura (°C)
1	31480	7.72	21.6	31480	8.34	25	25760	9.3	35.2
2	31480	7.72	20.1	29989	8.31	22	27420	8.93	33.8

B.10. DETERMINACIÓN CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).

En el APENDICE B.10. Se determino el orden de reaccion para la DBO₅ y DQO.

Asi mismo se hicieron evaluaciones del comportamiento de la cinético de degradación de la DBO₅ y DQO para una reacción de primer orden, segundo orden y orden cero (ver APENDICE B.11.)

B.10.1. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) PARA SEGUNDO ORDEN DE REACCIÓN.

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A^2 \quad \text{Ec.4.1}$$

$$[k] = \text{dm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$$

Corrida N° 1:

$$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt \quad \text{Ec.B1}$$

Tabla B10-1. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DBO ₅](mg/l)	[DBO ₅](mol/l)	1/[DBO ₅](l/mol)	K (l/mol.min)	K(dm ³ /mol.s)
0	3034	0.1896	5.2736	0.3574	0.0060
1.5	2775	0.1734	5.7658		
3	2479	0.1549	6.4542		
8	2035	0.1272	7.8624		
15	1517	0.0948	10.5471		
30	999	0.0624	16.0160		

CÁLCULOS:

$$[DBO_5] \left(\frac{mol}{l} \right) = \frac{[DBO_5] \left(\frac{mg}{l} \right)}{16000 \left(\frac{mg}{mol} \right)} = \frac{3034}{16000} = 0.1896 \text{ mol/l} \quad \text{Ec.B2}$$

Corrida N°2

Tabla B10-2. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DBO ₅](mg/l)	[DBO ₅](mol/l)	1/[DBO ₅](l/mol)	K (l/mol.min)	K(dm ³ /mol.s)
0	3034	0.1896	5.2736	0.3364	0.0056
1.5	2738	0.1711	5.8437		
3	2479	0.1549	6.4542		
8	2035	0.1272	7.8624		
15	1554	0.0971	10.2960		
30	1036	0.0648	15.4440		

Graficamente la velocidad de reaccion puede expresarse como la relacion de la $1/[A]_0$ con respecto al tiempo. En la cual la pendiente nos dara el valor de la constante cinetica k.

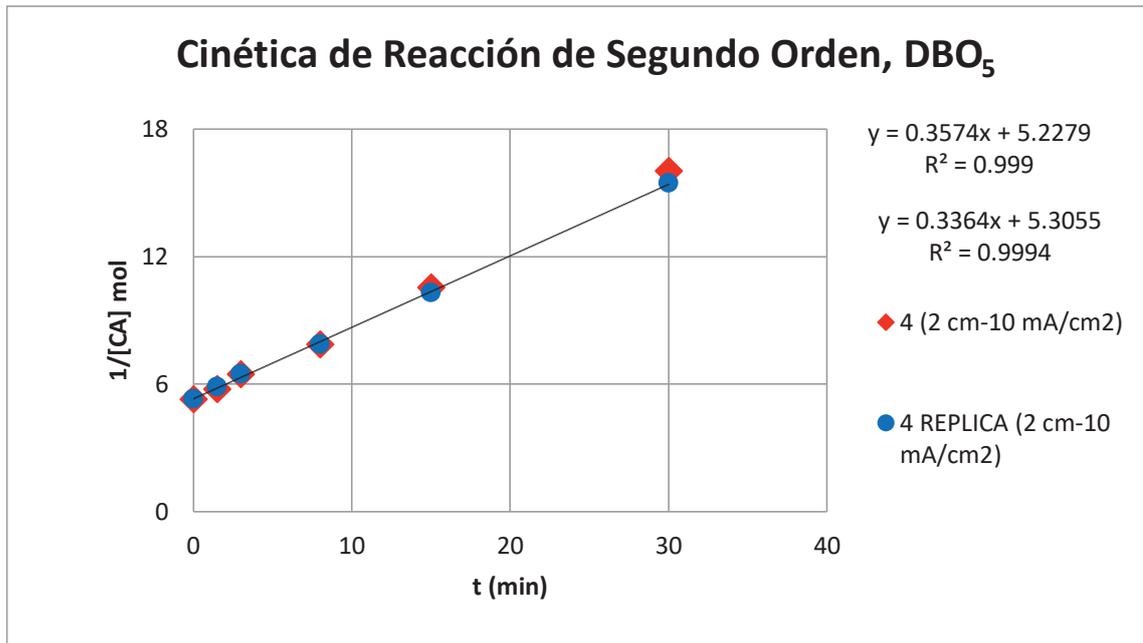


Grafico 4.19 Relación de concentración con respecto al tiempo. (Elaboración propia)

De la gráfica 4.19 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas.

Obteniendo como resultado la ecuacion cinetica siguiente:

$$-r_A = 0.3469 C_A^2 \text{ (l/mol * min)} \quad \text{Ec.4.2}$$

Al graficar $1/[A]_0$ en funcion al tiempo, se obtiene una linea recta por lo tanto la cinetica de reaccion es de segundo orden.

B.10.2. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA UN SEGUNDO ORDEN DE REACCIÓN.

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A^2 \quad \text{Ec.4.1}$$

$$[k] = \text{dm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$$

Corrida N° 1:

$$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt \quad \text{Ec.B1}$$

Tabla B10-3. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DQO](mg/l)	[DQO] (mol/l)	1/[DQO](l/mol)	K (l/mol.min)	K(dm³/mol.s)
0	5040	0.3150	3.1746	0.0160	0.0003
10	4560	0.2850	3.5088		
20	4320	0.2700	3.7037		
40	3840	0.2400	4.1667		
80	3360	0.2100	4.7619		
120	3120	0.1950	5.1282		

Corrida N°2

Tabla B10-4. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DQO](mg/l)	[DQO] (mol/l)	1/[DQO](l/mol)	K (l/mol.min)	K(dm³/mol.s)
0	5040	0.3150	3.1746	0.0190	0.0003
10	4560	0.2850	3.5088		
20	4320	0.2700	3.7037		
40	3840	0.2400	4.1667		
80	3360	0.2100	4.7619		
120	2880	0.1800	5.5556		

Graficamente la velocidad de reaccion puede expresarse como la relacion de la $1/[A]_0$ con respecto al tiempo. En la cual la pendiente nos dara el valor de la constante cinetica k.

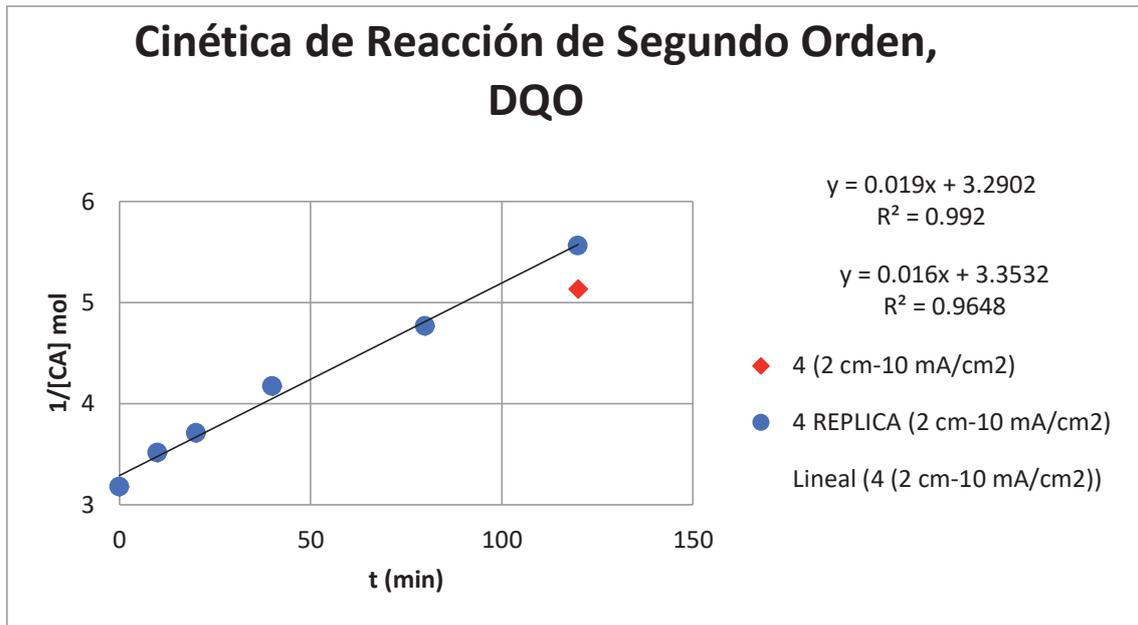


Grafico 4.20 Relación de concentración con respecto al tiempo. (Elaboración propia)

De la gráfica 4.20 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas. Obteniendo como resultado la ecuacion cinetica siguiente:

$$-r_A = 0.0175 C_A^2 \quad (l/mol*min) \quad Ec.4.4$$

Al graficar $1/[A]_0$ en funcion al tiempo, se obtiene una linea recta por lo tanto la cinetica de reaccion es de segundo orden.

B.11. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN PARA LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA UNA REACCIÓN DE PRIMER ORDEN Y ORDEN CERO.

B.11.1. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN PARA LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) PARA UNA REACCIÓN DE PRIMER ORDEN

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A \quad \text{Ec.B3}$$

$$[k] = 1/s$$

Corrida N° 1:

$$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt \quad \text{Ec.B4}$$

Tabla B11-1. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DBO ₅] (mol/l)	ln[DBO ₅]	K(1/min)	K(1/S)
0	0.1896	1.7	0.0366	0.0006
1.5	0.1734	1.8		
3	0.1549	1.9		
8	0.1272	2.1		
15	0.0948	2.4		
30	0.0624	2.8		

CÁLCULOS:

$$[DBO_5] \left(\frac{mol}{l} \right) = \frac{[DBO_5] \left(\frac{mg}{l} \right)}{16000 \left(\frac{mg}{mol} \right)} = \frac{3034}{16000} = 0.1896 \text{ mol/l} \quad \text{Ec.B5}$$

Corrida N°2

Tabla B11-2. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DBO ₅] (mol/l)	ln[DBO ₅]	K(1/min)	K(1/S)
0	0.1896	1.7	0.0351	0.0006
1.5	0.1711	1.8		
3	0.1549	1.9		
8	0.1272	2.1		
15	0.0971	2.3		
30	0.0648	2.7		

Graficamente la velocidad de reaccion puede expresarse como la relacion de la ln[CA] con respecto al tiempo. En la cual la pendiente nos dara el valor de la constante cinetica k.

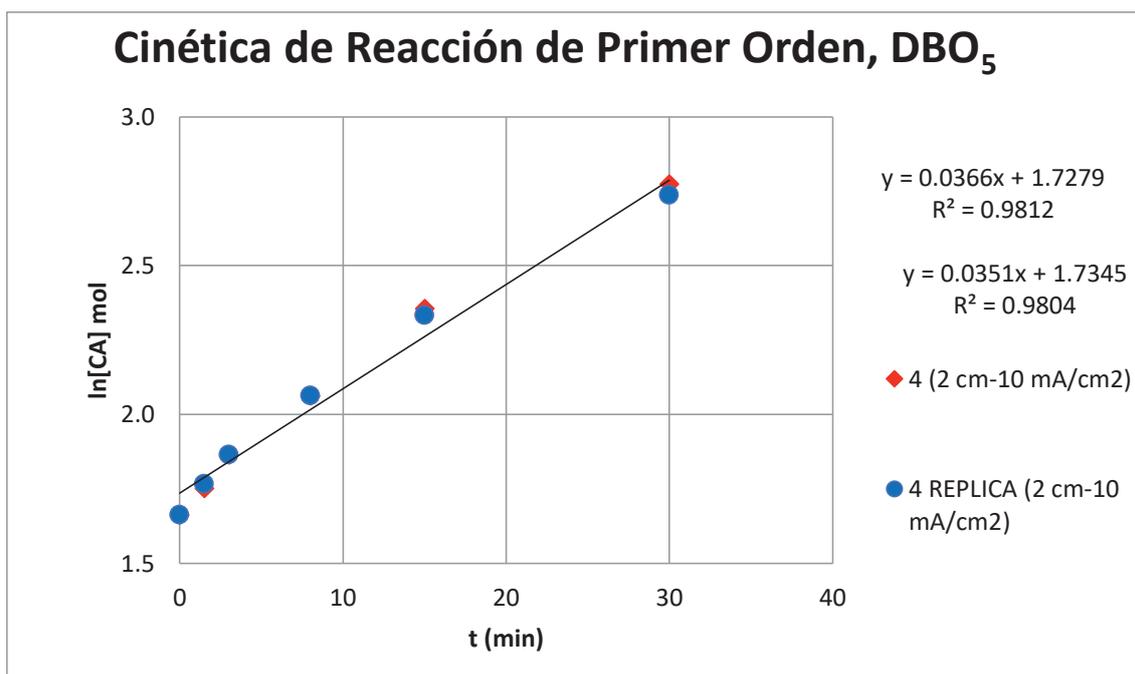


Gráfico 4.19 Relación de concentración con respecto al tiempo. (Elaboración propia)

De la gráfica 4.19 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas.

Obteniendo como resultado la ecuación cinética siguiente:

$$-r_A = 0.0358 C_A \text{ (1/min)} \quad \text{Ec.B6}$$

Al graficar $1/[A]_0$ en función al tiempo, se obtiene una línea recta por lo tanto la cinética de reacción es de segundo orden.

B.11.2. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN PARA LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅) PARA UNA REACCIÓN DE ORDEN CERO.

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A^0 = k_A \quad \text{Ec.B7}$$

$$[k] = \text{mol/ dm}^3 \cdot \text{s}$$

Corrida N° 1:

$$[A] = [A]_0 - kt \quad \text{Ec.B8}$$

Tabla B11-3. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DBO ₅] (mol/l)	K(mol/l*min)	K(mol/ dm ³ *s)
0.0	0.2	0.0041	0.0001
1.5	0.2		
3.0	0.2		
8.0	0.1		
15.0	0.1		
30.0	0.1		

CÁLCULOS:

$$[DBO_5] \left(\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right) = \frac{[DBO_5] \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right)}{16000 \left(\frac{\text{mg}}{\text{mol}} \right)} = \frac{3034}{16000} = 0.1896 \text{ mol/l} \quad \text{Ec.B9}$$

Corrida N°2

Tabla B11-4. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DBO ₅] (mol/l)	K(mol/l*min)	K(mol/dm ³ *s)
0.0	0.2	0.0040	0.0001
1.5	0.2		
3.0	0.2		
8.0	0.1		
15.0	0.1		
30.0	0.1		

Graficamente la velocidad de reaccion puede expresarse como la relacion de la [CA] con respecto al tiempo. En la cual la pendiente nos dara el valor de la constante cinetica k.

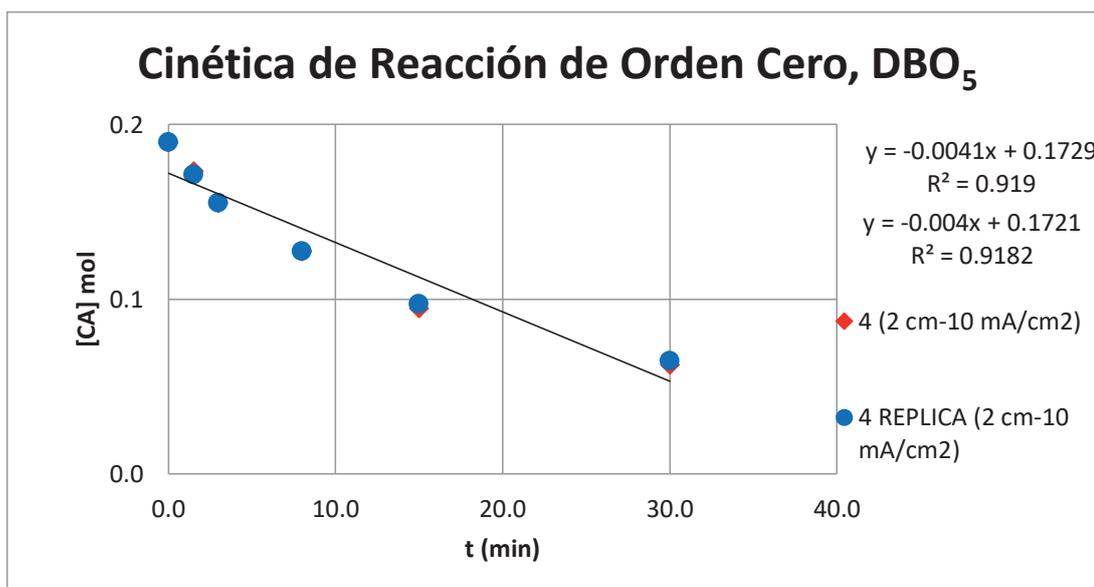


Grafico 4.19 Relación de concentración con respecto al tiempo. (Elaboración propia)

De la gráfica 4.19 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas.

Obteniendo como resultado la ecuación cinética siguiente:

$$-r_A = 0.0040 \text{ (mol/l * min)} \quad \text{Ec.B10}$$

Al graficar $1/[A]_0$ en función al tiempo, se obtiene una línea recta por lo tanto la cinética de reacción es de segundo orden.

B.11.3. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA UNA REACCIÓN DE PRIMER ORDEN.

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A \quad \text{Ec.B3}$$

$$[k]= 1/s$$

Corrida N° 1:

$$\ln[A] = \ln[A]_0 - kt \quad \text{Ec.B4}$$

Tabla B11-5. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DQO] (mol/l)	ln[DQO]	K(1/min)	K(1/S)
0	0.3150	1.2	0.0039	0.0001
10	0.2850	1.3		
20	0.2700	1.3		
40	0.2400	1.4		
80	0.2100	1.6		
120	0.1950	1.6		

Corrida N°2

Tabla B11-6. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DQO] (mol/l)	ln[DQO]	K(1/min)	K(1/S)
0	0.3150	1.2	0.0044	0.0001
10	0.2850	1.3		
20	0.2700	1.3		
40	0.2400	1.4		
80	0.2100	1.6		
120	0.1800	1.7		

Graficamente la velocidad de reaccion puede expresarse como la relacion de la $\ln[CA]$ con respecto al tiempo. En la cual la pendiente nos dara el valor de la constante cinetica k .

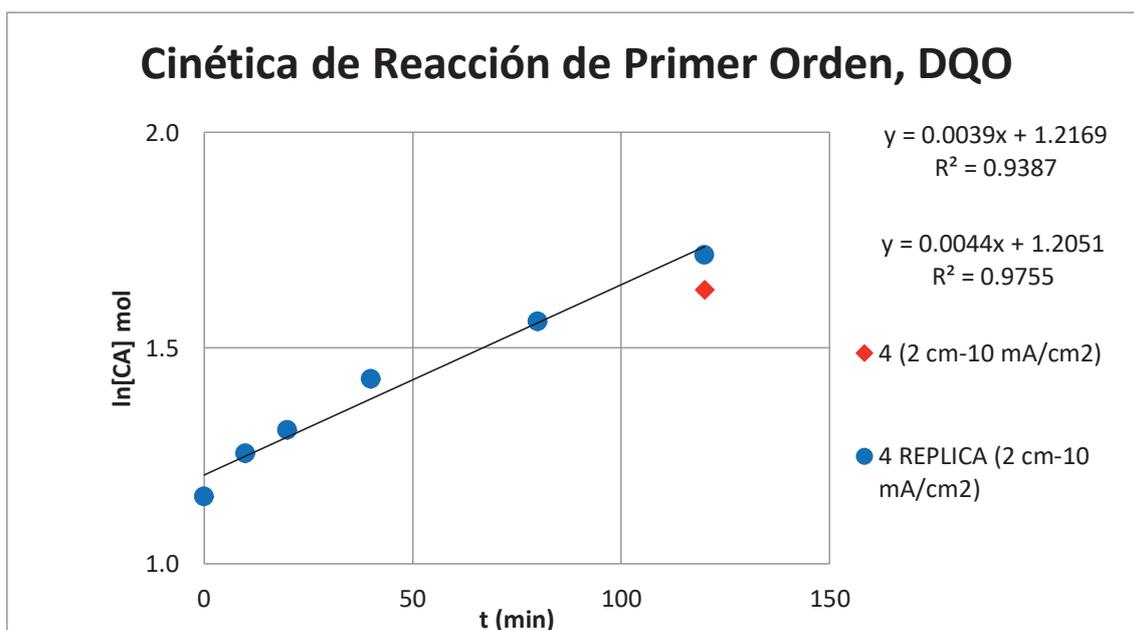


Gráfico 4.20 Relación de concentración con respecto al tiempo. (Elaboración propia)

De la gráfica 4.20 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas.

Obteniendo como resultado la ecuación cinética siguiente:

$$-r_A = 0.0042 C_A \quad (1/min) \quad \text{Ec.B11}$$

Al graficar $1/[A]_0$ en función al tiempo, se obtiene una línea recta por lo tanto la cinética de reacción es de segundo orden.

B.11.4. CINÉTICA DE DEGRADACIÓN PARA LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) PARA UNA REACCIÓN DE ORDEN CERO.

Expresión:

$$-r_A = k_A C_A^0 = k_A \quad \text{Ec.B7}$$

$$[k] = \text{mol/dm}^3 \cdot \text{s}$$

Corrida N° 1:

$$[A] = [A]_0 - kt \quad \text{Ec.B8}$$

Tabla B11-7. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DQO] (mol/l)	K(mol/l*min)	K(mol/dm³*s)
0.0	0.3	0.0009	0.00002
10.0	0.3		
20.0	0.3		
40.0	0.2		
80.0	0.2		
120.0	0.2		

Corrida N°2

Tabla B11-8. Cálculos para obtención de la constante de equilibrio K y orden de reacción. (Elaboración propia)

t (min)	[DQO] (mol/l)	K(mol/l*min)	K(mol/dm ³ *s)
0.0	0.3	0.0010	0.00002
10.0	0.3		
20.0	0.3		
40.0	0.2		
80.0	0.2		
120.0	0.2		

Graficamente la velocidad de reaccion puede expresarse como la relacion de la [CA] con respecto al tiempo. En la cual la pendiente nos dara el valor de la constante cinetica k.

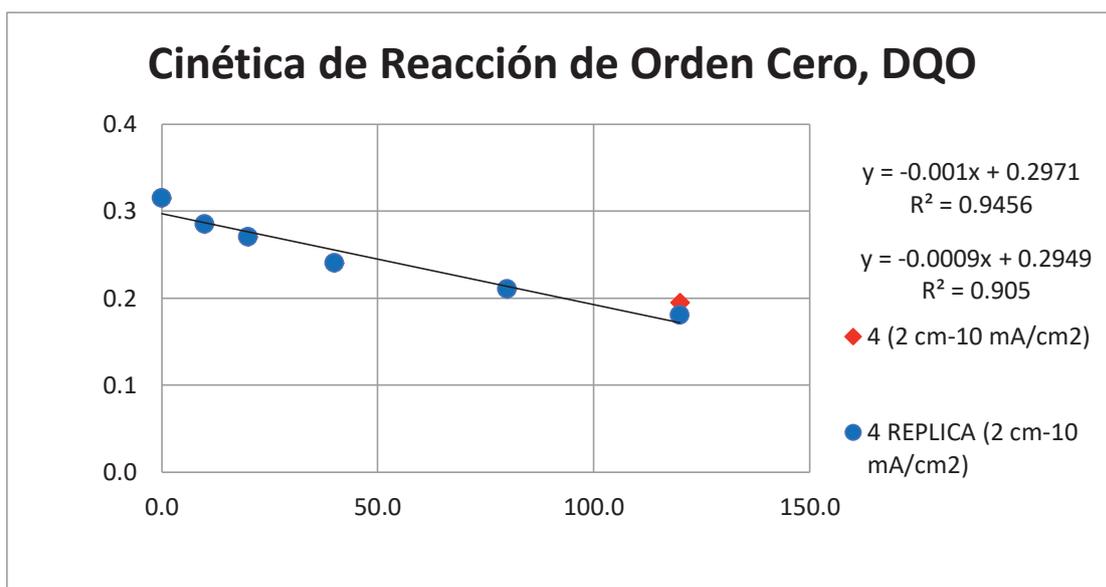


Gráfico 4.20 Relación de concentración con respecto al tiempo. (Elaboración propia)

De la gráfica 4.20 se obtiene la constante de velocidad promedio de las dos corridas.

Obteniendo como resultado la ecuación cinética siguiente:

$$-r_A = 0.0010 \text{ (mol/l*s)}$$

Ec.B12

Al graficar [CA] en función al tiempo, se obtiene una línea recta por lo tanto la cinética de reacción es de segundo orden.

B.12. PARÁMETROS: CONDUCTIVIDAD, pH Y TEMPERATURA DEL LIXIVIADO ANTIGUO DEL DISEÑO PRELIMINAR

Tabla B12. Parámetros de operación al inicio y al final del tratamiento de un tiempo de 120 minutos
(Elaboración propia)

N°	PARÁMETROS						CONCENTRACION				% REMOCIÓN		
	T (min)	Dist. (cm)	Dens. (mA/cm ²)	Conductividad (μs/cm)	pH	Temperatura (°C)	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	DBO5	DQO	SST	
1	0	0.5	1	27220.00	7.3	20.1	1850	3920	2420	0.00	0.00	0.00	
1	120	0.5	1	25380.00	8	22.1	666	3680	1500	64.00	6.12	38.02	
2	0	2	1	27220.00	7.3	19.3	1850	3920	2420	0.00	0.00	0.00	
2	120	2	1	24220.00	7.6	21.9	629	3600	1770	66.00	8.16	26.86	
3	0	0.5	10	28840.00	7.4	18.6	2664	4720	3360	0.00	0.00	0.00	
3	120	0.5	10	23900.00	8.7	24.7	592	3840	1380	77.78	18.64	58.93	
4	0	2	10	28840.00	7.4	21.2	2664	4720	3360	0.00	0.00	0.00	
4	120	2	10	22440.00	8.9	30.15	555	3760	1380	79.17	20.34	58.93	
5	0	1.25	5.5	29260.00	7.4	19.7	2960	4808	3400	0.00	0.00	0.00	
5	120	1.25	5.5	25060.00	8.5	21.1	518	3764	770	82.50	21.71	77.35	
6	0	0.875	5.5	27420.00	7.4	18.8	2400	4650	3100	0.00	0.00	0.00	
6	120	0.875	5.5	24600.00	8.5	25.4	650	3880	1070	72.92	16.56	65.48	
7	0	1.25	3.25	30220.00	7.7	18.3	3108	5070	3870	0.00	0.00	0.00	
7	120	1.25	3.25	27800.00	8.1	22.4	814	4212	1280	73.81	16.92	66.93	
8	0	1.625	5.5	30220.00	7.7	18.9	3108	5070	3870	0.00	0.00	0.00	
8	120	1.625	5.5	26100.00	8.5	22.5	777	4146	950	75.00	18.22	75.45	
9	0	1.25	7.75	29260.00	7.4	17.9	2960	4808	3400	0.00	0.00	0.00	
9	120	1.25	7.75	24800.00	8.6	27.1	555	3822	760	81.25	20.51	77.65	

B.13. DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LA REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅), DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (TSS).

Desviación estándar para los parámetros de remoción de DBO₅, DQO y TSS para el diseño experimental final 2^K con 5 réplicas en el punto central. (Discovski, 2008, p. 28)

Tabla B13.1. Determinación de la desviación estándar y t de student para la DBO₅

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial DBO ₅ (mg/l)	Concentración final DBO ₅ (mg/l) 30min	%Remoción DBO ₅
1	18/06/2018	0.5	1	2516	1147	54.41
2	18/06/2018	2	1	2516	1110	55.88
3	18/06/2018	0.5	10	2516	888	64.71
4	18/06/2019	2	10	2516	777	69.12
5	18/06/2018	1.25	5.5	2516	1036	58.82
6	18/06/2020	1.25	5.5	2516	1147	54.41
7	19/06/2018	1.25	5.5	2516	1110	55.88
8	19/06/2021	1.25	5.5	2516	1073	57.35
9	19/06/2018	1.25	5.5	2516	1073	57.35

Calculo de la varianza de la muestra:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n} = \frac{58.82+54.41+55.88+57.35+57.35}{5} = 56.762 \quad \text{Ec.B13}$$

$$S^2 = \frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Ec.B14}$$

$$S^2 = \frac{(58.82 - 56.76)^2 + (54.41 - 56.76)^2 + (55.88 - 56.76)^2 + (57.35 - 56.76)^2 + (57.35 - 56.76)^2}{5 - 1} \quad \text{Ec.B15}$$

$$S^2 = 2.809 \quad \text{Ec.B16}$$

S^2 : Varianza.

\bar{X} : Media.

n : número de muestras.

X : muestras.

Calculo de la desviación estándar:

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec.B17}$$

$$S = \sqrt{2.809} = 1.676 \quad \text{Ec.B18}$$

Grado de libertad: $v = n - 1 = 5 - 1 = 4$

Para un nivel de confianza: $1 - \alpha = 95\%$.

$$\alpha = -0.95 + 1 = 0.05 \quad \text{Ec.B19}$$

α : nivel de significación

Calculo de intervalo de confianza:

$$\mu = \bar{X} \pm t * \frac{S}{\sqrt{n - 1}} \quad \text{Ec.B20}$$

$$\mu = 56.762 \pm * 2.132 * \frac{1.676}{\sqrt{4}} = 56.762 \pm 1.787 \quad \text{Ec.B21}$$

t : t de student, obtenemos de la tabla de distribución student para 4 grados de libertad y para un nivel de significación de 0.05 , $t = 2.132$ (Ayala y Pardo, 1995), para sustituir en el intervalo de confianza (Discovski, 2008, p. 73)

$$54.975 \leq \mu \leq 58.549 \quad \text{Ec.B22}$$

Tabla B13.2. Determinación de la desviación estándar y t de student para la DQO

N°	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Concentración inicial DQO (mg/l)	Concentración final DQO (mg/l) 30min	%Remoción DQO
1	18/06/2018	0.5	1	5018	4800	4.35
2	18/06/2018	2	1	5018	4582	8.7
3	18/06/2018	0.5	10	5018	3491	30.43
4	18/06/2019	2	10	5018	3273	34.78
5	18/06/2018	1.25	5.5	5018	4364	13.04
6	18/06/2020	1.25	5.5	5018	4364	13.04
7	19/06/2018	1.25	5.5	5018	4145	17.39
8	19/06/2021	1.25	5.5	5018	3927	21.74
9	19/06/2018	1.25	5.5	5018	3709	26.09

Calculo de la varianza de la muestra:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n} = \frac{13.04+13.04+17.39+21.74+26.09}{5} = 18.26 \quad \text{Ec.B23}$$

$$S^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Ec.B14}$$

$$S^2 = \frac{(13.04 - 18.26)^2 + (13.04 - 18.26)^2 + (17.39 - 18.26)^2 + (21.74 - 18.26)^2 + (26.09 - 18.26)^2}{5 - 1} \quad \text{Ec.B24}$$

$$S^2 = 32.168 \quad \text{Ec.B25}$$

Calculo de la desviación estándar:

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec.B17}$$

$$S = \sqrt{32.168} = 5.672 \quad \text{Ec.B26}$$

Grado de libertad: $v = n - 1 = 5 - 1 = 4$

Para un nivel de confianza: $1 - \alpha = 95\%$

$$\alpha = -0.95 + 1 = 0.05 \quad \text{Ec.B27}$$

Calculo de intervalo de confianza:

$$\mu = \bar{X} \pm t * \frac{S}{\sqrt{n - 1}} \quad \text{Ec.B20}$$

$$\mu = 18.26 \pm * 2.132 * \frac{5.672}{\sqrt{4}} = 18.26 \pm 6.046 \quad \text{Ec.B28}$$

t : t de student, obtenemos de la tabla de distribución student para 4 grados de libertad y para un nivel de significación de 0.05 , $t = 2.132$.

$$12.214 \leq \mu \leq 24.306 \quad \text{Ec.B29}$$

Tabla B13.3. Determinación de la desviación estándar y t de student para los TSS.

Nº	Fecha	Distancia de electrodos (cm)	Densidad de corriente (mA/cm2)	Concentración inicial TSS (mg/l)	Concentración final TSS (mg/l) 30min	%Remoción TSS
1	18/06/2018	0.5	1	4040	2040	49.5
2	18/06/2018	2	1	4040	1600	60.4
3	18/06/2018	0.5	10	4040	1800	55.45
4	18/06/2019	2	10	4040	1190	70.54
5	18/06/2018	1.25	5.5	4040	1770	56.19
6	18/06/2020	1.25	5.5	4040	1650	59.16
7	19/06/2018	1.25	5.5	4040	2130	47.28
8	19/06/2021	1.25	5.5	4040	2290	43.32
9	19/06/2018	1.25	5.5	4040	1830	54.7

Calculo de la varianza de la muestra:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n} = \frac{56.19+59.16+47.28+43.32+54.7}{5} = 52.13 \quad \text{Ec.B30}$$

$$S^2 = \frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Ec.B14}$$

$$S^2 = \frac{(56.19 - 52.13)^2 + (59.16 - 52.13)^2 + (47.28 - 52.13)^2 + (43.32 - 52.13)^2 + (54.7 - 52.13)^2}{5 - 1} \quad \text{Ec.B31}$$

$$S^2 = 43.412 \quad \text{Ec.B32}$$

Calculo de la desviación estándar:

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec.B17}$$

$$S = \sqrt{43.412} = 6.589 \quad \text{Ec.B33}$$

Grado de libertad: $v = n - 1 = 5 - 1 = 4$

Para un nivel de confianza: $1 - \alpha = 95\%$

$$\alpha = -0.95 + 1 = 0.05 \quad \text{Ec.B34}$$

α : nivel de significación

Calculo de intervalo de confianza:

$$\mu = \bar{X} \pm t * \frac{S}{\sqrt{n - 1}} \quad \text{Ec.B20}$$

$$\mu = 52.13 \pm * 2.132 * \frac{6.589}{\sqrt{54}} = 52.13 \pm 7.024 \quad \text{Ec.B35}$$

t : t de student, obtenemos de la tabla de distribución student para 4 grados de libertad y para un nivel de significación de 0.05 , $t = 2.132$.

$$45.106 \leq \mu \leq 59.154 \quad \text{Ec.B36}$$

ANEXOS

ANEXO A. TOMA DE MUESTRAS

Recolección de las Muestras, Cuando se recolectan las muestras para todo tipo de análisis de agua es necesario adoptar todas las precauciones para que sea representativa la muestra que se desea estudiar y evitar la contaminación accidental durante las operaciones de muestreo.

Las formas de toma de muestras influyen mucho sobre los resultados del análisis y por consiguiente es importante que los encargados de esta maniobra estén debidamente capacitados.

El siguiente cuadro ayudará en la toma de muestras:

Tabla A1. Agrupaciones de muestras recomendadas para la recolección de muestras (APHA, 2005).

VOLUMEN RECIPIENTE	AGENTE DE PRESERVACIÓN	TIPO RECIPIENTE	PUEDA USARSE PARA
1-3 litros dependiendo del número de parámetros a ser analizados.	Refrigeración a 4°C.	Plástico o vidrio.	Acidez. Alcalinidad. DBO ₅ . Cloruro. Fluoruro. Dureza (Ca, Mg). Agentes activos Superficiales. Nitrito. Fósforo total. Residuo. Conductancia específica. Sulfato. Turbiedad.
1-2 litros dependiendo del número de parámetros a ser analizados.	Frio, 4°C, H ₂ SO ₄ a pH 2.	Vidrio.	DQO. Nitrógeno. -Amoniacó. -Kjeldahl total. -Nitrató. Aceite y grasa. Carbono orgánico Fósforo hidrolizable.
200ml-2 litros Dependiendo del número de parámetros metálicos a ser analizados	HNO ₃ a Ph	Plástico o vidrio (preferible plástico)	Metales.

ANEXO B. CARACTERIZACIÓN FÍSICA-QUÍMICA DE LA MUESTRA.

B.1. REMOCIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅).

Método de análisis de DBO₅ Winkler, Método estándar.

PRINCIPIO DE LA DETERMINACIÓN DE LA DBO₅

La prueba consistió en la determinación del oxígeno disuelto (OD), antes y después del período de incubación a 20°C. El período usual de incubación es de 5 días.

La demanda de Oxígeno de la muestra es mayor que la cantidad de Oxígeno disuelto, se hizo una dilución.

El procedimiento usual es llevar la muestra a temperatura de 20°C y airearla previamente para incrementar o decrecer el contenido de gas disuelto de la muestra cerca de saturación. Entonces dos o más botellas de DBO₅ se llenan con la muestra; por lo menos en una se analiza el OD inmediatamente y las otras se incuban por 5 días a 20°C. Después de 5 días se determina la cantidad de OD que permanecen en las muestras incubadas y se calcula el DBO₅ a 5 días por diferencia de los resultados.

El agua de dilución.

Se utilizó aguas de manante, por tener las sales disueltas propias de ríos naturales que a su vez son nutrientes para los microorganismos que actúan en la degradación de la materia orgánica, además no contienen cloro residual como es el caso del agua potable.

PROCEDIMIENTO

Se ha tomado 3 ml de muestra del lixiviado, y se ha diluido a 600 ml (1:200).

Otras muestras han sido diluidas 1:50, dependiendo de la concentración de la materia orgánica en la muestra del lixiviado.

Para determinar el oxígeno disuelto (OD) se ha seguido los siguientes pasos:

- Se emplea un frasco de boca angosta de tapón de cristal de 250 mL
- Se toma la muestra completamente lleno.
- Se quita el tapón del frasco y con una pipeta graduada se agrega 2 mL de sulfato manganoso, se agita invirtiendo el recipiente.
- Se agrega del mismo modo 2 ml de solución álcali-ioduro nitrato, se vuelve agitar.

- Mezclar convenientemente invirtiendo el recipiente.
- Se quita el tapón y se agrega H₂SO₄ concentrado hasta la disolución completa.
- Transferir un volumen determinado (20 ml de alícuota) y titular con Tiosulfato de sodio utilizando indicador de almidón.

CÁLCULOS:

$$\frac{X * 1N}{8} = \frac{(V_g * N)}{X_g} \quad \text{Ec.AB.1}$$

$$DBO_5 = \left(\frac{\frac{8mg}{ml} * \left(\frac{1000ml}{L} \right) * (0.9ml) * 0.037 N}{20 ml * 1N} \right) * 200 \quad \text{Ec.AB.2}$$

$$DBO_5 = 2664 \frac{mg}{l} \quad \text{Ec.AB.3}$$

Dónde:

DBO₅ = X_g = Demanda bioquímica de oxígeno

V_g = volumen gastado del titulante (Tiosulfato de sodio), (OD_i - OD_f)

N = Normalidad Tiosulfato de sodio (Na₂S₂O₄) 0.0375N

X = Volumen de muestra (ml).

MÉTODO WINKLER

Fundamento

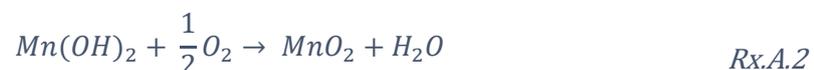
Las reacciones base de la determinación envueltas en el método de Winkler son las siguientes:

- a) El MnSO₄ que se agrega a la muestra de agua forma un precipitado blanco de:



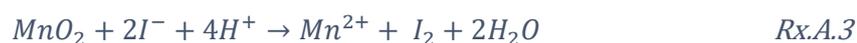
K_{ps} = 4 x 10⁻¹⁴

- b) Luego se agrega el Ioduro alcali (NaOH + KI) que intensifica la reacción y se produce la oxidación del manganeso de la siguiente manera:



La oxidación del Mn^{2+} a MnO_2 algunas veces llamada fijación del Oxígeno, ocurre lentamente, en especial a bajas temperaturas. Una agitación de la muestra por lo menos de 30 segundos es necesaria. En el caso de aguas salobres o aguas de mar se requiere mayor tiempo de contacto.

Después de sacudir la muestra por un tiempo suficiente para permitir a todo el oxígeno a reaccionar, luego se añade ácido sulfúrico que permite la oxidación del manganeso la cual ocurre en un medio fuertemente ácido.



Como se puede observar el Iodo libre desprendido es equivalente al oxígeno fijado en la reacción anterior.

La muestra debe ser tapada y agitada vigorosamente por lo menos 10 segundos para permitir que la reacción se complete y para distribuir el yodo uniformemente en toda muestra.

Finalmente, la muestra está lista para titular el I_2 desprendiendo con tiosulfato de sodio 0.025N utilizando indicador de almidón.

REACTIVOS:

Solución de Sulfato Manganoso.

- Pesar 480 g $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ ó 400g $MnSO_4 \cdot 2H_2O$ ó 360 g de $MnSO_4 \cdot H_2O$
- Disolver a 1000 mL.

Solución Alkali-Yoduro-Nitruro

- Pesar 500 g de NaOH, disolver en 600mL de agua.
- Pesar 150 g de KI, disolver en 150 mL de agua.
- Pesar 10 g de Nitruro de sodio y disolver en 150 mL de agua.
- Mezclar las 3 soluciones con agitación constante y transferir a una probeta de 1000ml.
- Guardar en un frasco oscuro.

Solución de Tiosulfato 0.0375 N

- Pesar 9.37 g de tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ grado reactivo.
- Disolver y aforar a un litro.
- Para preservar se adiciona 0.4 g de NaOH.

H_2SO_4 Concentrado.

Solución Indicadora de Almidón. (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 1978)
(Vogel , 1960, p. 466)

B.2. REMOCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO).

PRINCIPIO DE LA DETERMINACIÓN.

La DQO no varía con la misma tendencia de remoción, entendemos que la materia orgánica suspendida (incluye color) difícilmente se flocula, no es igual que la arcilla en turbidez de ríos.

MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA DQO.

El método de reflujó con dicromato ha sido seleccionado para efectuar esta prueba debido a las ventajas que el dicromato tiene sobre otros oxidantes tales como su poder oxidante y su fácil aplicación a una amplia variedad de muestras.

PROCEDIMIENTO

- Se ha tomado 0.2ml de muestra (dilución: 1:50), se agregó 3 ml de KMnO_4 y 1.5 ml de H_2SO_4 .
- Se ha digerido a 150 °C durante 2 horas en reflujó.
- Se enfrió y agregar indicador ferroina 3 gotas.
- Por último, se titular con $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$.

$$\frac{X}{8} = \frac{(V_a - V_b)}{DQO}$$

Ec.AB.4

CÁLCULOS

$$DQO \text{ mg/L} = \frac{(V_a - (V_g * N)) * 8 * 1000}{X} \quad \text{Ec.AB.5}$$

$$DQO \text{ mg/L} = \frac{(0.3 \text{ ml} - (4.55 \text{ ml} * 0.04)) * 8 \text{ mg/ml} * 1000 \text{ ml/L}}{0.2 \text{ ml}} \quad \text{Ec.AB.6}$$

$$DQO = 4720 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \quad \text{Ec.AB.7}$$

Dónde:

DQO = demanda química de oxígeno.

V_a = ml de Fe (NH₄)₂(SO₄)₂ usado para titular el blanco. (Cte=0.03).

V_b = ml de Fe (NH₄)₂(SO₄)₂ usado para titular la muestra (volumen gastado*N).

N = Normalidad del Fe (NH₄)₂(SO₄). 0.04.

X = Volumen de muestra (ml). (Jimeno Blasco, 1998, p. 187).

B.3. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

PRINCIPIO DE LA DETERMINACIÓN.

En los análisis de sólidos que se encuentran en el agua, se consideran varias clases de sólidos presentes: Sólidos disueltos, suspendidos, volátiles y fijos.

En el agua potable, la mayor parte de la materia está en forma disuelta y consiste principalmente en sales inorgánicas, pequeñas cantidades de materia orgánica y gases disueltos.

El contenido total de sólidos disueltos que tienen las aguas varía generalmente de 20 a 1000 mg/litro y como es de esperar, la dureza del agua se incrementa con los sólidos totales disueltos.

MÉTODO DE ANÁLISIS DE LOS SST.

Procedimiento de análisis Método 2540 - A:

Sólidos Suspendidos (muestra filtrada usando una bomba de presión).

- Se pesó el filtro (previamente secado hasta peso constante o durante una hora a 105°C, y se enfría en el desecador por 15 min).
- Se tomó 10ml de la muestra y se filtró utilizando la bomba de presión.
- Se llevó el filtro a la estufa a una temperatura de 105°C y se dejó por una hora.
- Se pasó al desecador y se dejó enfriar durante 15 min.
- Se pesó el filtro con el residuo. (APHA, 2005).

Sólidos suspendidos = (peso de filtro con residuo seco – peso de filtro vacío) /volumen de muestra.

$$TSS = \frac{(W_{filtro\ inicial} - W_{filtro\ final}) * 1000}{V_g} \quad Ec.AB.8$$

CÁLCULOS

$$SST = \frac{(0.3544gr - 0.4098gr) * 1000}{15ml} \quad Ec.AB.9$$

$$SST = \frac{55.4mg}{15\ ml * \frac{1L}{1000\ ml}} = 3693\ mg/l \quad Ec.AB.10$$

B.4. DETERMINACIÓN DEL PH.

Medición de pH. - el pHmetro debe constar de potenciómetro un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un dispositivo para compensar la temperatura. El circuito se completa a través del potenciómetro cuando los electrodos se sumergen en la solución test. Muchos medidores de pH son capaces de medir pH o mili voltios y algunos tienen una expansión de escala que permite lecturas de hasta 0.001 unidades de pH, pero la mayoría de instrumentos no son tan precisos.

Para trabajos de rutina utilícese un medidor de pH exacto y reproducible hasta 0.1 unidades de pH con una escala de 0 a 14, y dotado de un ajuste compensador de la temperatura.

Aunque los fabricantes proporcionan instrucciones de trabajo, los términos descriptivos pueden ser confusos. En la mayoría de los instrumentos existen dos controles: intersección (ajuste de tampón, asimetría, estandarizar) y pendiente (temperatura, compensación); sus funciones se muestran en forma de diagrama en las figuras 4500 – H⁺: 1 y 2. El control de intersección desvía lateralmente la curva de respuesta, que atraviesa el punto isopotencial sin cambio en la pendiente. Así se puede llevar el apartado a la escala (0 mV) con un tampón de pH 7 que no tiene cambio de potencial con la temperatura.

El control de pendiente hace rotar la pendiente fem/pH alrededor del punto isopotencial (0 mV/pH 7). Para ajustar la pendiente para la temperatura, sin alterar la intercepción, seleccionándose un tampón que proteja la muestra con tampón pH 7 y ajústese el control de pendiente al pH de este tampón. El aparato indicara el cambio correcto de milivoltios por unidad de pH a la temperatura de la prueba.

B.5. DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD.

La capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica se conoce como conductividad. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y la temperatura de la medición.

La medición real es la resistencia, medida en ohmios o megaohmios. La resistencia de un conductor es inversamente proporcional a su área de sección transversal y directamente proporcional a su longitud. La resistencia específica medida en una solución es la de un cubo de 1 cm de lado. Rara vez se fabrica este tipo de electrodo. Los electrodos prácticos miden una fracción dada de la resistencia específica, siendo esta fracción la constante celular C:

$$C = \frac{\text{Resistencia medida } R_m}{\text{Resistencia Específica } R_e} \quad \text{Ec.AB.11}$$

El recíproco de la resistencia es la conductancia, que mide la capacidad para conducir una corriente y se expresa en mhos recíproco de ohmios. En los análisis de agua es conveniente la unidad micromhos. Cuando se conoce y se aplica la constante celular, la conductancia medida se convierte en conductancia específica o conductancia K_e recíproco de la resistencia específica:

$$Kl = \frac{1}{R_e} = \frac{c}{R_m} \quad \text{Ec.AB.12}$$

Se prefiere el término “conductividad”, y por lo general se expresa en micromhos por centímetro (umhos/cm). En el sistema Internacional de Unidades (SIU), el recíproco de ohmio es el siemens (S) y la conductividad se expresa en milisiemens por metro (mS/m); 1mS/m = 10 umhos/cm. Para expresar resultados en unidades SIU, divídanse umhos/cm por 10.

Método de medición: método 2510A 1

Instrumentación

Conductímetro o un conductómetro.

Reactivos

Solución de KCl 0,01 N.

- a. Agua de conductividad: se hace pasar agua destilada a través de un desionizador, descartándose el 1er litro. La conductividad debe ser menor de 1 μ mho/cm.
- b. solución estándar de cloruro potásico. KCl 0.01 M: Disuélvanse 745.6 mg de KCl anhidro en agua de conductividad, diluyendo hasta 1.000 ml a 25°C.

Esta es la solución de referencia estándar que a 25°C tiene una conductividad de 1.413 μ mhos/cm. Resulta satisfactoria para la mayoría de las muestras cuando la célula tiene una constante de 1 a 2.

Para otras constantes celulares, utilícense las soluciones más fuertes o más débiles enumeradas en la tabla. Consérvese en frascos de vidrio borosilicato con tapón de vidrio.

Procedimiento

- Ajuste del conductímetro
- Ajuste instrumental de acuerdo al manual de operaciones del equipo.
- Calibración del conductímetro utilizando la solución de KCl 0.04N.

Medida de la Conductividad

- Llevar las muestras al instrumento y efectuar las mediciones
- Retomar los controles a la posición "cero" o de reposo.

Recomendaciones

Las medidas de conductividad requieren ser hechas de inmediato, al llegar la muestra al laboratorio. El tiempo y la temperatura hacen variar los resultados. (APHA, 2005, p. 2-63).

B.6. DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD.

MÉTODO 2030 A

Este término es utilizado para expresar el contenido de sólidos en suspensión que se encuentra en las aguas y provocan opacidad.

La turbidez es causada por una amplia variedad de materiales orgánicos, inorgánicos inclusive microorganismos.

En el agua potable este parámetro es importante por razones estéticas de desinfección y operaciones de filtración.

Unidad de Turbidez

- Dada la gran variedad de materiales que causan turbidez en aguas naturales, ha sido necesario usar una unidad arbitraria de medida. La elegida es:
 - 1mg. SiO₂/Litro = Unidad de turbidez
 - (SiO₂ Oxido de silicio o sílice), la sílice usada debe reunir ciertas especificaciones como el tamaño de la partícula.
- Las suspensiones de sílice puro no se usan en la práctica ordinaria para medir turbidez. Estas han sido usadas originalmente para calibrar el tubímetro de bujía de Jackson, el cual ha sido escogido como el instrumento patrón.
- Cuando se emplean otros métodos se preparan los patrones para cada procedimiento y se usan materiales naturales en suspensión como tierra fuller (tierra de diatomeas). Las suspensiones son estandarizadas por medio del turbidímetro de Jackson.

Método nefelómetro

Procedimiento

Calibrado de turbidímetro.- Síganse las instrucciones. A falta de una escala de una escala precalibrada. Prepárense curvas de calibrado para cada margen del aparato. Utilizando estándares adecuados, compruébese la exactitud de cualquier escala de calibrado de que se disponga sobre un instrumento precalibrado.

Verifíquese por lo menos un estándar en cada margen del aparato que se vaya a utilizar. Compruébese que el turbidímetro facilita lecturas estables en todo los márgenes de sensibilidad utilizados.

Es probable que las turbideces elevadas determinadas por medida directa difieran apreciablemente de las determinadas por la técnica referida.

Medida de turbideces menores de 40 UNT.- Agítese cuidadosamente la muestra. Espérese hasta que desaparezcan las burbujas de aire. Y viértase la muestra en el tubo agitada en el tubo y suméjase en un baño ultrasónico durante 1 – 2 segundos obteniéndose eliminación total de las burbujas. Léase directamente la turbidez en la escala del aparato o en la curva del calibrado adecuada.

Métodos de Determinación de la turbidez

Los valores de turbidez varían desde cero en agua pura, a varios miles en aguas de río de alta turbidez; por lo tanto no es recomendable usar un solo método de determinación. (Jimeno, 1998, p. 81-88).

Tabla B.1 Los métodos usuales empleados para medir la turbidez y los rangos que ellos pueden medir son los siguientes:

Métodos	Rango
Nefelométrico de Bujía Jackson	10-1000 (tubo corto)
Turbidímetro de Bujía Jackson	25-1000 (tubo largo)
Turbidímetro de Bujía Jackson	arriba de 1000 (por dilución)

B.7. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA.

La temperatura es un parámetro físico que afecta mediciones de otros como pH, alcalinidad o conductividad. Las temperaturas elevadas resultantes de descargas de agua caliente, pueden tener un impacto ecológico significativo por lo que la medición de la temperatura del cuerpo receptor, resulta útil para evaluar los efectos sobre éste.

Equipos y materiales:

Cualquier equipo portátil para medir diferentes parámetros como conductímetro, oxímetro, pHmetro o sonda multiparamétrica, que permita la determinación simultánea de temperatura.

La temperatura en estos equipos suele tener una resolución de ± 0.1 ó 0.01°C y el intervalo de medición va desde 0 hasta al menos 50°C , con lo cual logra abarcarse el intervalo habitualmente presente en las muestras.

Procedimiento:

La temperatura debe medirse directamente en el cuerpo de agua. En los casos que esta operación se dificulte y se obtenga una muestra con algún dispositivo de muestreo (como frasco, botella muestreadora o balde), la temperatura debe medirse a la mayor prontitud posible directamente en dicho dispositivo para así minimizar cualquier error.

Presentación de resultados

El resultado se obtendrá directamente en la pantalla del equipo con una o dos cifras decimales. Al reportarlo, si el objetivo de la medición exige mayor exactitud, para el equipo en cuestión debe consultarse la calibración vigente, la cual se realiza periódicamente respecto a un dispositivo calibrado (RTD). (APHA, 2005, p. 2-61)

ANEXO C. NORMATIVAS.

C.1. NORMATIVA NACIONAL E INTERNACIONAL

Dentro de la norma legal peruana se tiene normados los estándares nacionales de calidad ambiental para agua, con el objetivo de establecer el nivel de concentración como sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente. A continuación, se presentan estos valores en función de la aplicación que se le vaya a dar al agua (MINAM, D.S. N°002, 2008, sp.).

(MINAM, D.S. N° 004, 2017, p. 10) La presente norma tiene por objeto compilar las disposiciones aprobadas mediante el Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM y el Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, que aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, quedando sujetos a lo establecido en el presente Decreto Supremo y el Anexo que forma parte integrante del mismo. Esta compilación normativa modifica y elimina algunos valores, parámetros, categorías y subcategorías de los ECA, y mantiene otros, que fueron aprobados por los referidos decretos supremos.

Tabla C1-1. CATEGORÍA 3: Riego de vegetales y bebida de animales (MINAM, D.S. N°004, 2017, p. 17).

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(µS/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO ₃ -N) + Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L	5		5
Organoclorados				
Aldrín	µg/L	0,004		0,7
Clordano	µg/L	0,005		7
Dicloro Difetil Tricloroetano (DDE)	µg/L	0,001		30
Dieldrín	µg/L	0,5		0,5
Endosulfán	µg/L	0,01		0,01
Endrín	µg/L	0,004		0,2
Heptaclo y Heptaclo Epóxido	µg/L	0,01		0,03
Lindano	µg/L	4		4
Carbamato				
Aldicarb	µg/L	1		11
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helminos	Huevo/L	1	1	**

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,05
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,05		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Niquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24
ORGÁNICO				
Bifenilos Policlorados				
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04		0,045
PLAGUICIDAS				
Paratión	µg/L	35		35

C.2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS Y LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS Y DE SEGURIDAD

(MINAM, D.S. N° 001-2009/APRUEBA LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (LMP) DE EFLUENTES DE INFRAESTRUCTURAS DE RESIDUOS SÓLIDOS, 2009)

Tabla C2. Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de tratamiento de residuos sólidos y lixiviados de rellenos sanitarios y de seguridad. Fuente (DS N° -2009-MINAM)

	Parámetros	Unidad	LMP	Método de ensayo
I	Generales			
1	pH		6,5 – 8,5	APHA 4500-H+ - B Pág. 4-90 a 4-94 21ava edición
	Parámetros	Unidad	LMP	Método de ensayo
2	Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	30	APHA 2540-D Pág. 2-58 a 2-59 21ava edición
II	Orgánicos			
3	DQO	mg/L	120	EPA method 410.1 600/4-79-020 REVISED MARCH
4	DBO	mg/L	20	APHA -AWWA-WEF 5210 B. 21st edition
5	Hidrocarburos Totales de Petróleo		10	DIN EN ISO 9377-2. Julio 2001
III	Inorgánicos			
6	Amonio (como N)	mg/L	10	
7	Arsénico total	mg/L	0,1	APHA 3114-C Pág. 3-37 a 3-38 21ava edición
8	Cadmio total	mg/L	0,1	APHA 3111-B, Pág 3-17 a 3-19, 21st Edition.
9	Cobre total	mg/L	0,5	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava edición
10	Cromo VI (*)	mg/L	0,1	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA-AWWA-WEF. 3500 Cr-B 21 st Edition
11	Hierro total	mg/L	2	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava edición
12	Mercurio total	mg/L	0,01	APHA 3112-B Pág. 3-23 a 3-24 21ava edición
13	Plomo total	mg/L	0,5	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava edición
14	Zinc total	mg/L	0,5	APHA 3111-B Pág. 3-17 a 3-19 21ava Edición
IV	Biológico			
15	Coliformes totales	NMP/100 mL	1 000	APHA 9221 B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition

(*) En muestra no filtrada

Nota. -Descarga directa: descargas a los cuerpos de aguas superficiales

C.3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

(DS N° 003-2010-MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas o Municipales, 2010, sp.).

Tabla C3. Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR. Fuente (DS N° 003-2010-MINAM).

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
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

ANEXO D

D.1. RESUMEN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE ELECTROCOAGULACIÓN ENCONTRADOS EN LA LITERATURA.

Tabla D1. Resumen de condiciones de operación de electrocoagulación.

N°	Autor	DENSIDAD DE CORRIENTE (A/cm ²)	Material de Electrodo	Distancia entre Electrodo (cm)	TIPO DE CONEXIÓN	conductividad	Contaminante	tiempo de residencia (min)	Temperatura (°C)	Flujo volumétrico (l/s)	resultados
1	Renk Russell (1988)		hierro, aluminio, grafito y titanio				M, pesados, S ₂ , color, CN, Ra, U, Se, PO ₄ ³⁻ , F, COT, DBO, g, y aceites, SO ₄ = , dureza, etc.				La EC no tiende a remover materiales que no forman precipitados tales como Na, K, solventes de peso ligero como tolueno y benceno. Sin embargo, bajo ciertas condiciones la EC convertirá iones cloruro a gas cloro, nitratos a amonio además de oxidar o reducir compuestos
3	Pouet M.-F. (1992)	0.0006 a 0.0015	Aluminio		serie		DOO, S ₂ , turbiedad	169		0.0556	La combinación de la electrocoagulación-floculación-microfiltración mostró ser una buena alternativa para el tratamiento intensivo de aguas residuales por su alta eficiencia y a lo compacto del sistema.
4	Matecon, Michale J. (1995)		ACERO inox	8	serie		partículas ultrafinas			batch	La velocidad de coagulación puede ser descrita por una ecuación cinética de segundo orden que incorpora la migración electroforética de partículas hacia el ánodo y la subsiguiente liberación de partículas descargadas hacia el seno de la solución. La electrocoagulación en una serie de celdas agitadas con electrodos en paralelo arrojó resultados semejantes a los precedidos con los modelos derivados teóricamente.
5	Pouet M.-F. (1995)	5.30E-03	Aluminio		bipolar		turbiedad, DOO Y S ₂			0.27	La dosis óptima de Al fue de 45-63 mg/L utilizando Al ₂ (SO ₄) ₃ como coagulante. En la electrocoagulación con una corriente de 8 A se obtiene una cantidad teórica de Al de 54 mg/L y en la práctica se utilizó solo una dosis de 27 mg/L. Se removió el 75% de la DOO.
6	Tsai C.T. (1996)		cobre, hierro y aluminio	2		52.63	DOO	1_20	4	batch	Se alcanzaron eficiencias de remoción entre el 30 y 50% donde el par Fe-Cu como electrodos presentó una mayor eficiencia.
7	Paul A.B. (1996)		Aluminio	2	paralelo	30000 a 20000	turbiedad			batch	Se alcanzó una alta remoción de turbiedad además de que se demostró que los sistemas de tratamiento a pequeña escala son más baratas que los sistemas tradicionales
8	Ciorba, G.A. (2000)	0.001 y 0.003	Aluminio	0.5			DOO	10	22	batch	La eficiencia en el tratamiento de agua residual sintética alcanzó valores de 40 al 60% (como remoción de DOO) dependiendo de las condiciones de operación establecidas.
9	Lescure Barrou, V (2004)	0.013 a 0.053	Hierro y Ti-PT				DOO	120-300		batch	Utilizados como coagulantes los ferratos lograron la remoción de DOO (45%) con un consumo bajo de energía entre los procesos anódicos y catódicos.
10	Xiong Ya (2001)		Acero inox.	14		580	DOO y color	30		batch	En términos de costos y de eficiencia, la combinación de coagulación de Fe ²⁺ con el tratamiento electroquímico usando como electrodo carbón activado granular resultó ser el más eficiente para el tratamiento de aguas conteniendo colorantes y materia orgánica
11	Morante, G. Gonzalo (2002)	0.00023	hierro y aluminio	0.5	paralelo	1.20E+06	Grasas, aceites y DOO	15	19.7	batch	Eliminaciones de 90% en el contenido de grasas y aceites y 70 % en DOO. Aunque se presentaron incrementos en el contenido de metales, tales como hierro o aluminio, por el hecho de trabajar con electrodos de sacrificio.
12	Jiang, J. Q (2002)	0.00025 y 0.001	Aluminio		paralelo	70000	materia organica disuelta y otras	0.87	3_10	0.167	Para el rango de condiciones usadas, el sistema ECF resultó ser más efectivo que un proceso convencional DAF en el tratamiento de agua residual a pequeña escala, el costo total de operación para ECF (incluyendo el costo de corrección de pH) fue de 3 a 6 veces más bajo que el sistema DAF.
13	M. Ziaed, N. Belkhal (2008)	0.014	hierro y aluminio	0.5	paralelo	42720	DOO, polifenoles y color	50		batch	Se obtuvieron mayores remociones con electrodos de Al, DOO = 98%, polifenoles = 92% y color > 99%, el pH final fue muy cercano a 7. Se recomienda la EC como pretreamiento de procesos biológicos para tratar licor negro de la industria del papel.
14	Deshpande A. M. (2010)	0.004, 0.008 y 0.012	aluminio	1	paralelo		DOO, DBO y color	0.60		batch	Utilizando la electrocoagulación como un pretreamiento de un proceso anaerobio de aguas residuales farmacéuticas, se obtuvo en la electrocoagulación una máxima remoción de DOO, DBO y color bajo condiciones óptimas de operación de 24, 35 y 70% respectivamente.

D.2 RESUMEN PARA TIEMPOS DE REMOCIÓN DE DQO, DBO₅ Y TSS CON DIFERENTES CONTAMINANTES.

Tabla D2. Resumen de tiempos de remoción de DQO, DBO₅ y TSS.

Titulo	Autor	Comentarios
Treatment of Lixivate from Jabel Chakir-Tunis by Electrocoagulation	(Hadj Hmida, Bellakhal, & Mansour, 2010)	El porcentaje de reducción para condiciones óptimas fueron de 94% de DQO en 90 minutos con una densidad de corriente de 15mA/cm ² acondicionando pH=6 y para un pH inicial de 8 a 16 mA/cm ² en 120minutos se reduce en 90% de DQO.
Electrochemical treatment of a destillery wastewater: parametric and residue disposal study.	Thakur Ch., et al., 2009	Los valores de las condiciones óptimas encontrados fueron pH =6.5, densidad de corriente 146.75 a/m ² , separación entre electrodos 1 cm y tiempo = 130 minutos. A estos valores la máxima eliminación fue de 63.1 % y del color fue de 98.4%.
Treatment of bio-digester effluente by electrocoagulation using iron electrodes.	Kumar M., et al, 2009	Han obtenido la máxima eficiencia de la eliminación de la DQO de 50.5+- 1.2%y color del 95.2%. Este valor fue observado a una densidad de corriente de 44.65A/m ² , pH 8, distancia entre electrodos 2cm, tiempo de electrolisis de 120min.
La electrocoagulación, una alternativa para la depuración de lixiviados.	(Mercado Martínez, Reyes Ávila, & Agrono Hurtado, 2008)	Los mejores resultados para la DQO, se lograron utilizando electrodos de aluminio para 15 minutos de operación a 3,0 voltios, Pero no ocurrió lo mismo, con los sólidos suspendidos y la turbidez, ya que los porcentajes removidos no fueron los mejores.
Diseño de una celda de electrocoagulación.	(Arango Ruiz & Garcéz Giraldo, 2007)	El estudio del comportamiento de electrocoagulación de las aguas residuales de la industria láctea. Para la separación entre electrodos de 10 mm con electrodo de sacrificio de hierro, presenta una mejor remoción para un tiempo de 15 minutos.
Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación.	(Piña Soberanis, y otros, 2011)	En el resumen que realizo Piña se muestran mayores porcentajes de remoción para intervalos de tiempo de 10-30 minutos y para las remociones de DQO, DBO ₅ y color se llegan hasta un tiempo de 60 minutos tomando en consideración estas tres últimas.
La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas.	(Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo, 2006)	En la tabla de resumen de Restrepo se tiene una remoción de la DQO (60%) a intervalos de tiempo de 10 a 30 minutos y para los SS (90%) a 15 minutos, siendo el contaminante las aguas residuales de restaurantes.

D.3. INFORME DE MONITOREO DEL LABORATORIO AGQ Labs & Technological Services. (Municipalidad Provincial del Cusco, 2017)



LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE
ACREDITACIÓN INACAL-DA
CON REGISTRO N° LE-072



INFORME DE ENSAYO

N° de Referencia:	A-18/000187	Tipo Muestra:	Agua de Lixiviación
Descripción:	CAPTACIÓN LIXIVIADOS TRINCHERA NUEVA	Fecha Fin:	10/01/2018

RESULTADOS ANALITICOS				
Parámetro	Resultado	Incert.	Unidades	CMV
Uranio	< 0,07	-	mg/L	
Parámetros sobre lixiviados				
Oxígeno Disuelto	0,36	-	mg/L	
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales C10-C28	69	±13%	mg/L	
Hidrocarburos Totales C5-C10	< 0,1	±9%	mg/L	
Parámetros Físico-Químicos				
Aceites y Grasas	45,3	-	mg/L	
Conductividad Eléctrica	27 300	±1%	µS/cm a 25°C	
DBO5	> 10 000	±6%	mg/L	
Detergentes Aniónicos	0,13	±8%	mg/L	
DQO	> 5 000	±13%	mg/L	
Dureza	> 1 000	±8%	mg/L CaCO3	
pH	6,84	±1%	Unidades de pH	
Sólidos Totales Disueltos	19 400	±17%	mg/L	
Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	790	±11%	mg/L	
Sulfuros	19,5	±16%	mg/L	
Turbidez	> 1 000	±7%	NTU	
Formas Nitrogenadas/Fosforadas				
Fósforo Total	21,3	±7%	mg/L	
Nitrógeno Amoniacal	702	±9%	mg/L	
Nitrógeno Kjeldahl	> 100	±8%	mg/L	
Nitrógeno Total Calculado	> 600	-	mg/L	
Cationes +				
Calcio Total	863	±18%	mg/L	
Magnesio Total	284	±9%	mg/L	
Aniones -				
Bicarbonatos	> 1 500	±9%	mg/L CaCO3	
Carbonatos	< 5,00	±9%	mg/L CaCO3	
Cianuro Libre	0,0057	-	mg/L	
Cianuros (WAD)	0,007	-	mg/L	
Cloruros	> 600	-	mg/L	
Nitritos	< 0,11	-	mg/L N-NO2	
Nitros	< 0,50	-	mg/L NO3	
Nitros	< 0,15	-	mg/L N-NO2	
Sulfatos	333	-	mg/L	
Metales Totales				
Aluminio Total	0,629	±10%	mg/L	
Arsénico Total	+ 0,010	±7%	mg/L	

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como un certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO

N° de Referencia:	A-18/000186	Tipo Muestra:	Agua de Lixiviación
Descripción:	CAPTACIÓN LIXIVIADOS TRINCHERA ANTIGUA	Fecha Fin:	10/01/2018

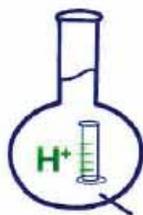
RESULTADOS ANALITICOS

Parámetro	Resultado	Uncert.	Unidades	CAA
Uranio	0,40	-	mg/L	
Parámetros sobre lixiviados				
Oxígeno Disuelto	0,87	-	mg/l	
Hidrocarburos				
Hidrocarburos Totales C10-C28	5,8	±13%	mg/L	
Hidrocarburos Totales C5-C10	< 0,1	±5%	mg/L	
Parámetros Físico-Químicos				
Acetatos y Grasas	38,7	-	mg/L	
Conductividad Eléctrica	17 540	±1%	µS/cm a 25°C	
DBO5	2 250	±6%	mg/L	
Detergentes Aniónicos	0,79	±8%	mg/L	
DOO	4 841	±13%	mg/L	
Dureza	714	±8%	mg/L CaCO3	
pH	6,52	±1%	Unidades de pH	
Sólidos Totales Disueltos	12 000	±17%	mg/L	
Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	530	±11%	mg/L	
Sulfuros	6,74	±16%	mg/L	
Turbidez	> 1 000	±7%	NTU	
Formas Nitrogenadas/Fosforadas				
Fósforo Total	8,09	±7%	mg/L	
Nitrógeno Amoniacal	539	±9%	mg/L	
Nitrógeno Kjeldahl	> 100	±8%	mg/L	
Nitrógeno Total Calculado	587	-	mg/L	
Cationes +				
Calcio Total	209	±18%	mg/L	
Magnesio Total	43	±9%	mg/L	
Aniones -				
Bicarbonatos	> 1 500	±9%	mg/L CaCO3	
Carbonatos	< 5,00	±9%	mg/L CaCO3	
Cloruro Libre	0,0055	-	mg/L	
Cloruros (WAD)	0,006	-	mg/L	
Cloruros	> 600	-	mg/L	
Nitratos	< 0,11	-	mg/L N-NO3	
Nitratos	< 0,50	-	mg/L NO3	
Nitritos	< 0,15	-	mg/L N-NO2	
Sulfatos	362	-	mg/L	
Metales Totales				
Aluminio Total	3,22	±10%	mg/L	
Arsénico Total	< 0,010	±7%	mg/L	

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como un certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

ANEXO E

E.1. CONSTANCIA DE ANÁLISIS



MC QUIMICALAB

De: Ing. Mario Cumpa Cayuri

LABORATORIO DE CIENCIAS NATURALES:
AGUAS, SUELOS, MINERALES Y MEDIO AMBIENTE

RUC N° 10238409077 - COVIDUC A4 (SAN SEBASTIAN) CEL: 974673993 - 946887776

CONSTANCIA

El responsable de Laboratorio Químico MC-QUIMICALAB, hace constar que:

La señoras **Krizia Giovana Ninan Valer** y **Mary Carmen Zambrano Jarandilla** identificadas con DNI N° 46684727 y 47902548 respectivamente; egresadas de la Escuela Profesional de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería de Procesos de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO, han realizado los análisis de DQO, DBO₅ y Sólidos Suspendidos Totales de las muestras pertenecientes a su trabajo de tesis intitulado "TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE JAQUIRA POR ELECTROCOAGULACIÓN" durante el periodo de Marzo a Junio del 2018.

Los análisis se realizaron bajo la supervisión del responsable de laboratorio cumpliendo con los procedimientos y protocolos establecidos en este laboratorio.

Se expide la presente constancia a petición verbal de las interesadas, para los fines que le convengan.

Cusco, 03 de Agosto del 2018

MARIO CUMPA CAYURI
INGENIERO QUIMICO
REG. COLEGIO DE INGENIEROS N° 16188