

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EVALUACIÓN DE LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE
GENERADO POR UN LABORATORIO METALÚRGICO
APLICANDO LA ELECTROCOAGULACIÓN”**

Presentada por:

ANTONIO MIGUEL CONDORI PANTOJA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EVALUACIÓN DE LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE GENERADO
POR UN LABORATORIO METALÚRGICO APLICANDO LA
ELECTROCOAGULACIÓN”**

Presentada por:

ANTONIO MIGUEL CONDORI PANTOJA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Dra. Rosemary Vela Cardich
PRESIDENTE

Mg. Quím. Mary Flor Césare Coral
MIEMBRO

Mg. Sc. Wilfredo Baldeón Quispe
MIEMBRO

Ing. Lawrence Quipuzco Ushñahua
ASESOR

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, que siempre me apoyaron durante toda mi vida académica y a mis hermanas que fueron buenas consejeras tanto en mi vida académica como personal.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Lawrence Quipuzco por brindarme su apoyo y consejos para lograr mi meta.

Al Ing. José Fernando Alva Yance por su apoyo con el sistema de electrocoagulación, su apoyo fue vital para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Efluente del Laboratorio Metalúrgico.....	3
2.2. Criterios para la selección del sistema de depuración.....	5
2.3. Electroquímica	6
2.4. Electrocoagulación	7
2.5. Coagulación.....	9
2.6. Diseño y operación del reactor de electrocoagulación.....	10
2.7. Reacciones en el proceso de electrocoagulación.....	12
2.7.1 Reacciones con electrodos de aluminio	12
2.7.2 Reacciones con electrodos de hierro.....	14
2.8. Aspectos generales a considerar.....	15
2.9. Variables que influyen en la electrocoagulación.....	16
2.10. Cálculo del trabajo eléctrico.....	17
2.11. Costos de operación	17
2.12. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.....	18
2.13. Antecedentes de investigación	19
2.14. Valores máximos admisibles.....	22
2.15. Prueba estadística	22
2.15.1 Análisis paramétricos.....	23
2.15.2 Métodos o pruebas estadísticas más utilizadas	23
2.15.3 Análisis factorial de varianza.....	23

III. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Caracterización del efluente del laboratorio Alfred H. Knight.....	24
3.1.1 Materiales	24
3.1.2 Metodología.....	24
3.2 Diseño del reactor.....	25
3.2.1 Materiales	25
3.2.2 Metodología.....	26
3.3 Determinación de parámetros óptimos.....	27
3.3.1 Materiales	27
3.3.2 Metodología.....	28
3.3.2.1 Diseño Factorial 3 x 2 x 2	28
3.3.2.2 Análisis de Varianza - ANOVA.....	29
3.3.2.3 Supuestos de ANOVA	29
3.4 Metodología para la evaluación del proceso de electrocoagulación	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	31
4.1. Caracterización del efluente del laboratorio Alfred H. Knight.....	31
4.2. Diseño del sistema de electrocoagulación.....	33
4.2.1 Celda de electrocoagulación	33
4.2.2 Fuente de corriente continua.....	37
4.3 Determinación de parámetros óptimos.....	39
4.3.1 Plomo	39
4.3.1.1 Análisis Estadístico	40
4.3.1.2 Prueba de Fisher	41
4.3.2 Cadmio	43
4.3.2.1 Análisis Estadístico	44

4.3.2.2 Prueba de Fisher	45
4.3.3 Cromo.....	46
4.3.3.1 Análisis Estadístico	47
4.3.3.2 Prueba de Fisher	48
4.3.4 Generación de Sulfuro de Hidrógeno.....	49
4.4 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	49
V. CONCLUSIONES	53
VI. RECOMENDACIONES	54
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
VIII. ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Eficiencia de remoción de metales pesados por electrocoagulación.....	5
Tabla 2: Aspectos a considerar al trabajar con sistemas de electrocoagulación	15
Tabla 3: Valores Máximos Admisibles	22
Tabla 4: Metodologías usadas para el análisis de los parámetros	25
Tabla 5: Variables dependientes e independientes del diseño factorial	28
Tabla 6: Diseño factorial	29
Tabla 7: Caracterización de los efluentes del Laboratorio Alfred H. Knight.....	32
Tabla 8: Electrocoagulación - Plomo	40
Tabla 9: Electrocoagulación – Cadmio	43
Tabla 10: Electrocoagulación – Cromo	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Manejo de efluentes de la empresa Alfred H Knight.....	4
Figura 2: Sistema de electrocoagulación	8
Figura 3: Mecanismo de coagulación de partículas coloidales	10
Figura 4: Reactores para electrocoagulación tipo bach	11
Figura 5: Reactor tipo filtro prensa.....	11
Figura 6: Reactor de electrodo cilíndrico rotativo.....	12
Figura 7: Caracterización del agua residual galvánica antes y después del tratamiento	20
Figura 8: Condiciones óptimas para remoción de contaminantes por electrocoagulación a escala de laboratorio	21
Figura 9: Tanque de almacén de Líquidos Peligrosos.....	31
Figura 10: Caracterización Efluente Alfred H. Knight vs VMA – Metales Pesados	32
Figura 11: Caracterización Efluente AHK vs VMA – pH.....	33
Figura 12: Celdas de Vidrio.....	34
Figura 13: Dimensiones Celda de Electrocoagulación – Distancia entre placas 1.5 cm.....	35
Figura 14: Dimensiones Celda de Electrocoagulación – Distancia entre placas 1.0 cm.....	36
Figura 15: Fuente de Corriente Continua para el proceso de Electrocoagulación	38
Figura 16: Resultados ANOVA - Plomo.....	41
Figura 17: Resultados de Fisher - Plomo	42
Figura 18: Variables Independientes vs % Remoción de Pb.....	42
Figura 19: Resultados ANOVA - Cadmio.....	44
Figura 20: Fisher / Cadmio – Material de electrodo.....	45
Figura 21: Fisher / Cadmio – Distancia entre placas.....	45
Figura 22: Fisher / Cadmio – Tiempo de retención.....	45
Figura 23: Resultado ANOVA - Cromo.....	47
Figura 24: Resultados Fisher - Cromo.....	48
Figura 25: Variables Independientes vs % Remoción Cr.....	49
Figura 26: Concentraciones de Pb - Valores Máximos Admisibles.....	50
Figura 27: Concentraciones de Cd - Valores Máximos Admisibles	50
Figura 28: Concentraciones de Cr - Valores Máximos Admisibles	51
Figura 29: Concentraciones de Pb - Valores Máximos Admisibles / 120 minutos.....	52

Figura 30: Resultados Laboratorio – Repetición 1	66
Figura 31: Resultados Laboratorio – Repetición 2	67
Figura 32: Resultados Laboratorio – Repetición 3	68
Figura 33: Resultados Laboratorio – Repetición Plomo	69
Figura 34: Residuos obtenidos vs. Cuantiles Teóricos - Plomo	70
Figura 35: Residuos obtenidos vs. Valores predichos - Plomo	71
Figura 36: Residuos obtenidos vs. Cuantiles Teóricos - Cadmio.....	72
Figura 37: Residuos obtenidos vs. Valores predichos – Cadmio	73
Figura 38: Residuos obtenidos vs. Cuantiles Teóricos - Cromo	74
Figura 39: Residuos obtenidos vs. Valores predichos – Cromo.....	75
Figura 40: Especies de Plomo en función al pH.....	76
Figura 41: Diagrama de especiación del Cromo	77
Figura 42: Diagrama de especiación del cadmio.....	77
Figura 43: Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de Fe amorfo	78

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Metodología del LASMAF para determinar Metales Pesados.....	59
ANEXO 2: Metodología del Laboratorio AHK para determinar Metales Pesados	62
ANEXO 3: Informes de Ensayos Laboratorios	66
ANEXO 4: Supuestos ANOVA - Plomo.....	70
ANEXO 5: Supuestos ANOVA - Cadmio	72
ANEXO 6: Supuestos ANOVA - Cromo.....	74
ANEXO 7: Compuestos formados en el lodo	76
ANEXO 8: Cantidad de NaOH para neutralizar el efluente.....	80

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la tratabilidad de los efluentes generados de un laboratorio metalúrgico por medio de la electrocoagulación, se diseñó un electrocoagulador a escala de dimensiones de 40.8 cm de largo, 10.6 cm de ancho y 14 cm de alto con una capacidad de 6.168 L. Se utilizaron 20 placas para cada ensayo de hierro y aluminio y estas placas se conectaron en paralelo con una configuración bipolar a una fuente de corriente continua. Las mejores condiciones para la remoción de los metales (plomo, cadmio y cromo) fueron: material de los electrodos de aluminio, una distancia entre placas de 1 cm y un tiempo de retención de 60 minutos. Tomando estas condiciones como el escenario más eficiente, el proceso de electrocoagulación redujo el plomo en 94.47 por ciento, el cadmio en 46.11 por ciento y el cromo en 49.46 por ciento. Para plomo y el cadmio a pesar de la remoción obtenida, no estuvieron dentro de los Valores Máximos Admisibles, a diferencia del cromo que previo al tratamiento ya se encontraba dentro de lo permitido. Además durante el proceso se generó sulfuro de hidrógeno gaseoso en bajas concentraciones, el cual se percibió como un olor a huevo podrido durante el proceso.

Palabras clave: electrocoagulación, material del electrodo, distancia entre placas, tiempo de retención

SUMMARY

In order to evaluate the treatability of the effluents generated from a metallurgical laboratory by means of electrocoagulation, an electrocoagulator was designed to scale with dimensions of 40.8 cm long, 10.6 cm wide and 14 cm high with a capacity of 6,168 L. 20 plates were used for each test of iron and aluminum and these plates were connected in parallel with a bipolar configuration to a direct current source. The best conditions for the removal of metals (lead, cadmium and chromium) were: material of the aluminum electrodes, a distance between plates of 1 cm and a retention time of 60 minutes. Taking these conditions as the most efficient scenario, the electrocoagulation process reduced lead by 94.47 percent, cadmium by 46.11 percent and chromium by 49.46 percent. For lead and cadmium, despite the removal obtained, they were not within the Maximum Admissible Values, unlike the chromium that prior to the treatment was already within the allowed. In addition, during the process hydrogen sulfide gas was generated in low concentrations, which was perceived as a rotten egg odor during the process.

Keywords: electrocoagulation, electrode material, distance between plates, retention time.

I. INTRODUCCIÓN

El 59 por ciento del agua consumida en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30 por ciento para uso agrícola y un 11 por ciento para uso doméstico, según lo descrito en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, el mayor gasto corresponde al sector de producción que ciertamente es el que más contamina. También se debe tener en cuenta que más de los 80 por ciento de los desechos líquidos peligrosos a nivel mundial se generan en los países industrializados en tanto los países en vías de desarrollo, por ejemplo Ecuador donde el 70 por ciento de los residuos líquidos se descargan sin tratamiento previo, lo cual contamina los recursos hídricos disponibles (Rodríguez, *et al.*, 2006).

Tanto los tratamientos primarios y secundarios como la sedimentación, coagulación, filtración entre otros no logran eliminar a los metales pesados o altas cargas contaminantes en sus procesos, a diferencia de los nuevos métodos como la electrocoagulación que se considera efectiva y de bajo costo para lograr la eliminación de contaminantes en aguas residuales. (Chávez, *et al.*, 2009).

Alfred H Knight durante más de 125 años esta al centro de la industria de metales y minerales proporcionando servicios técnicos de análisis químicos, inspección y soporte a las minas. Actualmente AHK tiene operaciones en más de 35 países, en el Perú cuenta con un Laboratorio acreditado con ISO/IEC 17025:2005.

Durante las actividades de laboratorio que se realiza en Alfred H. Knight se generan efluentes con alta carga contaminante, los efluentes líquidos que se generan con mayor frecuencia son de dos tipos: i) efluentes del 1^{er} lavado, los cuales contienen metales pesados y ii) efluentes del 2^{do} lavado, los cuales son neutralizados y luego vertidos en el desagüe cumpliendo con los Valores Máximos Admisibles (VMA) establecidos en la legislación ambiental.

Los residuos líquidos generados del primer lavado contienen un alto contenido de metales pesados (Plomo, Cadmio, Cromo, etc.), actualmente Alfred H. Knight contrata a una EPS-RS (Empresa Prestadora de Servicios) para que esta realice el transporte y disposición final de dichos efluentes, lo cual significa un gasto significativo para la empresa.

El objetivo general del presente trabajo es evaluar la tratabilidad de metales pesados (Pb, Cd y Cr) del efluente generado por el laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight utilizando la electrocoagulación.

Para lograr el objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el efluente del laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight con respecto a los metales pesados Pb, Cd y Cr.
- Diseñar el reactor donde se realizará el proceso de electrocoagulación.
- Determinaran los parámetros óptimos para el distanciamiento entre placas, material de placas y tiempo de retención que permitan la mejor eficiencia de remoción de los metales pesados mediante la electrocoagulación.
- Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación para la remoción de metales pesados del efluente del laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight, comparado con el D.S. N° 001-2015-VIVIENDA.

La metodología propuesta para tratar los efluentes líquidos, busca ajustarse a dos condiciones, debe ser sencilla y económica, con el fin de utilizar la menor cantidad de recursos para lograr el objetivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), son diseñadas de acuerdo a las características del vertimiento, varían de acuerdo a la carga contaminante que es fundamental para la selección del tratamiento y operaciones a implementar. En una PTAR se encuentran diversas unidades que garantizan la remoción de contaminantes y suelen clasificarse según su finalidad, estos son el tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario. El preliminar tiene como objetivo remover sólidos de gran tamaño, el primario consiste en una serie de operaciones capaces de remover sólidos suspendidos y sedimentables mediante procesos fisicoquímicos, el secundario consiste en procesos biológicos donde se remueven el mayor porcentaje de carga orgánica e inorgánica, al final el terciario que permite la remoción de contaminantes que no pudieron ser removidos previamente y que permitirán el reúso del recurso en caso sea el objetivo (Tchobanoglous y Crites, 2000).

2.1. Efluente del Laboratorio Metalúrgico

La empresa Alfred H Knight del Perú es una organización que brinda servicios al sector minero en ensayos químicos y supervisión de embarques de minerales, cuenta con un laboratorio en el cual realiza diferentes tipos de Análisis Físicos – Químicos de minerales, concentrados de metales.

Dentro del laboratorio se encuentran diferentes áreas de trabajo, estas son: vía húmeda, vía seca, vía impurezas y vía instrumental, de las cuales solo en la vía húmeda y vía impureza se generan efluentes, debido al lavado de los materiales. En las dos áreas anteriormente nombradas se cuenta con personal que realiza el lavado de diversos materiales usados en el laboratorio, como se muestra en la Figura 1, el primer lavado es vertido al lavadero N° 1 el cual posteriormente es

almacenado en un tanque para que posteriormente una EPS-RS Empresa Prestadora de Servicios realice el traslado y la disposición final, el segundo lavado se vierte al lavadero N° 2 y se almacena en un tanque de neutralización donde se neutraliza el pH con Soda Caustica (NaOH) para que luego este sea vertido al alcantarillado.

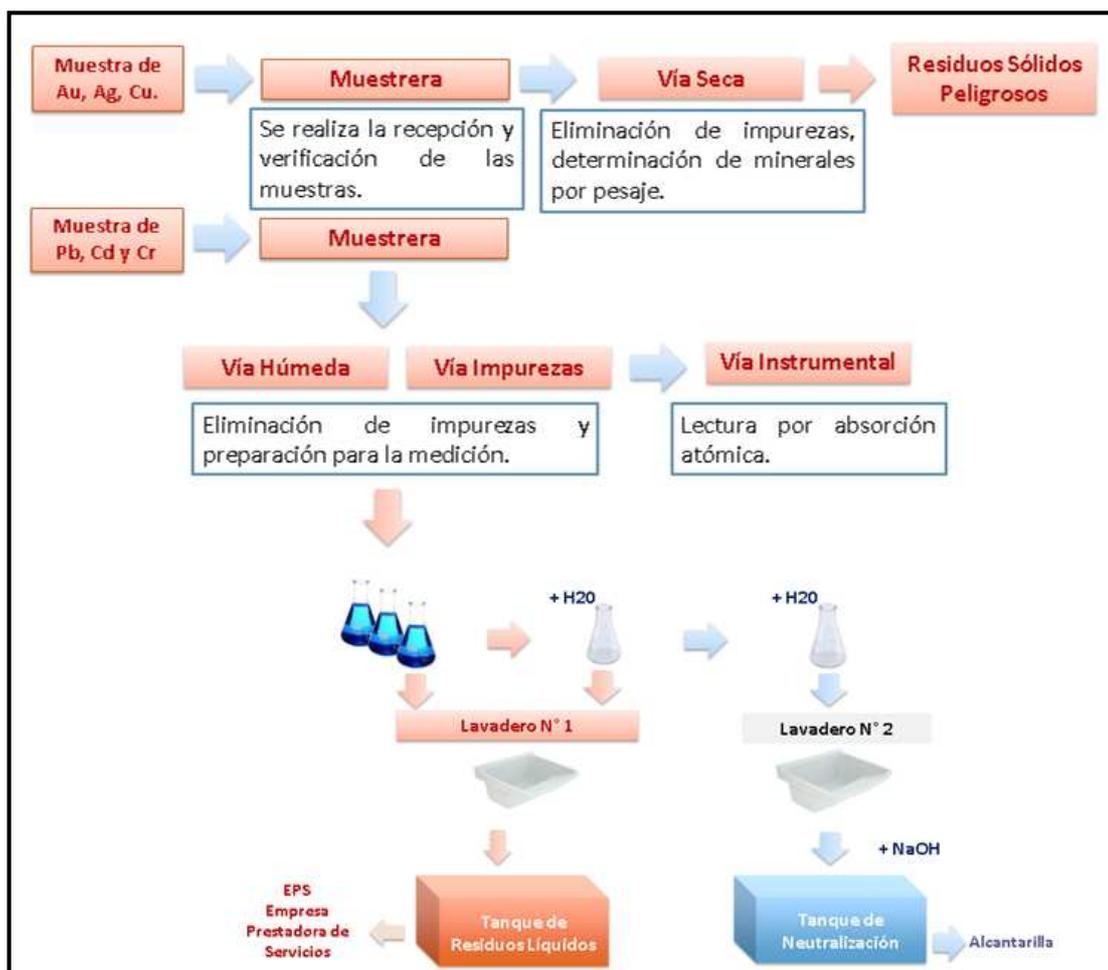


Figura 1: Manejo de efluentes de la empresa Alfred H Knight

FUENTE: Elaboración Propia

En este trabajo se tratarán los líquidos generados en el primer lavado, debido a que estos contienen metales pesados y diferentes ácidos en altas concentraciones (ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y ácido sulfhídrico), no se cuenta con un monitoreo previo de estos líquidos, debido a que la empresa Alfred H. Knight siempre ha contratado a una EPS para el traslado y la disposición final de estos líquidos peligrosos.

2.2. Criterios para la selección del sistema de depuración

Se conoce por las labores realizadas en el laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight que los líquidos provenientes del lavadero N° 1 contienen una concentración moderada de Pb, Cd y Cr, los métodos de tratamiento más comunes para eliminar este tipo de contaminantes son: precipitación, procesos electroquímicos, intercambio iónico, adsorción y desinfección, varios de estos procesos están siendo remplazados por otros emergentes y bastante avanzados, como son los métodos de oxidación avanzada y las operaciones con membrana especialmente para el caso de los efluentes industriales (Rodríguez, et al., 2006).

Los tratamientos biológicos se dividen en procesos aerobios y procesos anaerobios, dependiendo si requieren para su operación del suministro de aire (oxígeno) o no, estos recomendados para tratar materia orgánica, lo cual en este caso no aplica.

Como se observa en el Cuadro 1, la eficiencia de remoción de diferentes metales pesados mediante la electrocoagulación es alta, teniendo concentraciones iniciales altas o bajas, debido a que solo se conoce la presencia de los metales pesados y no la concentración de estos, se considera conveniente aplicar este tratamiento.

Tabla 1: Eficiencia de remoción de metales pesados por electrocoagulación

Especie	Concentración Inicial	Tiempo de tratamiento	% Eficiencia de remoción
Cu ²⁺	12 ppm	30 min	95%
Ni ²⁺ , Pb ²⁺ , Cd ²⁺	1 ppm	0 – 10 min	99%, 98.3%, 96.8% respectivamente utilizando electrodos de hierro
Cu ²⁺ , Cr ³⁺ , Ni ²⁺ , Zn ²⁺	93, 33, 57, 20 ppm respectivamente	45 min	>97% en todos los metales

FUENTE: Caviedes, *et al.*, 2015.

Haciendo un análisis comparativo acerca de las tecnologías como la electrocoagulación y los sistemas biológicos y químicos, se puede decir que el sistema de electrocoagulación aplicado a aguas residuales, en comparación con los sistemas biológicos convencionales, requiere de una menor superficie, entre un 50 a 60 por ciento menor (Patoczka, et al., 1998).

2.3. Electroquímica

Para entender los fenómenos dados en la electrólisis Michael Faraday realizó investigaciones que lo llevaron al descubrimiento de las relaciones cuantitativas entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una solución y la cantidad de materia separada o precipitada en los electrodos. Faraday supuso que las moléculas neutras en disolución, de un electrolito, constaban de dos partes cargados con signos contrarios, a las cuales denominó iones o caminantes. Los que se desplazan hacia el cátodo fueron llamados cationes y los que se dirigen al ánodo, aniones. Cuando circula la corriente los iones positivos son atraídos hacia el cátodo cargado negativamente, en donde se neutraliza su carga y quedan en libertad. Del mismo modo, los aniones se desplazan hacia el ánodo, en donde son neutralizados. Estas relaciones quedan concretadas en dos leyes que reciben el nombre de dicho físico. La primera ley establece que durante el tiempo t que dura una electrólisis, se forma en los electrodos una cierta cantidad de sustancia M , que previamente ha quedado neutralizado (Burbano, et al., 2003).

De acuerdo a la primera ley de Faraday, y en particular en 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 acumulada en el sistema, la primera ley de Faraday se representa con la siguiente ecuación (Aristizabal y Bermúdez, 2007):

$$M = \frac{\frac{P}{e} \times I \times t}{F}$$

Donde:

M: masa de metal en gramos (g) producida por electrólisis.

P: peso molecular del electrodo concerniente (gramos/gramos mol).

e: número de electrones en la reacción de óxido reducción.

I: Intensidad de corriente en Amperios (A).

t: tiempo de operación (s).

F: Constante de Faraday (96500 C mol⁻¹).

La segunda ley de Faraday expresa que “Las masas de distintos elementos liberados en los electrodos por una misma cantidad de electricidad son directamente proporcionales a sus equivalentes químicos” (Reyes y Mercado, 2003). Es decir, la cantidad de electricidad puesta en el sistema está relacionada estequiométricamente con el número total de moles de sustancia formada en un electrodo. (Restrepo et al., 2006).

2.4. Electrocoagulación

La utilización de electricidad para tratar aguas residuales tiene una larga tradición, siendo utilizada por primera vez en Inglaterra en 1889, específicamente en Londres en una planta de tratamiento, construido para tratar aguas residuales mediante la mezcla con agua de mar y electrólisis. En 1909, J. T. Harries recibió una patente para el tratamiento de aguas residuales por electrólisis con ánodos de sacrificio de hierro (Fe) y aluminio (Al). Posteriormente en la década de 1940 se describe un dispositivo llamado el "Coagulador Electrónico", que electroquímicamente disuelve aluminio (desde el ánodo) en la solución, haciendo reaccionar este con el ion hidroxilo (desde el cátodo) para formar hidróxido de aluminio, el hidróxido flocula y coagula los sólidos suspendidos purificando el agua (Holt, et al., 2005).

Se puede entonces definir a la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas conocidos como electrodos, Figura 2. Por lo general los electrodos empleados son placas de aluminio, hierro, siendo los más utilizados, acero inoxidable, etc. (Abuzaid, 2002).

Actualmente la electrocoagulación se ha vuelto a considerar como una alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial. La promulgación de leyes cada vez más estrictas concernientes a los límites de vertido de distintas sustancias en las aguas residuales así como la mejora en los estándares de calidad del agua

potable, han hecho que los procesos electroquímicos ganen cada vez más importancia en las últimas dos décadas (Restrepo et al., 2006).

Como se observa en la Figura 2 la electrocoagulación consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de las placas metálicas, la fuente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en la que los contaminantes se encuentran presentes, bien sean suspendidas o emulsificadas. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos emulsificadas (o solubles). Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún otro método de separación (Mollah, et al., 2004).

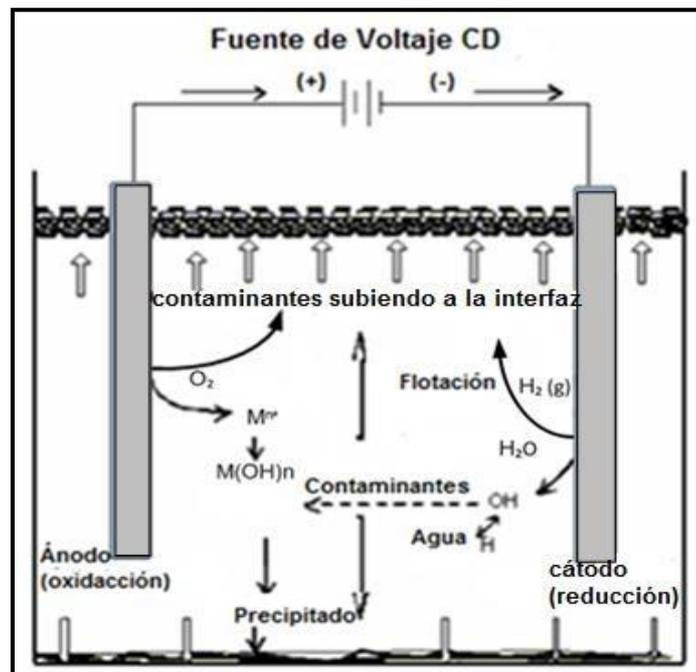


Figura 2: Sistema de electrocoagulación

FUENTE: Mollah, *et al.*, 2004.

Un proceso de electrocoagulación involucra tres etapas sucesivas (Aristizabal y Bermúdez, 2007):

- Formación de los coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio (ánodo).

- Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión.
- Agregación de las fases desestabilizadas para formar flóculos.

El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y del rompimiento de emulsión se describe a continuación (Aristizabal y Bermúdez, 2007):

- Neutralización de las cargas de las especies iónicas presentes en el agua residual ocasionada por los iones coagulantes producidos por disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones coagulantes reducen la repulsión electrostática entre partículas lo que causa la coagulación y de este proceso resulta una carga neta igual a cero.
- Los flóculos que se forman como resultado de la coagulación crean una capa de lodos que atrapa y conduce las partículas coloidales que permanecen en el medio acuoso.

Durante el proceso se generan compuestos que desestabilizan las suspensiones y emulsiones provocando su floculación en la disolución anódica donde se liberan elementos que pueden reaccionar con algunos contaminantes en solución precipitándolos. En los electrodos se generan micro burbujas de hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo que chocan y se adhieren a los flóculos, arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. También, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten (Morante, 2002).

2.5. Coagulación

La electrocoagulación es un proceso de tratamiento de aguas contaminadas que aplica los principios de la coagulación–floculación en un reactor electrolítico donde un electrodo de sacrificio se oxida para que se lleve a cabo la coagulación. La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, dando lugar a la formación de flóculos (Conjunto de partículas pequeñas aglutinadas en partículas más grandes y con mayor capacidad de sedimentación) o precipitado (Martínez, 2007).

El término coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) en agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua para volver fácil la adherencia entre las partículas. Los coagulantes funcionan creando una reacción química y eliminando las cargas negativas que causan que las partículas se repelan entre sí, como se muestra en los mecanismos de coagulación convencional, Ver Figura 3.

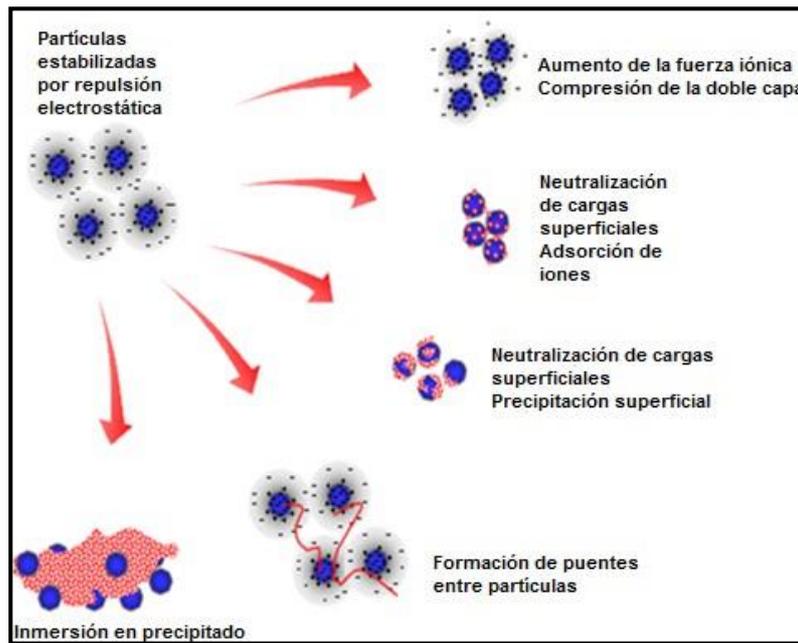


Figura 3: Mecanismo de coagulación de partículas coloidales

FUENTE: Martínez, 2007

2.6. Diseño y operación del reactor de electrocoagulación

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo. Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas (Restrepo et al., 2006).

Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos. 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 como se muestra en la Figura 4 (Restrepo et al., 2006).

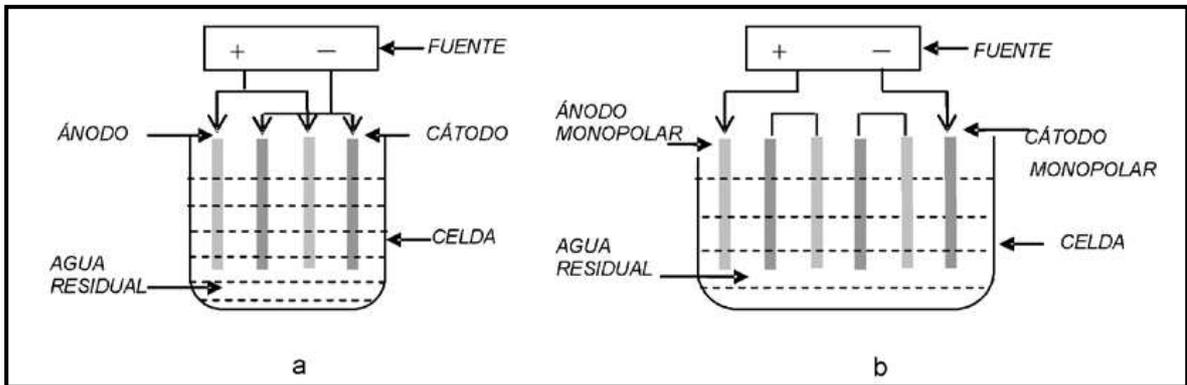


Figura 4: Reactores para electrocoagulación tipo bach

(a) Reactor monopolar conectado en paralelo

(b) Reactor monopolar conectado en serie.

FUENTE: Restrepo *et al.*, 2006.

Existen otros tipos de reactores, uno de ellos es el tipo filtro prensa, constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se muestra en la Figura 5. El agua al ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento. (Restrepo et al., 2006).

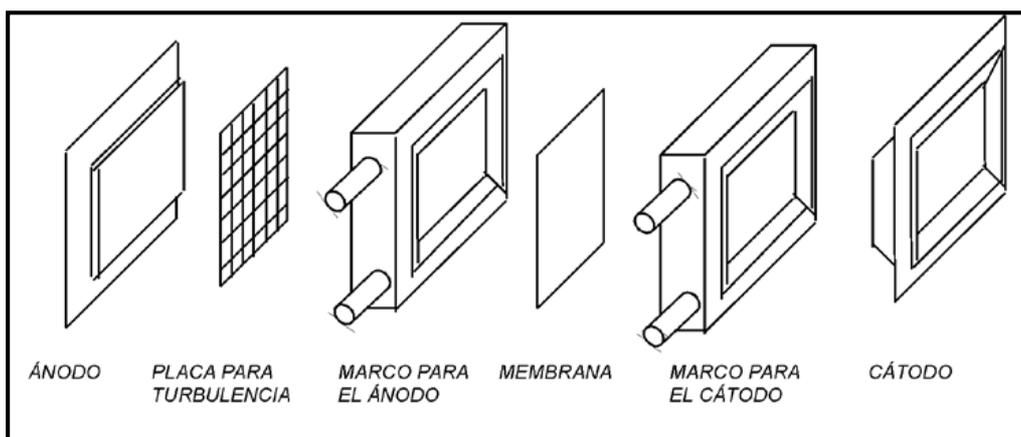


Figura 5: Reactor tipo filtro prensa

FUENTE: Restrepo *et al.*, 2006

Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo, en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo, como se muestra en la Figura 6. Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo.

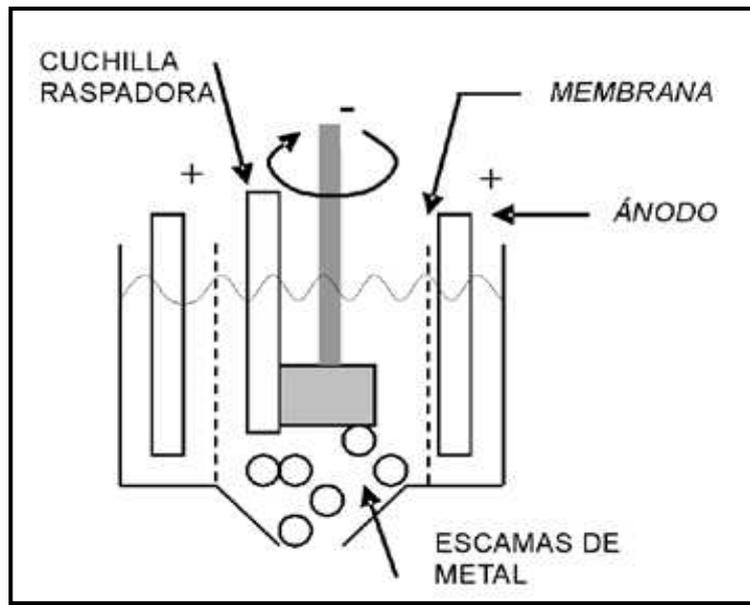


Figura 6: Reactor de electrodo cilíndrico rotativo

FUENTE: Restrepo *et al.*, 2006.

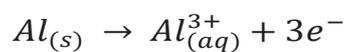
2.7. Reacciones en el proceso de electrocoagulación

Las principales reacciones del proceso de electrocoagulación son con electrodos de aluminio y de hierro, debido a que son eficientes y accesibles.

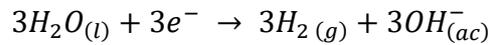
2.7.1 Reacciones con electrodos de aluminio

La disolución electrolítica del ánodo de aluminio produce especies catiónicas monoméricas tales como Al^{3+} y $Al(OH)_2^+$ a pH bajo (entre 4 y 6), a pH de valores adecuado (entre 7 y 11) se transforman químicamente en $Al(OH)_3$ y finalmente se polimeriza para dar $Al_n(OH)_{an}$ según las siguientes reacciones (Mollah, et al., 2004).

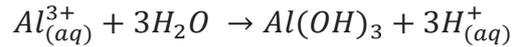
En el ánodo:



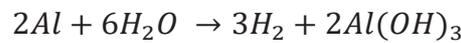
En el cátodo:



Al mismo tiempo se llevan a cabo las reacciones químicas en el interfaz para formar los óxidos de aluminio.



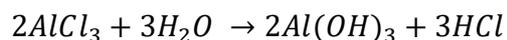
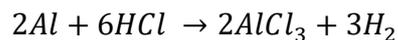
En general:



Sin embargo, dependiendo del pH del medio acuoso pueden estar presente en el sistema otras especies iónicas, como: $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)_2^{4+}$ y $Al(OH)_4^-$.

Los iones Al^{3+} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^+$, y otras poliméricas, tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{35}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(s)}$, como se muestra en la reacción del ánodo (-). El $Al(OH)_{3(s)}$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que elimina eficazmente los contaminantes.

La presencia de iones cloruro en el efluente a tratar, disminuye la pasivación de la superficie del Al incrementando la eficiencia de la electrocoagulación, lo recomendable es mantener cantidades de Cl^- alrededor del 20 por ciento. Un método para la reducción de la pasivación ocasionada por la capa de contaminantes depositada en la superficie del Al es el que se presenta a continuación (Restrepo et al., 2006):



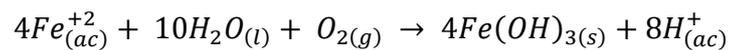
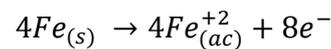
La renovación de la superficie de los electrodos se puede conseguir al cambiar su polaridad, de modo que el ánodo funcione como cátodo periódicamente, de esta forma el hidrógeno desprendido favorece la renovación de la superficie las placas (Cañizares et al., 2004).

2.7.2 Reacciones con electrodos de hierro

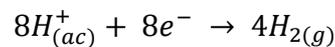
El hierro al oxidarse en un sistema electrolítico produce hidróxido de hierro, $Fe(OH)_n$ donde $n = 2$ o 3 . Se han propuesto dos mecanismos para la producción de $Fe(OH)_n$ (Restrepo et al., 2006).

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

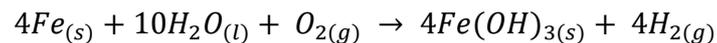
En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación:



En el cátodo ocurre la reacción:

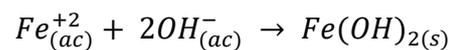
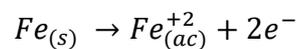


Reacción global:

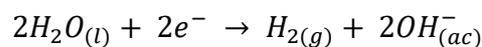


Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso:

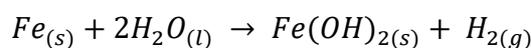
En el ánodo se presentan las reacciones:



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 (Restrepo et al., 2006).

2.8. Aspectos generales a considerar

Los aspectos generales a considerar al trabajar con sistemas de electrocoagulación son los que se mencionan en el Cuadro 2:

Tabla 2: Aspectos a considerar al trabajar con sistemas de electrocoagulación

Aspecto	Observación
Consumo de energía	Varían entre 0,1 a 1,0 kWh/m ³ dependiendo del tipo de efluentes a tratar.
Desgaste de electrodos	Está directamente relacionado con la corriente aplicada al sistema y el tiempo de operación. Se establece que el reemplazo de los electrodos sea mínimo de 2 veces por año.
Condiciones de operación	Se puede automatizar el sistema de electrocoagulación de forma que se pueda regular la corriente y el voltaje a través de controles de acuerdo a la calidad del agua residual.
Producción de lodos	La generación de lodos es proporcional al nivel de contaminantes presentes en el efluente, y de las especies catiónicas que se disuelven en el agua de acuerdo con la corriente aplicada a los electrodos. Por lo general se obtienen lodos compactos con un nivel de humedad entre el 97 a 99%.

FUENTE: Chávez, *et al.*, 2009.

2.9. Variables que influyen en la electrocoagulación

2.9.1 El pH

Las variaciones del pH dependen del material de los electrodos y del pH inicial del agua residual, al trabajar en medios ácidos el pH aumenta durante el proceso debido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo mientras que en aguas residuales alcalinas puede decrecer. Para efluentes con contenido de metales pesados y contenido de cianuros, se puede tolerar un pH entre 5 - 6, en términos generales las eficiencias más altas en remoción se han obtenido a potenciales cercanos a 7, por ejemplo la eliminación óptima de arsénico en aguas de consumo se da a un pH entre 6 y 8, las mejores remociones de DQO y turbiedad en efluentes textiles se dan a un pH de 7 (Holt, et al., 2005).

2.9.2 Densidad de corriente

“En todo proceso electrolítico la densidad de corriente es el parámetro más importante para controlar la velocidad de reacción dentro del sistema” (Ojeda y Hing, 2010). Este parámetro influye tanto en la remoción del contaminante del agua residual como en el consumo de energía. El aumento en la densidad de corriente significa un incremento en los costos de operación y un mayor porcentaje de remoción de contaminantes, sin embargo para altos consumos de energía se tienen pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica debido al incremento en la temperatura del agua residual tratada.

2.9.3 Conductividad eléctrica

La densidad de corriente está relacionada con la conductividad, un aumento en la conductividad eléctrica provoca un incremento en la densidad de corriente. La conductividad de las aguas residuales a tratar puede mejorar con la adición de cloruro de sodio o calcio a la vez que disminuye los efectos adversos de los iones carbonatos o sulfatos. Estos iones conducen a la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} sobre los electrodos formando una capa insoluble que aumenta el potencial y disminuye la eficiencia de la corriente. Para efluentes con contenido de metales pesados se puede tolerar una conductividad de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Holt, et al., 2005).

2.9.4 Material del electrodo

El material del electrodo debe tener resistencia química y buenas propiedades electroquímicas, por lo cual el cátodo debe contar con elevados sobre potenciales que favorezcan las reacciones de descomposición del agua y permitan obtener elevados rendimientos electroquímicos. Con frecuencia en la depuración de efluentes industriales se usan electrodos de aluminio y hierro (Aristizabal y Bermúdez, 2007).

2.9.5 Distanciamiento entre placas

Las variables que tienen mayor influencia en la eficiencia de remoción del Cr^{+6} es el tiempo de reacción y la distancia entre electrodos (a mayor tiempo de residencia y menor distancia entre electrodos, mayor eficiencia de remoción). La acumulación de burbujas en los electrodos debe ser minimizada debido a que aumenta la residencia (Arboleda y Herrera, 2013).

2.10. Cálculo del trabajo eléctrico

El trabajo eléctrico se puede calcular mediante la ecuación [1.9] (Maron y Prutton, 1996).

$$E = V \times I \times t \text{ (ec. 17)}$$

Donde:

E: trabajo eléctrico (J)

V: diferencia de potencial (V)

I: intensidad de corriente (A)

t: tiempo de operación (s)

2.11. Costos de operación

Una ventaja importante de la electrocoagulación es que permite la remoción de un elevado porcentaje de contaminantes en una sola operación, además de la sencillez de los equipos, por lo cual se ha convertido en una opción económica para el tratamiento de las aguas residuales de varias industrias.

Por otra parte los requerimientos de corriente eléctrica son bajos razón por la cual se puede emplear energía solar, eólica o pilas de combustible (Cañizares et al., 2004).

Al comparar la electrocoagulación contra la coagulación química con flotación por aire disuelto, se encontró que el costo incrementa según la densidad de corriente aumentaba, y que el costo por el consumo de los electrodos de aluminio representaba de un 70 a 90 por ciento del costo total (Jiang, et al., 2002).

Los costos por concepto del material del electrodo en el caso de que este sea aluminio, son de 6 USD/kg es decir para dosificaciones de 81 mg Al/L genera un costo del agua tratada (sólo por material de electrodos) de 0,50 USD/m³ (Piña et al., 2005).

2.12. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

2.12.1 Ventajas:

- ✓ Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- ✓ Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- ✓ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- ✓ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que representa un problema de disposición final de lodos.
- ✓ Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- ✓ Alta efectividad de remoción en un amplio rango de contaminantes.
- ✓ Purifica el agua y permite su reciclaje.
- ✓ El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- ✓ Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- ✓ El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- ✓ Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.

- ✓ Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde puede ser removidos con mayor facilidad.

2.12.2 Desventajas:

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

2.13. Antecedentes de investigación

2.13.1 Sistema de Electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas

Se realizó un sistema piloto de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales con fines de reusó, en este trabajo se usaron aguas residuales industriales de origen galvánico. Para su desarrollo, se valoró y optimizó un prototipo existente en la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, a partir de los ensayos realizados en aguas residuales con contenido de metales, implementando un porcentaje mayor al 47 por ciento para la remoción de metales pesados como Cr^{+6} , Pb y Zn de tales aguas, mediante el proceso de electrocoagulación (Morales y Acosta, 2010).

Para el estudio, se utilizaron 10 L de agua residual correspondientes al vertimiento de la empresa Compañía Eléctrica Ltda. Los análisis se hicieron, mediante la confrontación de parámetros de Cu, Ni, Cr, Cr^{+6} , Pb y Zn, antes y después del tratamiento de electrocoagulación. Como se observa en la Figura 7, se obtuvo una reducción en Cr del 51.65 por ciento, donde el valor arrojado está por debajo de los estándares establecidos en materia de vertimientos, Ni 18.09, Pb 50, Zn 47.37 por ciento, los cuales a pesar de la remoción producida, tienen valores superiores a lo estipulado en la normativa colombiana para vertimientos. El Cu tuvo un aumento del 519.48 por ciento, debido a la placa empleada para el tratamiento. Los valores promedio obtenidos

durante los ensayos fueron: pH: 3.18, conductividad: 21.83 mS/m y temperatura: 48.5 °C (Morales y Acosta, 2010).

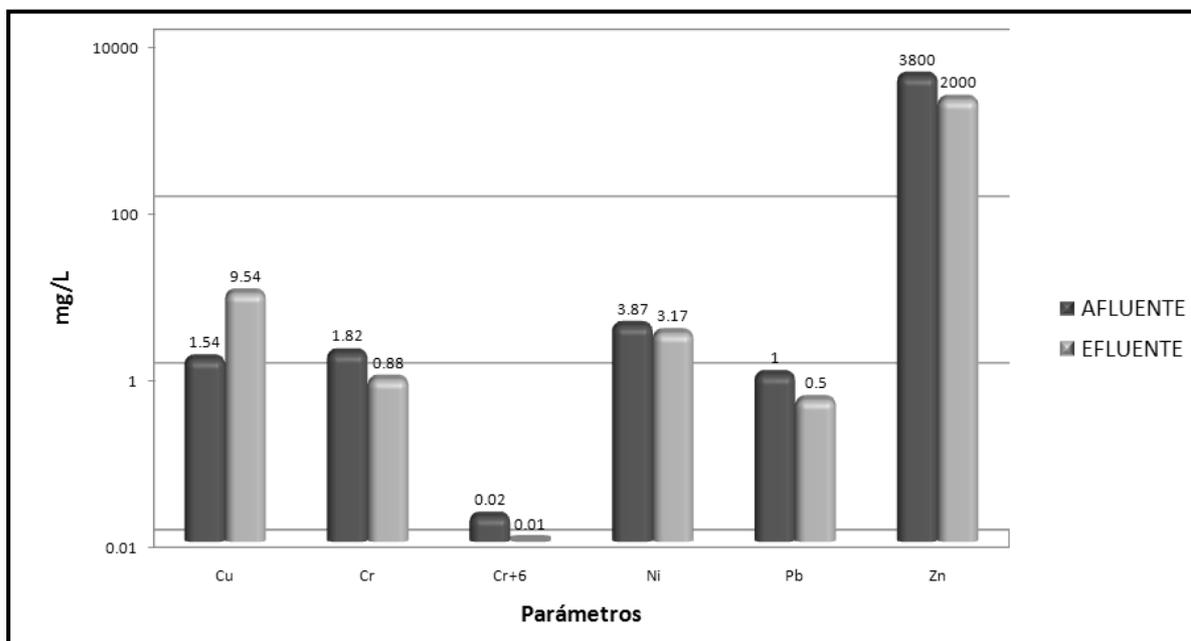


Figura 7: Caracterización del agua residual galvánica antes y después del tratamiento

FUENTE: Morales y Acosta, 2010

2.13.2 Electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales

La remoción de metales pesados en aguas residuales por algunos métodos ha preocupado a las autoridades ambientales, debido a los altos costos, además de la generación de residuos secundarios y en algunas ocasiones la poca eficiencia de los procesos empleados. Con el fin de retirar metales pesados en aguas, se han desarrollado estudios en el campo de la electrocoagulación, postulando dicho proceso como alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales, ya que éste genera pocos residuos secundarios, es rentable económicamente y tiene altos porcentajes de remoción, cercanos o iguales al cien por ciento. En la Figura 8 se muestra una recopilación bibliográfica de los últimos años que evidencia el uso e importancia de la electrocoagulación con el fin de remover diferentes metales como: hierro, níquel, cobre, zinc, plomo, cadmio, mercurio y cromo hexavalente, presentes en aguas residuales, para mejorar

los parámetros en el proceso de remoción de estos contaminantes ambientales que son tan perjudiciales para la salud (Acosta, et al., 2013).

Variedad	Parámetros				Valores de remoción	Ref.
	Densidad corriente	Potencial eléctrico	Tiempo	pH		
Aguas residuales que contienen Cu^{2+} , Zn^{2+} y Cr^{6+}	0,8 - 4,8 A/dm ²	N.R	20 min Zn y Cu 60 min Cr (VI)	4,0 - 8,0	98%	(Adhoum et al., 2004)
Cr^{3+} en agua	32,52 mA/cm ² Electrolito de apoyo NaCl	N.R	60 min	3,4	98%	(Golder et al., 2006)
Cr^{6+} en agua	Corrientes \leq 0,1 A	0,9 V	45 min	N.R	Remoción total	(Heidmann y Calman., 2008)
Aguas residuales que contiene Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+}	0,5 A/dm ²	N.R	30 min	5,4	\geq 98%	(Mouedhen et al., 2008)
Cr^{6+} en agua	N.R	12,8 V	24 min	5,0	90,4%	(Bhatti et al., 2009)
Cr^{6+} en agua	200 A/m ² Electrodos de Fe	N.R	30 min	9,0	Remoción total	(Zongo et al., 2009)
Aguas residuales que contienen Fe^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} y Cd^{2+}	11,55 mA/cm ²	30 V	15 min	7,6	95%	(Merzouk et al., 2009)
Cr^{6+} en agua	Presencia de NaCl y H_2SO_4	N.R	60 min	6,5	99 %	(Arroyo et al., 2009)
Cr^{6+} en agua proveniente de curtiembres	64 mA/cm ² EDTA como agente quelante	N.R	24 min	2,4	99 %	(Duranteet al., 2011)
Cr^{6+} en agua	0,2 A/m ²	N.R	N.R	7,0	98,2%	(Vasudevan et al., 2011)
Aguas residuales que contiene Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{6+}	10 mA/cm ²	N.R	20 min	3,0	Remoción total	(Akbal y Camci., 2011)

N.R: Dato no registrado

Figura 8: Condiciones óptimas para remoción de contaminantes por electrocoagulación a escala de laboratorio

FUENTE: Acosta, et al., 2013

2.13.3 Influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación.

Morante, citado por Arévalo (2016) en su investigación denominada “Electrocoagulación de aguas residuales”, teniendo como variables el pH, densidad de corriente y tipo de electrodos, determinó que el mayor porcentaje de reducción se logra en rangos de pH iniciales entre 3 y 5, densidad de corriente de más de 50 A/m², para tiempos de 50 minutos, utilizando electrodos de acero al carbono y aluminio, logrando un porcentaje de reducción de hasta 99.8 por ciento.

2.14. Valores máximos admisibles

Los Valores Máximos Admisibles (VMA), se entienden como el valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario y si este es excedido causa un daño a las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias, equipos de los sistemas de alcantarillado (Ver Cuadro 3).

Tabla 3: Valores Máximos Admisibles

Parámetros	Valores Máximos Admisibles
Aluminio	10 mg/L
Arsénico	0.5 mg/L
Cadmio	0.2 mg/L
Cobre	3 mg/L
Cromo Hexavalente	0.5 mg/L
Cromo Total	10 mg/L
Níquel	4 mg/L
Plomo	0.5 mg/L
Sulfatos	1000 mg/L
Sulfuros	5 mg/L
pH	6 – 9
Temperatura	< 35°C

FUENTE: D.S. 001-2015 - Vivienda

2.15. Prueba estadística

Una prueba estadística es una forma de evaluar la evidencia que los datos proporcionan para probar una hipótesis. Esta hipótesis se denomina hipótesis nula, y suele denominarse H_0 .

2.15.1 Análisis paramétricos

Hay dos tipos de análisis que pueden realizarse: los análisis paramétricos y los no paramétricos. Cada tipo posee sus características y presuposiciones que lo sustentan y la elección del investigador sobre qué clase de análisis efectuar depende de estas presuposiciones. Asimismo, cabe destacar que en una misma investigación pueden llevarse a cabo análisis paramétricos para algunas hipótesis y variables, y análisis no paramétricos para otras (Hernández, et al., 2006).

Para realizar análisis paramétricos debe partirse de los siguientes supuestos:

- La distribución poblacional de la variable dependiente es normal: el universo tiene una distribución normal.
- El nivel de medición de la variable dependiente es por intervalos o razón.
- Cuando dos o más poblaciones son estudiadas, éstas tienen una varianza homogénea: las poblaciones en cuestión tienen una dispersión similar en sus distribuciones (Hernández, *et al.*, 2006).

2.15.2 Métodos o pruebas estadísticas más utilizadas

- Coeficiente de correlación de Pearson y la regresión lineal.
- Prueba “t”.
- Prueba de contraste de la diferencia de proporciones.
- Análisis de varianza factorial (ANOVA).
- Análisis de covarianza (ANCOVA).

2.15.3 Análisis factorial de varianza

Es una prueba estadística para evaluar el efecto de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente. Constituye una extensión del análisis de varianza unidireccional, solamente que incluye más de una variable independiente. Evalúa los efectos por separado de cada variable independiente y los efectos conjuntos de dos o más variables independientes (Hernández, et al., 2006).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Caracterización del efluente del laboratorio Alfred H. Knight

La caracterización se realizó con el fin de tener una línea base de los parámetros antes del tratamiento de electrocoagulación para luego compararlos con las muestras tratadas y evaluar la eficiencia del proceso.

3.1.1 Materiales

Los materiales usados para la caracterización fueron:

- Protección: Mascarilla, guantes y mandil
- Botellas de plástico con tapa 1/2 L
- 4 Galones vacíos de 25 L
- Equipo de Espectrofotometría
- Equipo ICP

3.1.2 Metodología

Se tomó una muestra de los efluentes generados por el laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight provenientes del primer lavado, durante la jornada de trabajo los efluentes se acumulan en dos tanques de 500 litros cada uno y luego de 4 días aproximadamente viene una EPS a llevarse el contenido y realizar su disposición final. Se coordinó con personal de la empresa para tomar la muestra horas antes del recojo de los líquidos, se tomó una muestra para la caracterización en envases de ½ litro para determinar parámetros de metales, con adición de ácido nítrico, $\text{pH} < 2$ para preservar las muestras. Adicionalmente se tomaron 90 litros para realizar los diferentes ensayos, estos fueron recolectados el día 20 de noviembre del 2017. Debido a que se almacenan los efluentes durante 4 días se procedió previamente a realizar una agitación en el tanque para luego recolectar a una

altura media del tanque y obtener una muestra representativa.

En el Cuadro 4 se observa cada parámetro, la metodología utilizada y el laboratorio donde se llevó a cabo la determinación de cada uno de los parámetros.

Tabla 4: Metodologías usadas para el análisis de los parámetros

Parámetro	Unidad	Metodología	Laboratorio
pH	Unidades de pH	SM N° 4500 H + B	Laboratorio de Ingeniería Ambiental
Pb	mg/L	ME-LW-015/ICP-I-03 ¹	LASMAF ³ /LAHK ⁴
Cd	mg/L	ME-LW-015/ICP-I-03	LASMAF/LAHK
Cr	mg/L	ME-LW-015/ICP-I-03	LASMAF/LAHK
Al	mg/L	ICP-I-03 ²	LAHK
Fe	mg/L	ICP-I-03	LAHK

¹Metodología del LASMAF (Ver Anexo 3)

²Metodología de Laboratorio AHK (Ver Anexo 4)

³LASMAF: Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertilización

⁴LAHK: Laboratorio Alfred H. Knight

3.2 Diseño del reactor

En esta etapa fueron definidos los parámetros que rigen el diseño del reactor de electrocoagulación monopolar conectado en paralelo, este fue planeado de forma rectangular, de un solo canal conformado por placas paralelas de polos opuestos en secuencia.

3.2.1 Materiales

- 2 Celdas de vidrio de 5 mm
- 2 Caños de plástico
- 5 metros de cable de 12 AWG
- 5 metros de cable de 18 AWG
- Conectores cocodrilo

- 20 Placas de aluminio
- 20 Placas de hierro
- Transformador variable.
- Llave cuchilla
- Amperímetro
- Condensador electrolítico 100 uf – 160 V
- Puente de diodo KBPC 25 A, 1000 V
- Canaletas de 1.5 cm y 1 cm.
- Soldador

3.2.2 Metodología

La celda de electrocoagulación se diseñó considerando una distribución volumétrica que contempla 3 regiones: una región superior para el depósito de lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas, llamada zona de flotación, una región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción donde se encuentran los electrodos y una región inferior, llamada zona de sedimentación donde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos (Arango y Garcés, 2007).

Los electrodos (aluminio y hierro) se diseñaron como placas rectangulares de 9 cm x 9 cm x 3 mm de espesor y se trabajaron con dos distancias entre placas 1 y 1.5 cm. El número de placas se determinó colocando la separación entre electrodos más el espesor de cada placa, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{ancho celda}) - 2 \times (\text{dist. electrodos a lateral})}{(\text{distancia máx. entre electrodos} + \text{espesor placa})}$$

Luego de calcular el número de electrodos y calcular el área total de contacto con el efluente, se debe hallar la intensidad de trabajo necesaria reemplazando el área total y la densidad de corriente en la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{I}{A}$$

Donde:

δ : Densidad de corriente (A/m²)

I: Intensidad de Corriente (A)

A: Área total (m²)

3.3 Determinación de parámetros óptimos

Para hallar el mejor rendimiento del método de electrocoagulación se definió los parámetros de funcionamiento que tienen mayor efecto en este proceso. Los parámetros evaluados fueron material de los electrodos, distancia entre electrodos y tiempo de remoción. Los metales pesados Pb, Cd y Cr fueron el parámetro control para evaluar la eficiencia de remoción del electrocoagulador, esto teniendo en cuenta que los efluentes contaminados que se generan en los procesos de Vía Impurezas y Húmeda son producto de los análisis de Pb, Cd y Cr.

El factor más importante en el proceso de electrocoagulación es la densidad de corriente, para todos los ensayos se utilizó una densidad de corriente de 50 A/m² sugerido por Morante (2002).

3.3.1 Materiales

- Efluente del Laboratorio Alfred H. Knight.
- Reactor de Electrocoagulación
- Cronómetro
- pH HACH
- Equipo de Espectrofotometría
- Botellas de 500 mL para muestras
- Lija fierro # 80
- InfoStat

3.3.2 Metodología

3.3.2.1 Diseño Factorial 3 x 2 x 2

De acuerdo con la metodología para el diseño de experimentos se desarrollará un diseño factorial de tres factores, evaluando los efectos de cada variable independiente sobre la dependiente por separado y los efectos de las variables independiente conjuntamente (Ver Cuadro 5).

Tabla 5: Variables dependientes e independientes del diseño factorial

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES
Tiempo de Remoción (min) 20 40 60	% de Remoción Pb % de Remoción Cd
Separación entre placas (cm) 1 1.5	% de Remoción Cr
Material de las placas Hierro Aluminio	

El porcentaje de remoción se calculará de la siguiente manera:

$$\% \text{ de Remoción metal} = \frac{C_{\text{inicial metal}} - C_{\text{final metal}}}{C_{\text{inicial metal}}} \times 100$$

De acuerdo a lo anterior se realizaran 12 ensayos de experimentación con 3 repeticiones en el reactor de electrocoagulación como se muestra en el Cuadro 6.

Tabla 6: Diseño factorial

Distancia entre placas	Tiempo de Remoción					
	20 min		40 min		60 min	
	Material de placas		Material de placas		Material de placas	
	Hierro	Aluminio	Hierro	Aluminio	Hierro	Aluminio
1 cm	R1	R1	R1	R1	R1	R1
	R2	R2	R2	R2	R2	R2
	R3	R3	R3	R3	R3	R3
1.5 cm	R1	R1	R1	R1	R1	R1
	R2	R2	R2	R2	R2	R2
	R3	R3	R3	R3	R3	R3

3.3.2.2 Análisis de Varianza - ANOVA

La evaluación de los efectos de la interacción de variables de los ensayos de electrocoagulación se desarrollará por medio de un análisis de varianza o más brevemente ANOVA que consistirá en el análisis de respuestas cuantitativas del conjunto de situaciones experimentales planteadas, que determinó la diferencia estadística de los 36 ensayos de electrocoagulación en términos de remoción de contaminantes, basados en la comprobación de las siguientes hipótesis:

- H_i (hipótesis alternativa): El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que inciden en la remoción de metales pesados.
- H_o (hipótesis nula): El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que no inciden en la remoción de metales pesados.

Este análisis será desarrollado con un software estadístico llamado InfoStat.

3.3.2.3 Supuestos de ANOVA

El análisis de varianza es sensible a las propiedades estadísticas de los términos de error aleatorio del modelo línea. Los supuestos tradicionales del ANOVA implican errores independientes, normalmente distribuidos y con varianzas homogéneas para todas las observaciones.

- Normalidad: Seleccionando los residuos como variable de análisis, una de las técnicas más usadas para construir un Q-Q plot normal. Mediante esta técnica se obtiene un diagrama de

dispersión de los residuos obtenidos versus los cuantiles teóricos de una distribución normal. Si los residuos son normales y no hay otros defectos del modelo, se alinearán sobre una recta de 45°.

- Homogeneidad de varianzas: Cuando los errores son homocedásticos, haciendo un gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos se debe observar una nube de puntos sin patrón alguno (patrón aleatorio). Si el gráfico muestra estructura habrá indicios para sospechar sobre el cumplimiento del supuesto.

3.4 Metodología para la evaluación del proceso de electrocoagulación

Se realizó una comparación entre los valores óptimos de los diferentes ensayos de electrocoagulación para Plomo, Cadmio y Cromo con los Valores Máximos Admisibles del D.S. 001-2015 – Vivienda.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización del efluente del laboratorio Alfred H. Knight

El día 20 de Noviembre del 2017 entre las 10:00 y 11 horas, se procedió con la toma de muestra, se coordinó previamente con personal de Alfred H. Knight para que indicaran el día en el cual la EPS-RS realizaría el recojo de los líquidos peligrosos y se pudiera realizar la toma de los líquidos horas antes, en ese momento también se tomó la cantidad necesaria para realizar todos los ensayos.

Como se puede observar en la Figura 9 la empresa Alfred H. Knight cuenta con dos tanques y un área para el almacenamiento para los líquidos peligrosos y la toma de muestra no fue complicada por la facilidad de acceso a esta área.



Figura 9: Tanque de almacén de Líquidos Peligrosos

Se realizó la caracterización del efluente y se analizaron los parámetros en el Laboratorio de Agua, Suelo, Medio Ambiente y Fertirriego, los resultados se observan en el Cuadro 7.

Tabla 7: Caracterización de los efluentes del Laboratorio Alfred H. Knight

Parámetros	Valores Máximos Admisibles
Cadmio	1.74 mg/L
Cromo	0.55 mg/L
Plomo	167.1 mg/L
pH	3.2

Para tener una comparación visual de los resultados del Cuadro 7 con los Valores Máximos Admisibles se graficaron los resultados como se observa en la Figura 10.

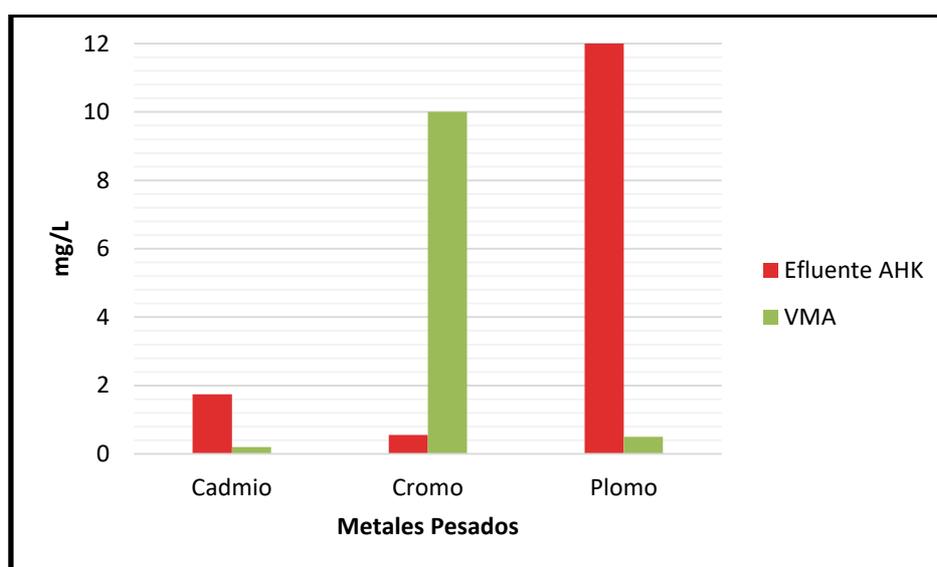


Figura 10: Caracterización Efluente Alfred H. Knight vs VMA – Metales Pesados

Los resultados de la caracterización para metales pesados muestra que el Cadmio y Plomo se encuentran por encima de los Valores Máximos Admisibles a diferencia del Cromo que se encuentra dentro de lo permitido.

La Figura 11 muestra que el pH se encuentra por debajo del rango permitido presentando un pH ácido, Según Holt, et al., (2005) al trabajar en medios ácidos el pH aumenta durante el proceso debido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo.

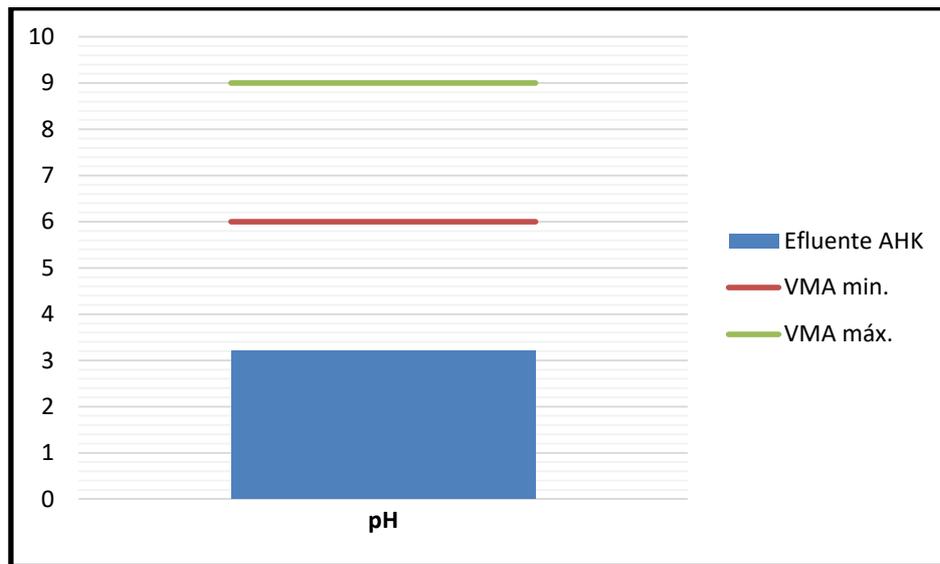


Figura 11: Caracterización Efluente AHK vs VMA – pH

4.2. Diseño del sistema de electrocoagulación

4.2.1 Celda de electrocoagulación

Para la construcción de la celda de electrocoagulación se consideraron las siguientes especificaciones:

- ✓ Material: Se eligió que la celda sea de vidrio de 5 mm de espesor por la facilidad de su elaboración (Ver Figura 12).
- ✓ Distancia entre electrodos: Se observó en pruebas exploratorias que para separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm los tratamientos se hacen prolongados, adicionalmente se presentaron atascamientos por deposición de lodo (Arango y Garcés, 2007). Se tomaron 10 mm y 15 mm para ver el efecto que tiene una mayor distancia a 10 mm entre electrodos para la remoción de metales pesados.
- ✓ Material de los electrodos: Se utilizaron electrodos de hierro y aluminio por: la disponibilidad de los metales, son relativamente baratos, amplia información bibliográfica en la que se reportan buenas remociones de contaminantes con estos materiales en la electrocoagulación y adicionalmente son los metales más utilizados en el proceso (Kobyta y Chen citados por Arango y Garcés, 2007).

- ✓ Volumen total de la celda: 6.168 L (Se consideró este volumen para el tratamiento de volúmenes de muestra de 5.00 L).



Figura 12: Celdas de Vidrio

Se mandaron a hacer dos celdas, así luego poder colocar las separaciones entre placas de 1 cm y 1.5 cm, esto permitió trabajar de una manera más rápida.

Posteriormente el número de electrodos para los experimentos de remoción de metales pesados se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{ancho celda}) - 2 \times (\text{dist. electrodos a lateral})}{(\text{distancia máx. entre electrodos} + \text{espesor placa})}$$

Reemplazando los datos tenemos:

$$N^{\circ} \text{ de electrodos} = \frac{(408 \text{ mm}) - 2(31,5 \text{ mm})}{15 \text{ mm} + 3 \text{ mm}} = 19,166 \approx 20$$

Por consiguiente se emplearon un total de 20 electrodos, 10 placas conectadas al ánodo y 10 placas conectadas al cátodo (Ver Figura 13 y 14).

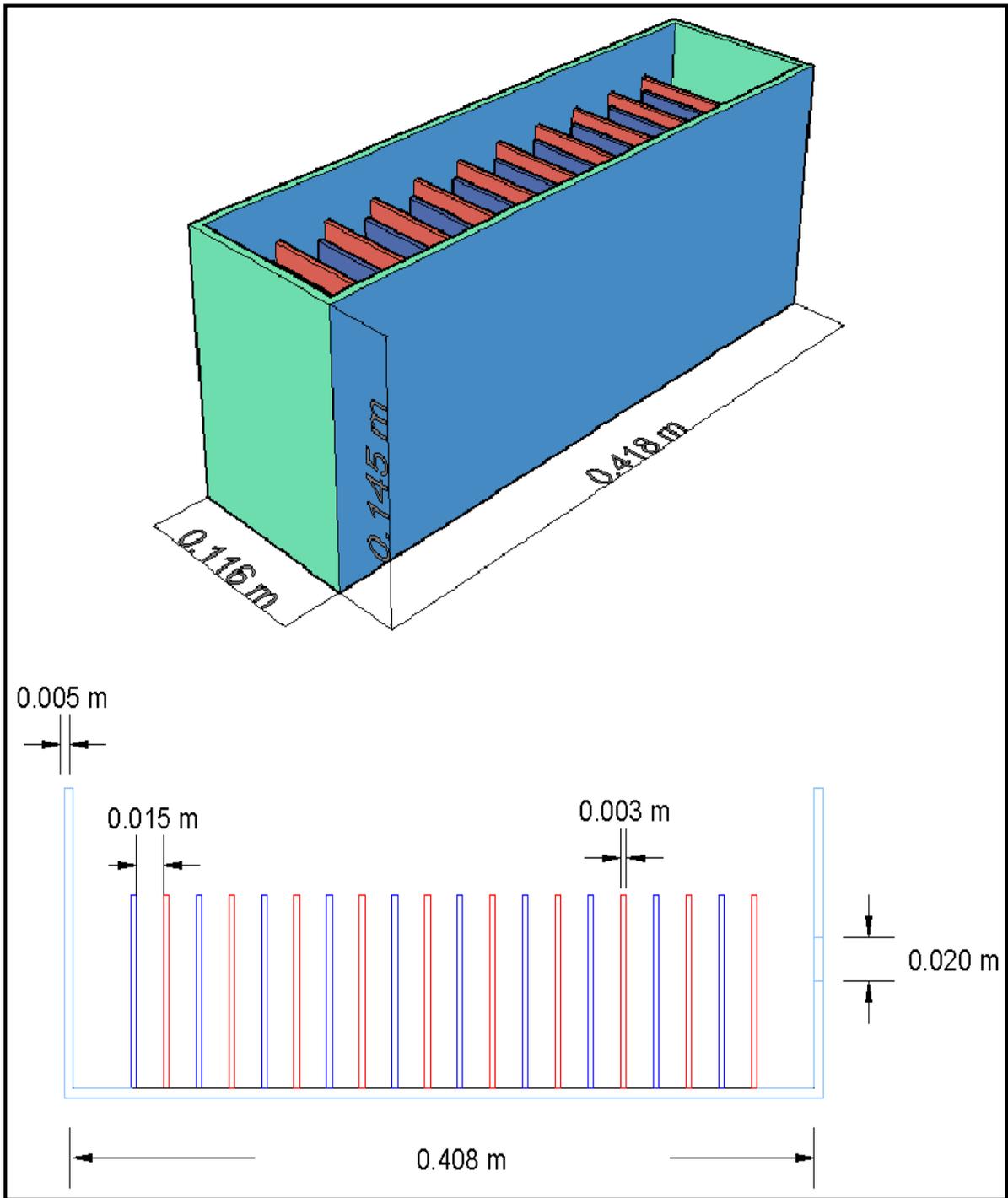


Figura 13: Dimensiones Celda de Electrocoagulación – Distancia entre placas 1.5 cm

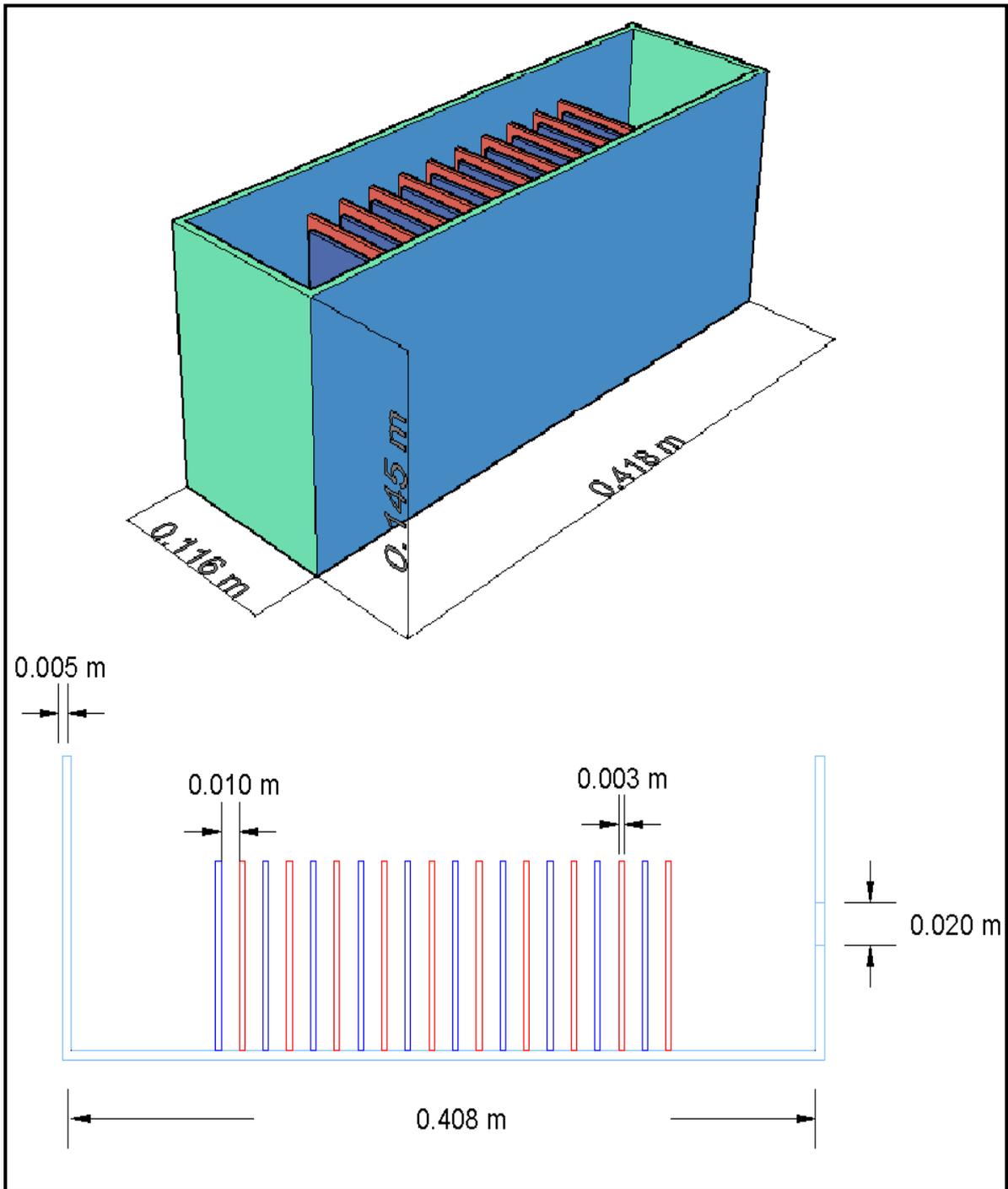


Figura 14: Dimensiones Celda de Electrocoagulación – Distancia entre placas 1.0 cm

4.2.2 Fuente de corriente continua

Para determinar la intensidad de corriente necesaria en los experimentos, se debe hallar el área total efectiva, por este motivo se realizan los siguientes cálculos:

Determinación del área efectiva de reacción del electrodo:

$$\text{Área frontal} = 9 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} = 63 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área borde lateral} = 0.3 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} = 2.1 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de la base} = 0.3 \text{ cm} \times 9 \text{ cm} = 2.7 \text{ cm}^2$$

Área efectiva total de reacción:

$$\text{Área frontal} \times N^\circ \text{ de electrodos} = 63 \text{ cm}^2 \times 40 = 2520 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área borde lateral} \times N^\circ \text{ de electrodos} = 2.1 \text{ cm}^2 \times 40 = 84 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de la base} \times N^\circ \text{ de electrodos} = 2.7 \text{ cm}^2 \times 20 = 54 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área total de reacción} = 2658 \text{ cm}^2 = 0.2658 \text{ m}^2$$

La intensidad de corriente se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{I}{A}$$

Reemplazando los datos tenemos:

$$50 \text{ A/m}^2 = \frac{I}{0.2658 \text{ m}^2}$$

$$I = 13.29 \text{ A} \approx 14 \text{ A}$$

La fuente de corriente continua que se utilizó en esta investigación fue prestada por el Laboratorio de circuitos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, el profesor José Fernando Alva Yance brindó su apoyo para que el sistema de electrocoagulación trabaje a 14 A.

Se utilizó un transformador variable conectado a una llave cuchilla con fusibles de plomo de 20 A, debido a que el transformador genera corriente alterna esta se transformó en corriente

continúa utilizando un Puente de diodo KBPC 25 A, 1000 V unido a un condensador electrolítico 100 μf – 160 V, para todas estas conexiones se utilizaron cables de 12 AWG, los electrodos fueron conectados utilizando un conector cocodrilo para cada uno y cables de 18 AWG, también se conectó un amperímetro al sistema para medir constantemente la intensidad de corriente (Ver Figura 15). Se realizó una prueba con el efluente para calcular cuánto era el voltaje necesario para llegar a los 14 A en condiciones reales, durante la prueba a pesar de que se utilizó un Puente de diodo con una capacidad de 25 A y 1000 V, este se calentó y luego de trabajar alrededor de 15 minutos a 14 A y 1.5 V el puente de diodo se fundió. Por este motivo se añadió al sistema un ventilador cooler que se conectó a una batería externa, con este dispositivo se pudo trabajar los 60 minutos necesarios para los diferentes experimentos.

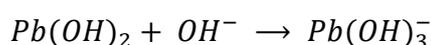
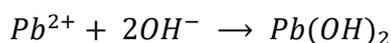


Figura 15: Fuente de Corriente Continua para el proceso de Electrocoagulación

4.3 Determinación de parámetros óptimos

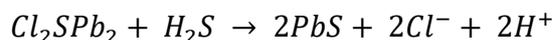
4.3.1 Plomo

Se puede observar que el plomo ha logrado un alto porcentaje de remoción, esto se debe a la generación de OH⁻ por el catión se forman hidróxidos el cual forma un precipitado blanco, este hidróxido al ser de carácter anfótero, se disuelve en exceso originando el anión plumbito.



Se debe tener en cuenta que los efluentes contienen ácido sulfhídrico, ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico.

Según Burriel, et al (2008) el ácido sulfhídrico forma un precipitado negro con el plomo PbS, si el medio es moderadamente clorhídrico, suele precipitar un sulfocloruro de color rojo naranja. Continuando la acción del sulfhídrico, o simplemente por dilución, precipita finalmente sulfuro negro.



Según Acosta, et al., (2013), se obtiene una remoción del 95 por ciento de Pb trabajando a un pH de 7.6 en 15 minutos, a diferencia de los ensayos realizados esta investigación que trabajaron con un pH de 3.2 y se obtuvo una remoción del 94.76 por ciento en 60 minutos. También se debe tener en cuenta la densidad de corriente empleada, ya que en esta investigación se utilizó menos de la mitad de la densidad de corriente necesaria en el otro experimento.

En el Cuadro 8 se observa que para el tratamiento de plomo se obtuvo un porcentaje de remoción final de hasta de 94.77 por ciento, utilizando electrodos de hierro, una distancia entre placas de 1 cm y un tiempo de retención de 60 minutos. La remoción más baja que se obtuvo fue de 88.69 por ciento, utilizando también como electrodos placas de hierro, una distancia entre placas de 1.5 cm y un tiempo de retención de 60 minutos. Los datos del Cuadro 8 fueron obtenidos del Anexo 3.

Tabla 8: Electrocoagulación - Plomo

Material de electrodo	Distancia entre placas	Tiempo de retención	% de Remoción			
			R1	R2	R3	PROMEDIO
Aluminio	1cm	20 min	89.93	85.91	89.41	88.42
Aluminio	1cm	40 min	90.17	88.97	91.48	90.21
Aluminio	1cm	60 min	93.48	94.55	95.69	94.57
Aluminio	1.5 cm	20 min	31.72	34.25	30.82	32.26
Aluminio	1.5 cm	40 min	91.66	90.23	92.94	91.61
Aluminio	1.5 cm	60 min	93.63	94.43	93.91	93.99
Hierro	1cm	20 min	46.80	45.82	51.08	47.90
Hierro	1cm	40 min	76.18	80.13	80.29	78.87
Hierro	1cm	60 min	94.42	94.83	95.06	94.77
Hierro	1.5 cm	20 min	14.54	16.59	15.88	15.67
Hierro	1.5 cm	40 min	38.84	42.99	34.65	38.83
Hierro	1.5 cm	60 min	83.84	91.39	90.84	88.69

Se puede observar también que a mayor distancia entre placas se obtuvo una menor eficiencia de remoción, para los electrodos se observa que aluminio predominó en la mayoría de los ensayos, sin embargo en promedio el electrodo de hierro logró el mayor porcentaje de remoción a una distancia de 1 cm.

Al incrementar el tiempo de electrocoagulación de 20, 40 y 60 minutos, se observa un aumento de la reducción de plomo para todos los casos.

4.3.1.1 Análisis Estadístico

Los resultados experimentales correspondientes a la remoción de plomo de los efluentes del laboratorio Alfred H. Knight fueron comparados mediante un análisis estadístico de varianza ANOVA, en donde se verificó la interacción de las variables respecto a la reducción de plomo por medio del tratamiento de electrocoagulación. La validación de los supuestos se encuentra en el Anexo 4.

Se observa en la Figura 16 que el p-valor resulta para todas las interacciones <0.0001 por este motivo se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que las tres variables independientes inciden en conjunto a la remoción de plomo en los efluentes.

Análisis de la varianza				
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
PLOMO	36	1.00	1.00	2.37

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo.	27258.77	11	2478.07	868.20	<0.0001	
Material de electrodo	3987.71	1	3987.71	1397.11	<0.0001	
Distancia entre placas	4241.70	1	4241.70	1486.09	<0.0001	
Tiempo de retención	13449.77	2	6724.89	2356.08	<0.0001	
Material de electrodo*Dist..	120.67	1	120.67	42.28	<0.0001	
Material de electrodo*Tiem..	1507.00	2	753.50	263.99	<0.0001	
Distancia entre placas*Tie..	2431.47	2	1215.73	425.94	<0.0001	
Material de electrodo*Dist..	1520.46	2	760.23	266.35	<0.0001	
Error	68.50	24	2.85			
Total	27327.28	35				

Figura 16: Resultados ANOVA - Plomo

- Hi: El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que inciden en la remoción de plomo.
- Ho: El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que no inciden en la remoción de plomo.

4.3.1.2 Prueba de Fisher

Como se encontró una triple interacción, se realiza la prueba de Fisher para determinar cuáles fueron las mejores condiciones, en la Figura 17 se puede observar que las mejores condiciones para remover plomo fue utilizando electrodos de hierro con una distancia de 1cm ente electrodos y un tiempo de retención de 60 min, se debe tener en cuenta que el uso de electrodos de hierro con los electrodos de aluminio no tuvieron una diferencia significativa, al presentar ambas condiciones la misma letra A.

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.84702					
Error: 2.8543 gl: 24					
Material de electrodo	Distancia entre placas	Tiempo de retención	Medias	n	E.E.
Hierro	1cm	60 min	94.67	3	0.98 A
Aluminio	1cm	60 min	94.20	3	0.98 A
Aluminio	1.5 cm	60 min	94.02	3	0.98 A
Aluminio	1.5 cm	40 min	91.17	3	0.98 B
Aluminio	1cm	40 min	89.78	3	0.98 B C
Aluminio	1cm	20 min	88.09	3	0.98 C
Hierro	1.5 cm	60 min	87.97	3	0.98 C
Hierro	1cm	40 min	78.39	3	0.98 D
Hierro	1cm	20 min	46.84	3	0.98 E
Hierro	1.5 cm	40 min	40.22	3	0.98 F
Aluminio	1.5 cm	20 min	32.74	3	0.98 G
Hierro	1.5 cm	20 min	15.60	3	0.98 H

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Figura 17: Resultados de Fisher - Plomo

Al presentar una triple interacción se elaboró una gráfica con las tres variables respecto al porcentaje de remoción de plomo, como se observa en la Figura 18 el electrodo de aluminio presenta un mayor porcentaje de remoción en la mayoría de los ensayos. Para la variable distancia entre placas se puede observar que a 1 cm se produjeron los mayores porcentajes de remoción. El tiempo estuvo directamente relacionado con la variable dependiente.

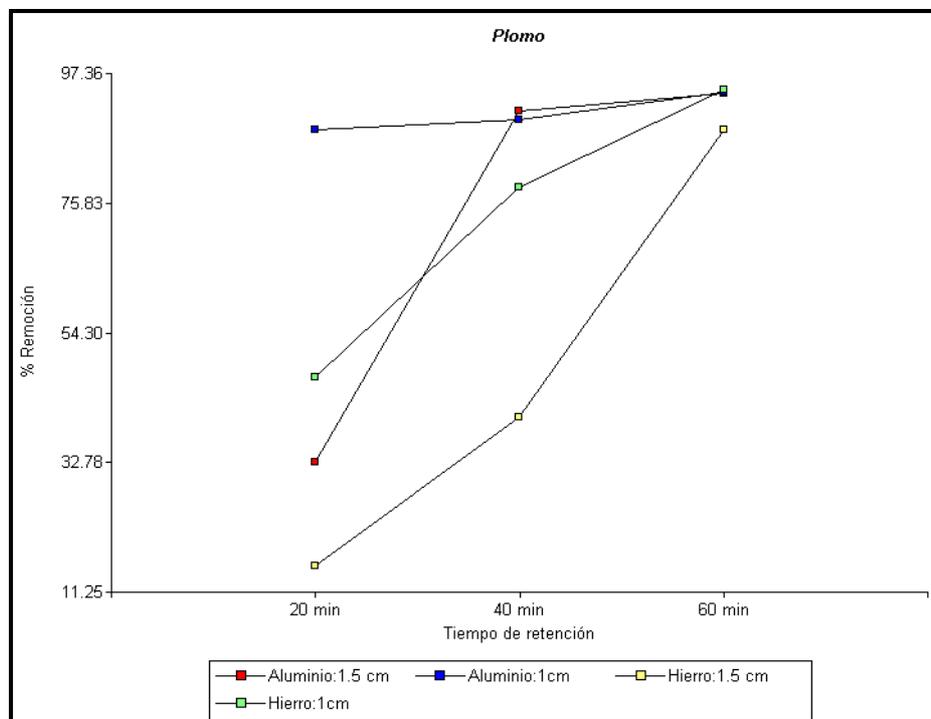
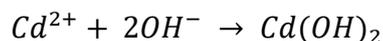


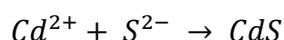
Figura 18: Variables Independientes vs % Remoción de Pb

4.3.2 Cadmio

A diferencia del plomo la remoción de cadmio fue menor, los OH⁻ producidos en el cátion hacen precipitar al cadmio como una forma blanca amorfa, insoluble en exceso.



Según Burriel, et al (2008) el cadmio en presencia de ácido sulfhídrico puede formar un precipitado amarillo CdS, que en medio ácido y caliente puede ser pardo y filtra bien.



Según Acosta, et al., (2013), al igual que para el plomo en un trabajo de investigación pasado se obtuvo una remoción del 95 por ciento de Cd trabajando a un pH de 7.6 y un tiempo de retención de 15 minutos, en esta investigación que trabajó a un pH de 3.2 y se obtuvo una remoción máxima del 49.54 por ciento en 60 minutos, utilizando una densidad de corriente y voltaje menor, se puede deducir que el pH fue determinante para la precipitación de Cd a diferencia que para el Pb en el cual a pesar de trabajar con un pH ácido se logró un alto porcentaje de remoción, se conoce que el $Cd(OH)_2$ precipita a un pH cercano a 8, lo cual puede haber perjudicado la remoción de Cd. En el Cuadro 9 se observa que para el tratamiento de cadmio se obtuvo un porcentaje de remoción máximo de 49.54 por ciento, utilizando electrodos de aluminio, una distancia entre placas de 1.5 cm y un tiempo de retención de 60 minutos.

Tabla 9: Electrocoagulación – Cadmio

Material de electrodo	Distancia entre placas	Tiempo de retención	% de Remoción			
			R1	R2	R3	PROMEDIO
Aluminio	1cm	20 min	39.24	35.99	37.61	37.61
Aluminio	1cm	40 min	40.87	41.77	40.69	41.11
Aluminio	1cm	60 min	44.30	45.57	48.46	46.11
Aluminio	1.5 cm	20 min	44.30	43.04	45.39	44.24
Aluminio	1.5 cm	40 min	46.47	47.20	45.57	46.41
Aluminio	1.5 cm	60 min	48.28	47.92	52.44	49.55
Hierro	1cm	20 min	27.49	24.41	28.75	26.88
Hierro	1cm	40 min	31.46	29.11	32.55	31.04
Hierro	1cm	60 min	36.17	32.73	40.14	36.35
Hierro	1.5 cm	20 min	31.83	32.55	28.39	30.92
Hierro	1.5 cm	40 min	35.99	33.27	41.95	37.07
Hierro	1.5 cm	60 min	44.48	48.28	43.94	45.57

Para el tratamiento de este metal se puede observar también que a mayor distancia entre placas se obtuvo una mayor eficiencia de remoción, para los electrodos se observa que el aluminio logró una mayor remoción de cadmio en las dos casos de distancias entre placas. Los datos del Cuadro 9 fueron obtenidos del Anexo 3.

4.3.2.1 Análisis Estadístico

Los resultados experimentales correspondientes a la remoción de cadmio de los efluentes del laboratorio Alfred H. Knight fueron comparados mediante un análisis estadístico de varianza ANOVA (Ver Figura 19), en donde se verificó la interacción de las variables respecto a la reducción de cadmio por medio del tratamiento de electrocoagulación. La validación de los supuestos se encuentra en el ANEXO 3.

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
CADMIO	36	0.93	0.89	6.04	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1733.79	11	157.62	27.83	<0.0001
Material de electrodo	818.15	1	818.15	144.47	<0.0001
Distancia entre placas	300.33	1	300.33	53.03	<0.0001
Tiempo de retención	543.29	2	271.65	47.97	<0.0001
Material de electrodo*Dist..	3.84	1	3.84	0.68	0.4183
Material de electrodo*Tiem..	39.97	2	19.98	3.53	0.0453
Distancia entre placas*Tie..	1.53	2	0.77	0.14	0.8740
Material de electrodo*Dist..	26.67	2	13.34	2.35	0.1165
Error	135.91	24	5.66		
Total	1869.70	35			

Figura 19: Resultados ANOVA - Cadmio

- Hi: El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que inciden en la remoción de cadmio.
- Ho: El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que no inciden en la remoción de cadmio.

El p-valor en todas las interacciones resulta mayor de 0.001, por este motivo se acepta la hipótesis nula, lo cual indica que las tres variables independientes no inciden en conjunto a la

remoción de cadmio. Por este motivo se debe evaluar cada parámetro por separado respecto a la remoción de cadmio para evaluar correctamente los resultados.

4.3.2.2 Prueba de Fisher

Debido a que las tres variables independientes no inciden en conjunto sobre la remoción de cadmio se deben evaluar estas variables de forma separada y se realiza la prueba de Fisher para determinar las condiciones en las cuales se obtuvo un mayor porcentaje de remoción (Ver Figuras 20, 21 y 22).

CADMIO - Medias ajustadas y errores estándares para
Material.de.electrodo
LSD Fisher (Alfa=0.05)
Procedimiento de corrección de p-valores: No

Material.de.electrodo	Medias	E.E.	
Aluminio	44.17	0.38 A	
Hierro	34.64	0.69	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes
($p > 0.05$)

Figura 20: Fisher / Cadmio – Material de electrodo

CADMIO - Medias ajustadas y errores estándares para
Distancia.entre.placas
LSD Fisher (Alfa=0.05)
Procedimiento de corrección de p-valores: No

Distancia.entre.placas	Medias	E.E.	
1.5 cm	42.29	0.60 A	
1cm	36.52	0.52	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes
($p > 0.05$)

Figura 21: Fisher / Cadmio – Distancia entre placas

CADMIO - Medias ajustadas y errores estándares para
Tiempo.de.retencion
LSD Fisher (Alfa=0.05)
Procedimiento de corrección de p-valores: No

Tiempo.de.retencion	Medias	E.E.	
60 min	44.39	0.79 A	
40 min	38.91	0.70	B
20 min	34.92	0.54	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes
($p > 0.05$)

Figura 22: Fisher / Cadmio – Tiempo de retención

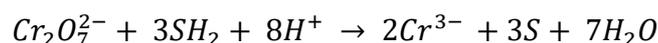
Como se observa en las Figuras 20, 21 y 22 las mejores condiciones para la remoción de cadmio son: aluminio como material de electrodo, 1.5 cm de distancia entre electrodos y un tiempo de retención de 60 minutos.

4.3.3 Cromo

Según Burriel, et al (2008), el Cr con valencia 6 por la acidez del elemento se exalta tanto que ya no puede existir como catión, formando el anión estable cromato CrO_4^{2-} , de color amarillo, en medio ácido se apropia de otra molécula de anhídrido, originando el anión dicromato de color rojo naranja. Por consiguiente la existencia de cromatos o dicromatos depende del pH.



Los dicromatos en medio ácido, son reducidos por H_2S a catión crómico, con precipitación de azufre.



Según Acosta, et al., (2013), en otra investigación se logró una remoción del 98 por ciento de Cr^{3+} en agua trabajando a un pH de 3.4, el cual es parecido al pH con el que se trabajó en esta investigación, sin embargo la densidad de corriente fue 352 A/m² a diferencia de los 50 A/m² utilizados en este trabajo. Adicionalmente utilizaron un electrolito de apoyo NaCl el cual influyó también en el alto porcentaje de remoción del metal. Otra investigación indicó que se logró remover cromo en agua en su totalidad, con un pH de 3.0 y en un tiempo de 20 minutos, pero se utilizó 100 A/m², con esto se puede tener un indicio de que para la remoción de cromo es más conveniente trabajar con una densidad de corriente más alta.

En el Cuadro 10 se observa que para el tratamiento de cromo se obtuvo un porcentaje de remoción máximo de 49.46 por ciento, utilizando electrodos de aluminio, una distancia entre placas de 1.0 cm y un tiempo de retención de 60 minutos. Los datos del Cuadro 10 fueron obtenidos del Anexo 3.

Tabla 10: Electrocoagulación – Cromo

Material de electrodo	Distancia entre placas	Tiempo de retención	% de Remoción			
			R1	R2	R3	PROMEDIO
Aluminio	1cm	20 min	38.97	35.00	37.82	37.26
Aluminio	1cm	40 min	39.31	41.61	40.69	40.54
Aluminio	1cm	60 min	47.18	52.87	48.33	49.46
Aluminio	1.5 cm	20 min	38.16	41.15	36.44	38.58
Aluminio	1.5 cm	40 min	43.68	42.53	44.02	43.41
Aluminio	1.5 cm	60 min	45.80	47.07	47.36	46.74
Hierro	1cm	20 min	5.00	4.02	6.26	5.10
Hierro	1cm	40 min	5.34	6.38	6.44	6.05
Hierro	1cm	60 min	16.49	17.93	18.85	17.76
Hierro	1.5 cm	20 min	10.06	9.14	12.87	10.69
Hierro	1.5 cm	40 min	28.16	28.33	29.25	28.58
Hierro	1.5 cm	60 min	35.11	36.84	34.48	35.48

4.3.3.1 Análisis Estadístico

Los resultados experimentales correspondientes a la remoción de cromo de los efluentes del laboratorio Alfred H. Knight fueron comparados mediante un análisis estadístico de varianza ANOVA (Ver Figura 23), en donde se verificó la interacción de las variables respecto a la reducción de cromo por medio del tratamiento de electrocoagulación. La validación de los supuestos se encuentra en el ANEXO 4.

Análisis de la varianza				
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CROMO	36	0.99	0.99	5.29

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)						
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo.	8474.61	11	770.42	305.98	<0.0001	
Material de electrodo	5802.38	1	5802.38	2304.48	<0.0001	
Distancia entre placas	559.80	1	559.80	222.33	<0.0001	
Tiempo de retención	1255.01	2	627.51	249.22	<0.0001	
Material de electrodo*Dist..	492.10	1	492.10	195.44	<0.0001	
Material de electrodo*Tiem..	112.00	2	56.00	22.24	<0.0001	
Distancia entre placas*Tie..	128.78	2	64.39	25.57	<0.0001	
Material de electrodo*Dist..	124.55	2	62.28	24.73	<0.0001	
Error	60.43	24	2.52			
Total	8535.04	35				

Figura 23: Resultado ANOVA - Cromo

- Hi: El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que inciden en la remoción de cromo.

- Ho: El material de placas, la distancia entre placas y el tiempo de retención son factores que no inciden en la remoción de cromo.

El p-valor resulta para todas las interacciones <0.0001 por este motivo se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que las tres variables independientes inciden en conjunto a la remoción de cromo.

4.3.3.2 Prueba de Fisher

Como se encontró una triple interacción se realiza la prueba de Fisher para determinar cuáles fueron las mejores condiciones, en la Figura 24 se puede observar que las mejores condiciones para remover cromo fue utilizando electrodos de aluminio, con una distancia de 1cm entre electrodos y un tiempo de retención de 60 min.

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.67399				
Error: 2.5179 gl: 24				
Material de electrodo	Distancia entre placas	Tiempo de retención	Medias n	E.E.
Aluminio	1cm	60 min	49.46	3 0.92 A
Aluminio	1.5 cm	60 min	46.74	3 0.92 B
Aluminio	1.5 cm	40 min	43.41	3 0.92 C
Aluminio	1cm	40 min	40.54	3 0.92 D
Aluminio	1.5 cm	20 min	38.58	3 0.92 D E
Aluminio	1cm	20 min	37.26	3 0.92 E F
Hierro	1.5 cm	60 min	35.48	3 0.92 F
Hierro	1.5 cm	40 min	28.58	3 0.92 G
Hierro	1cm	60 min	17.76	3 0.92 H
Hierro	1.5 cm	20 min	10.69	3 0.92 I
Hierro	1cm	40 min	6.05	3 0.92 J
Hierro	1cm	20 min	5.09	3 0.92 J

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Figura 24: Resultados Fisher - Cromo

Al presentar una triple interacción se elaboró una gráfica con las tres variables respecto al porcentaje de remoción de cromo, como se observa en la Figura 25 el electrodo de aluminio presenta un mayor porcentaje de remoción en todos ensayos respecto al hierro. Para la variable distancia entre placas se puede observar que en casi todos los ensayos trabajar a 1 cm generó los mayores porcentajes de remoción.

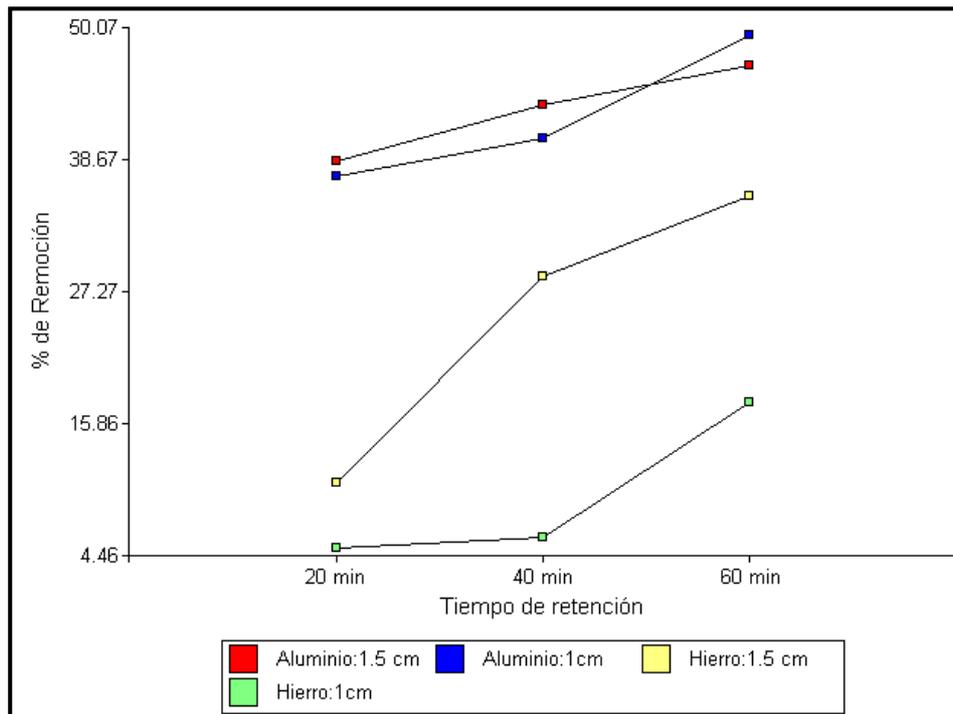


Figura 25: Variables Independientes vs % Remoción Cr

4.3.4 Generación de Sulfuro de Hidrógeno

Se debe tener en cuenta que las dos primeras repeticiones se realizaron en el Laboratorio de Circuitos, debido a que durante el tratamiento de electrocoagulación el sistema desprendía un olor a huevo podrido, el cual es muy conocido ya que pertenece al sulfuro de hidrógeno en bajas concentraciones, por este motivo la tercera repetición se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental utilizando una extractora de aire, para evitar posibles daños en la salud.

4.4 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Se realizó la comparación de las concentraciones finales en contraste con los Valores Máximos Admisibles (VMA) como indica el D.S. 001-2015-VIVIENDA para verificar si con las condiciones propuestas en los diferentes tratamientos por medio de la electrocoagulación se logró cumplir con los VMA.

En comparación con cadmio y cromo, el plomo fue el metal más removido dentro del sistema de electrocoagulación, logrando un porcentaje de remoción de 94.76 por ciento, sin embargo esto no fue suficiente para cumplir con los Valores Máximos Admisibles (Ver Figura 26), esta

remoción puede ser optimizada utilizando una densidad de corriente mayor y/o tomando tiempos de retención mayores bajo las mismas condiciones, esto debido a que en las gráficas no se observa una saturación del sistema, lo cual indica que a mayor tiempo se puede lograr una mayor remoción.

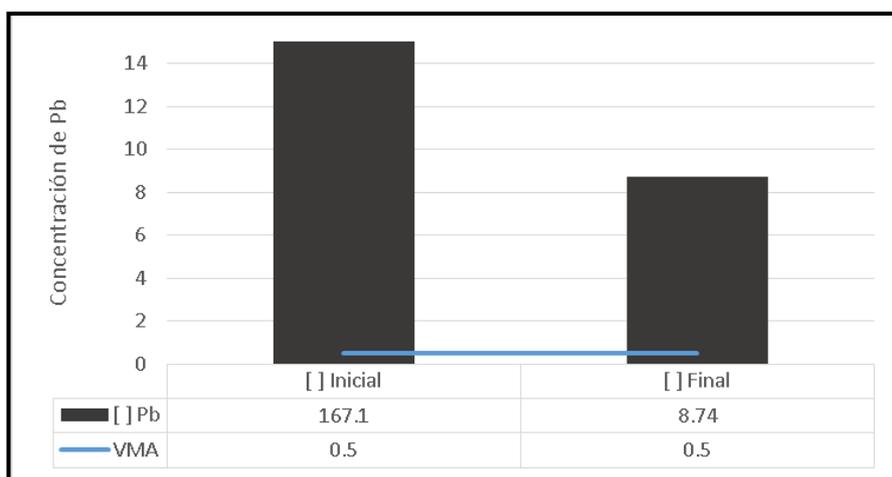


Figura 26: Concentraciones de Pb - Valores Máximos Admisibles

El cadmio a diferencia del plomo no se redujo en un gran porcentaje logrando un máximo de 49.54 por ciento y a pesar de tener una concentración inicial baja no se logró cumplir con lo establecido en la normativa vigente (Ver Figura 27), el pH ácido de la solución tuvo un efecto negativo para la remoción de cadmio, sin embargo se puede considerar trabajar con mayores tiempos de retención para poder alcanzar lo permitido.

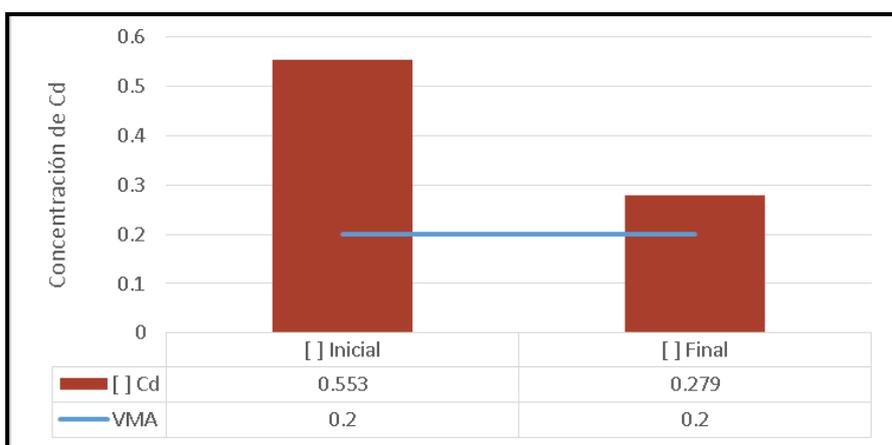


Figura 27: Concentraciones de Cd - Valores Máximos Admisibles

En la Figura 28 se puede observar que la concentración inicial de cromo era menor que el Valor Máximo Admisible, al igual que el cadmio no se obtuvo un porcentaje de remoción alto, alcanzando un máximo de 49.46 por ciento, se puede mejorar la remoción de cromo trabajando con una mayor densidad de corriente, de acuerdo a lo revisado en la bibliografía.

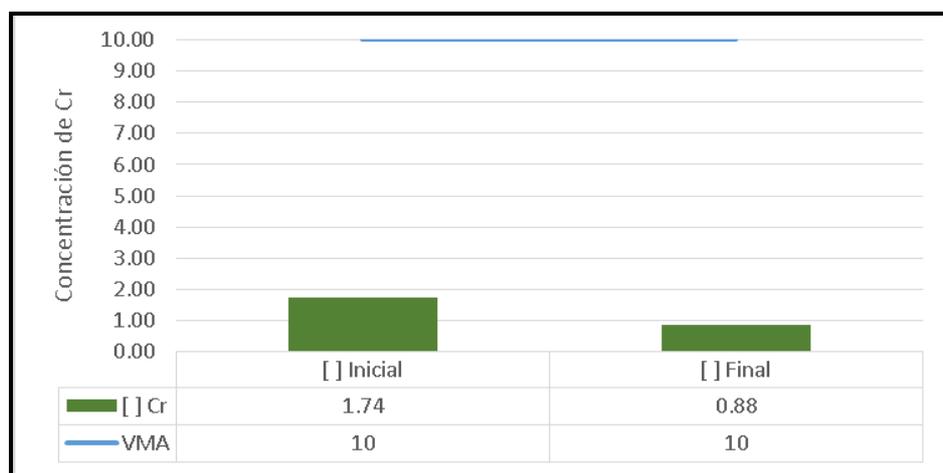


Figura 28: Concentraciones de Cr - Valores Máximos Admisibles

Como no se pudo cumplir con los Valores Máximos Admisibles para Pb, Cd y Cr, se tomó nuevamente una muestra del Efluente para realizar pruebas adicionales, tomando ahora las mejores condiciones para Pb, pero variando únicamente el tiempo de retención a 120 minutos. Se tomó esta decisión debido a que el Pb presentó un alto porcentaje de remoción y observando la Figura 18 cuando se utilizó las placas de hierro y una distancia entre placas de 1 cm, se puede observar en la pendiente que el tiempo no estaba ni cerca de formar una asíntota, lo cual indica que este parámetro afectó directamente a la remoción de Pb en el efluente metalúrgico.

El día 10 de mayo del 2018 se realizó la toma de muestra de 1 L para analizar el contenido de Pb inicial y se tomaron 30 L de efluente para realizar las pruebas de electrocoagulación, considerando placas de hierro, 1 cm de distancia entre placas, tiempo de retención de 120 minutos, se realizó 3 repeticiones para obtener un resultado promedio.

En la Figura 29 se puede observar que la concentración inicial de Pb es de 141.58 mg/L y luego del tratamiento con 3 repeticiones se obtiene en promedio una concentración final de 0.33 mg/L logrando una remoción del 99.76 por ciento, esta vez cumpliendo con los VMA de acuerdo a ley, se debe en cuenta que se trabajó con un pH de 3.1.

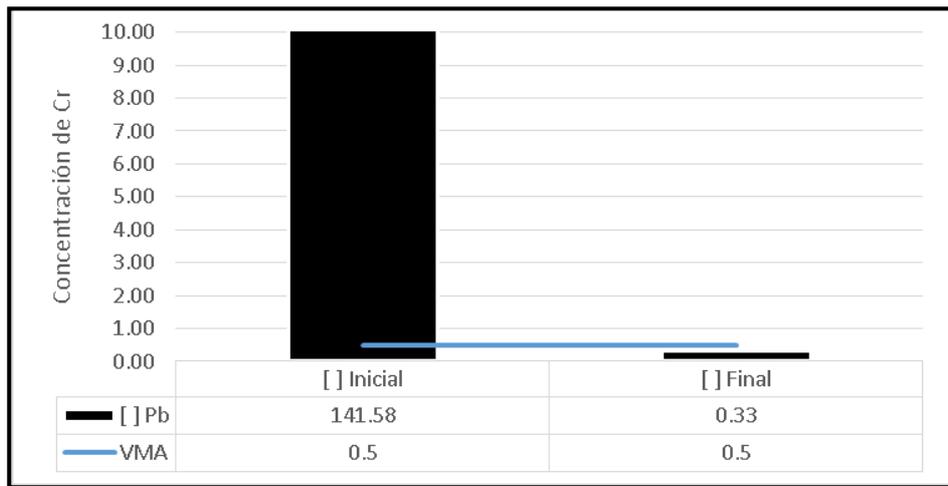


Figura 29: Concentraciones de Pb - Valores Máximos Admisibles / 120 minutos

V. CONCLUSIONES

1. Se realizó la caracterización del efluente del laboratorio metalúrgico Alfred H. Knight, donde se obtuvo parámetros que sobrepasan los VMA estipulados en el D.S. 001-2015-VIVIENDA, entre estos se encuentra el plomo y el cadmio, a diferencia del cromo que se encontró en valores menores a los VMA, también se obtuvo un pH de 3.2.
2. Las variables óptimas para la remoción de plomo fueron: electrodos de hierro a una distancia de 1 cm y un tiempo de retención de 60 minutos, obteniendo una remoción del 94.67 por ciento, se debe tener en cuenta que este valor no tiene una diferencia significativa con el ensayo realizado en las mismas condiciones pero con electrodo de aluminio donde se logró una remoción de 94.2 por ciento. El cadmio presentó una mayor remoción utilizando electrodos de aluminio a una distancia de 1.5 cm y un tiempo de remoción de 60 minutos, alcanzando un porcentaje de remoción de 49.54 por ciento. El cromo tuvo una mayor remoción con electrodos de aluminio a una distancia de 1 cm y tiempo de retención de 60 minutos, logrando una remoción del 49.46 por ciento. A diferencia del plomo la remoción de cadmio y cromo fue mucho menor y esto puede ser por el pH del efluente a tratar, ya que se trabajó con aguas de pH 3.2 ácido.
3. Comparando las concentraciones finales de metales con los VMA se tuvo los siguientes resultados: El plomo a pesar de lograr una remoción del 94.67 por ciento, la concentración final no se encuentra dentro de los VMA. El cadmio no logró una remoción alta y se encontraba con una concentración inicial menor a la del plomo, sin embargo la concentración final no logró cumplir con los VMA. La concentración de cromo inicial cumplía con los VMA.
4. Luego de aumentar el tiempo de retención para el Pb se obtuvo una concentración final promedio de 0.33 mg/L, lo cual equivale a una remoción del 99.76 por ciento, este resultado podría indicar que el parámetro más influyente para la remoción de Pb fue el tiempo de retención.

VI. RECOMENDACIONES

1. En muchas investigaciones se trabajaron con densidades de corrientes altas, en este trabajo fue complicado conseguir una fuente de electricidad que generará una intensidad de 14 A, por este motivo se recomienda para investigaciones a pequeña escala disminuir el área de contacto de las placas, debido a que a mayor área de contacto se tendrá que trabajar con una mayor intensidad de corriente (A).
2. Se debe tener en cuenta que los lodos generados en la electrocoagulación deben disponerse por medio de una EO-RS autorizada por el MINAM, debido a que contiene metales pesados, los compuestos que se encuentran en el lodo son Pb(OH)_2 , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , FeO_2Pb y FeO_2Cd (Ver Anexo 7)
3. Realizar estudios con variaciones del pH, para esta investigación no fue tomado en cuenta, debido a que se tenía conocimiento que AHK trabaja con ácidos fuertes (ácido sulfhídrico, ácido fluorhídrico y ácido clorhídrico), sin embargo se pudo observar que para el cadmio y cromo el pH fue un factor importante en su bajo porcentaje de remoción. Se calculó que la cantidad de NaOH necesaria para neutralizar 5 litros de efluente es 366.9 gramos de NaOH (Ver Anexo 8).
4. Debido a que el plomo y cadmio no cumplieron con los VMA va a ser necesario el uso de otros tratamientos posteriores, otra opción es tomar otros valores de las variables, debido a que como se observa en los gráficos el tiempo de retención no llegó a su valor óptimo, se entiende que a un mayor tiempo se pudo haber obtenido una mayor remoción de los metales.
5. Siempre que se trabaje con efluentes que contengan ácido sulfhídrico se debe utilizar una campana de extracción, debido al sulfuro de hidrógeno que es liberado en la reacción y este es perjudicial para la salud.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, G., Coy, C., Bourdón, A. y Cuervo, E. 2013. La Electrocoagulación como un tratamiento para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. Facultad de Ciencias Básica. 9 (2): 306-317.
2. Arango R. A. y Garcés G. L. 2007. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Revista Universidad EAFIT, 43(147): 56-67.
3. Arévalo, C. 2016. Influencia de la densidad de corriente y el tiempo de residencia en la reducción de arsénico de efluentes artificiales mediante el proceso de electrocoagulación. Tesis Mag. Sc. Trujillo – Perú, Universidad Nacional de Trujillo. 14 p.
4. Aristizabal, A. y Bermúdez, M. 2007. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reúso. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Medellín - Colombia. Universidad Pontificia Bolivariana. 63 p.
5. Bensadok, K., Benammar, S., Lapicque, F. y Nezzal, G. 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. Elsevier, Journal of Hazardous Materials, 152(5): 423.
6. Burbano Santiago, Muñoz Gracia Carlos y Burbano García E. 2003. Física general. Edición, Editorial Tébar s.I.
7. Burriel, F., Lucena, F., Arribas, S. y Hernández, J. 2008. Química Analítica Cualitativa. Editorial Paraninfo, 293.
8. Caetano J., Novile D., Teixeira C., Dos Santos V., Andrade A. y Cardoso D. 2012. Highly improved chromium (iii) uptake capacity in modified sugarcane bagasse using different chemical treatments. Quim. Nova. 35(8):1606-1611.
9. Cañizares, P., García, J., Lobato, J. y Rodrigo, M. 2004. El tratamiento electroquímico en la depuración de efluentes industriales líquidos. Ingeniería Química, 1(416): 188.

10. Caviedes, D.; Muñoz, R.; Perdomo, A.; Rodríguez, D. y Sandoval, I. 2015. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Revista Ingeniería y Región*. 13 (1): 73-90.
11. Chávez, A., Cristancho, D., Ospina, E. 2009. Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14): 39.
12. Chen, Xueming, Chen, Guohua, and Yue, Po Lock. 2002. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. In: *Chemical Engineering Science*. 57 (13): 2449 – 2455.
13. Decreto Supremo N° 001-2015 “Se modifican diversos artículos del D.S: N° 021-2009 VIVIENDA, que aprobó los VMA de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario – Ministerio de Vivienda, Perú.
14. Giraldo L. y Moreno J.. 2008. Pb Adsorption from aqueous solutions on activated carbons obtained from lignocellulosic residuos. Universidad Nacional de Colombia. *Brazilian journal of Chemical Engineering*. 25(1): 143-151.
15. Hernández R., Fernández C., Baptista P., 2006. *Metodología de la Investigación*, Cuarta Edición, Editorial Mc Graw Hill. Interamericana Editores S.A.
16. Holt, P., Barton, G. y Mitchell, C. 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3): 355- 367.
17. Jiang, J., Graham, N., André, C., Kelsall, G., Brandon, N., Chipps, M. 2002. Comparative performance of an electro coagulation/flotation system with chemical coagulation/dissolved air flotation: A pilot–scale trial. *Electrolytic treatment of turbid water in package plant. Water Science and Technology: Water Supply*, 2(1): 289-297.
18. Kobya, Mehmet, CAN, Orhan Taner and Bayramoglu, Mahmut. 2003. “Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes”. In: *Journal of Hazardous Materials*. 100(3): 163-178.
19. Manzione M.A. y Merrill D.T. (1989). Trace metal removal by iron co–precipitation: Field evaluation. Electric Power Research Institute. Report GS–6438.
20. Maron, S. y Prutton, C. 1996. *Fundamentos de Fisicoquímica*. Editorial Limusa. Edición México DF, México no. 6: 125.
21. Martínez Navarro, Fabiola. 2007. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. Tesis de doctorado. Ciudad Real - España. Universidad de Castilla – La Mancha Facultad de Ciencias Químicas. 279 p.

22. Mollah, M., Gomes, P., Kesmez A., Mehmet, P., Cocke D., L. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of hazardous material*. No. 114.
23. Morales, N. y Acosta, G. 2010 Sistema De Electrocoagulación Como Tratamiento De Aguas Residuales Galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1): 36-37.
24. Morante G. 2002. Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista colombiana de física*. 32 (2): 484 – 487.
25. Ojeda, E. y Hing, R. 2010. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro. *Tecnología Química*, 30(1): 21- 30.
26. Patoczka, J., Johnson R. y Scheri, J. 1998. Trace Heavy Metals Removal With Ferric Chloride, *Water Environment Federation, Waste Technical Conference, Nashville* no. 07041. Consultado 4 nov. 2017. Disponible en <http://www.patoczka.net/Jurek%20Pages/Papers/Trace%20HeMe%20Removal%20with%20Ferric.pdf>
27. Piña, M., Martín, A., González, C., Prieto, F., Guevara, A. y García, J. 2011. Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 10(2): 257-271.
28. Restrepo, A., Arango, A. y Garcés, L. 2006. La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Línea de investigación: Tratamiento de aguas. Corporación Universitaria Lasallista*. 1(2): 58-77.
29. Reyes, D. y Mercado, I. 2003. Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Manizales – Colombia. *Universidad Nacional de Colombia*, p. 12.
30. Rodríguez, F.; Leton, P.; Rosado, R.; Dorado, M.; Villar, S. y Sanz, J. 2006. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. *Informe de Vigilancia Tecnológica. Fundación para el conocimiento madri+d CEIM. Madrid – España*. p. 7-20.
31. S. Abuzaid Nabil, A. Bokhari Alaadin, M. Al-Hamouz Zakarna. 2002. Ground water coagulation using soluble stainless steel electrodes. *Advances in Environmental Research* 6(3): 325-333.
32. J. Arboleda Camacho, P. Herrera López. 2015. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente con

- electrodos de aluminio – aluminio y hierro – aluminio en condiciones de laboratorio. Tesis para optar el título de Ing. Ambiental. Bogotá – Colombia. Universidad Santo Tomás. 107 p.
33. Tchobanoglous, G. & Crites, R., 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill Interamericana S.A. Bogotá – Colombia. Santafé de Bogotá. 776p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Metodología del LASMAF para determinar Metales Pesados

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
Facultad de Agronomía - Departamento Académico de Suelos



LABORATORIO DE ANALISIS DE
SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y
FERTILIZANTES
LASPAF
AREA DE CALIDAD

DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS (Pb, Cd y Cr) EN AGUAS DE RIEGO

Código: ME-LW-015

Revisión nº	Detalle	Detalle	Realizado por	Revisado por	Aprobado por
1		Creación del documento	Llamoja, V.	Guerrero, J.	García, S.



LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES
LASPAF

1. OBJETIVO

Describir el procedimiento analítico a seguir para la determinación de metales pesados (Pb, Cr y Cd) en aguas de riego empleando el método de digestión ácida.

2. PRINCIPIO

El método para la determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica en aguas se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida por estos, la cual es directamente proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra analizada.

3. MATERIALES Y EQUIPOS

- Matraz Erlenmeyer de 125 y 250 mL.
- Fiolas de 25 y 50 mL.
- Embudos
- Dispensador de la solución ácida.
- Papel filtro de tránsito lento (Whatman N° 42).
- Tubos de ensayo de 10 mL.
- Micropipetas de 0.2 mL.
- Balanza de precisión 0.01 g.
- Plancha de digestión.
- Campana extractora.
- Espectrofotómetro de absorción atómica.

4. REACTIVOS

- Ácido nítrico (HNO₃) 65 %.
- Ácido perclórico (HClO₄) 70 %.
- Agua desionizada.

5. SOLUCIONES

- Solución de ácido nítrico:.....
- Solución de ácido perclórico:.....
- Mezcla ácida: Solución de ácido nítrico y ácido perclórico, en proporción de 5:1.

6. PROCEDIMIENTO

Código: ME-LW-015

página 1 de 1



LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES

LASPAF

- a. Transferir una alícuota de 1 mL de la muestra a un tubo de ensayo.
- b. Adicionar 20 mL de la mezcla acida.
- c. Colocar en la plancha de digestión, a una temperatura de 180 - 200 °C por aproximadamente 2 h. Dejar enfriar.
- d. Transferir la muestra a una fiola y enrasar con agua desionizada a 25 mL.
- e. Trasvasar a un tubo de ensayo y agitar.
- a. Tomar una alícuota de 1 mL y adicionar 9 mL de agua desionizada.
- f. Leer la concentración de cada uno de los elementos, por absorción atómica.

7. CALCULOS

8. CONTROL DE CALIDAD

Realizar réplicas de tres muestras elegidas de manera indistinta.

9. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

10. REGISTROS

Cuaderno de registro para metales pesados en aguas.

11. ANEXO

ANEXO 2: Metodología del Laboratorio AHK para determinar Metales Pesados



Alfred H Knight del Perú

Instructivo
ICP-I-03
PROCESO DE LECTURA POR ICP-OES

Área:	ICP
Versión:	01
Fecha de publicación:	15/3/2016
Elaborado por:	Cynthia Meza Solis
Revisado por:	Luz Garcia
Aprobado por:	William Soto

Fecha de Última revisión del documento: **15/3/2016**





1. OBJETIVO:

Definir las actividades a realizar durante el proceso de lectura por ICP-OES

2. ALCANCE:

Este instructivo aplica al proceso de lectura de muestras por ICP-OES en la Sección de ICP.

3. REFERENCIAS:

No Aplica

4. DEFINICIONES:

No Aplica

5. RESPONSABILIDAD:

- El jefe de Sección es responsable de difundir y supervisar la correcta aplicación del presente instructivo.
- Los analistas son responsables de cumplir lo descrito en el presente instructivo, tomando las debidas medidas de seguridad en el manejo de los reactivos y uso adecuado de sus EPPs.

6. DESARROLLO DEL INSTRUCTIVO:

6.1. Recepción de la muestra:

El analista recibe y verifica la gradilla de tubos o folios de las muestras con respecto a:

- La identificación y numeración de las muestras según hoja LIMS.
- La Homogeneidad de la muestra y enrasado.
- Si las soluciones están libres de sólidos en suspensión.
- El medio debe estar de acuerdo al método (caso concentrado de Pb 50%HCl)

De no cumplir con estas especificaciones, el analista debe informar inmediatamente al jefe de sección o encargado de turno de la sección ICP.

6.2. Proceso de Lectura:

- Se selecciona el método correspondiente a los elementos solicitados y a la matriz a leer en el software Smart Analyzer Vission.
- Se configura la hoja de lectura con los estándares de calibración, los controles y la orden de trabajo con sus respectivos blancos y materiales de referencia.



PROCESO DE LECTURA POR ICP-OES

Código: ICP-I-03

Versión: 01

Página: 4 de 5

- Se procede a calibrar la curva del método seleccionado (la información de los puntos de calibración de los estándares respectivos se encuentra en el software del equipo, es específico para cada método).
- Verificar la alineación de los espectros de los elementos a analizar, cada vez que se lave el sistema (antorcha, cámara, nebulizador). También verificar la linealidad y regresión de las curvas de todos los elementos del método (Tomar como referencia el Instructivo ICP-I-04). El coeficiente de correlación debe ser mayor o igual a 0.999, de no cumplir con este parámetro, volver a calibrar vaciando nuevamente los estándares de calibración en los tubos correspondientes (de ser necesario cambiar por tubos nuevos). De no solucionarse el problema comunicar al jefe de sección o al encargado de turno.
- Antes de iniciar con la lectura de muestras, primero verificar la curva de calibración con los Spikes de 200,100 ó 50 ppm (de 4, 2 y 1 ppm respectivamente) correspondientes al método y matriz a calibrar. También se puede verificar con materiales certificados como CCU-1d, CPB-2 o CZn-4 o el estándar sintético QC de 1 ppm en caso de leer efluentes internos.
- Si se contara con soluciones de verificación (compósitos) de distintos niveles (alto, medio y bajo) de un determinado cliente, éstos serán usados como control de las lecturas para verificar la estabilidad del equipo en función al tiempo.
- Cada orden de trabajo viene con cierta cantidad de materiales de referencia internos (MRIs) (5% del total de muestras) y 2 blancos. Para realizar las lecturas, iniciar con los blancos de proceso, seguido de un MRI, luego se lectura las muestras con su respectivo duplicado (colocar un MRI o una solución de verificación cada 9 muestras).
- Durante el proceso de lectura, verificar que los valores de los MRIs y/o soluciones de verificación estén dentro del rango de aceptación (ver las cartillas de control correspondiente), del mismo modo verificar que los resultados de las muestras (lotes) cumplan con el criterio de duplicados establecidos (copiar los resultados en las plantillas de Excel correspondientes a los elementos solicitados, para la verificación de duplicados). De no cumplirse, se re-lectura la muestra (puede ser que se produzca una interrupción de flujo o burbujeo en el capilar de ingreso durante la lectura).
- Si luego de la relectura aun no cumple con el criterio de duplicados, comunicar al jefe de sección o encargado de turno para enviar a reensayar.



PROCESO DE LECTURA POR ICP-OES

Código: ICP-I-03

Versión: 01

Página: 5 de 5

- Si se detecta algún resultado del elemento solicitado cercano al límite superior de la curva, entonces es necesario hacer una dilución. Las diluciones se hacen de acuerdo a la siguiente tabla:

Tipo	Alícuota	Volumen final (completar con agua ultra pura)	Material
Dilución 5X	5 ml	25 ml	Fiola
Dilución 10X	5 ml	50 ml	Fiola
Dilución 20X	5 ml	100 ml	Fiola

Para las diluciones, agregar el medio respectivo de acuerdo al método (25% HCl por ejemplo).

7. CONTROLES DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

Cumplir con los controles descritos en la Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos (IPER-ICP / SIG-F-17) y con lo descrito en el Procedimiento de Buenas Prácticas de Seguridad y Salud en el Trabajo (SIG-P-09).

8. CONTROLES AMBIENTALES

Cumplir con los controles ambientales descritos en la Identificación de Aspectos Ambientales Significativos (IAAS-ICP/SIG-F-19) y con lo descrito en el procedimiento de Buenas Prácticas Medioambientales en el Trabajo (SIG-P-13).

9. REGISTROS:

- ICP-F-06 Registro de Control de limpieza y verificación de calibración del Equipo ICP.

ANEXO 3: Informes de Ensayos Laboratorios

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE AGRONOMIA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES			
INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN AGUA				
SOLICITANTE	: ANTONIO MIGUEL CONDORI PANTOJA			
PROCEDENCIA	: LIMA/ LIMA			
REFERENCIA	: H.R. 61702			
BOLETA	: 1103			
FECHA	: 06/12/17			
Nº LAB	CLAVES	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm
11188	Efluente AHK	167.10	0.553	1.74
11189	Al/ 1.0/ 20	16.82	0.336	1.062
11190	Al/ 1.5/ 20	114.1	0.308	1.076
11191	Al/ 1.0/ 40	16.42	0.327	1.056
11192	Al/ 1.5/ 40	13.93	0.296	0.98
11193	Al/ 1.0/ 60	10.9	0.308	0.919
11194	Al/ 1.5/ 60	10.65	0.286	0.943
11195	Fe/ 1.0/ 20	88.9	0.401	1.653
11196	Fe/ 1.5/ 20	142.8	0.377	1.565
11197	Fe/ 1.0/ 40	39.8	0.379	1.647
11198	Fe/ 1.5/ 40	102.2	0.354	1.25
11199	Fe/ 1.0/ 60	9.32	0.353	1.453
11200	Fe/ 1.5/ 60	27.00	0.307	1.129


García Banderu
Jefe de Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM
Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622
e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Figura 30: Resultados Laboratorio – Repetición 1

INFORME DE ENSAYO

REFERENCIA	FECHA	PAGINA																																																				
144139/A	08 dec 17	1 of 1																																																				
CLIENTE	DESCRIPCION																																																					
CONTROL INTERNO PERU																																																						
	PROCESAMIENTO																																																					
	PREPARACION																																																					
	Frascos de Plástico																																																					
REFERENCIA DEL CLIENTE	NOMBRE DEL ANALISIS																																																					
Efluentes AHK Diciembre 2017	EFLUENTES																																																					
MUESTRA																																																						
CONDICIONES DE MUESTREO	MUESTRA																																																					
Como Recibida	Lote																																																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NUMERO DE LOTE</th> <th>Cd (ppm)</th> <th>Cromo (ppm)</th> <th>Pbomo (ppm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Aluminio/1.0/20</td><td>0.354</td><td>1.131</td><td>23.541</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.0/40</td><td>0.322</td><td>1.016</td><td>18.432</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.0/60</td><td>0.301</td><td>0.820</td><td>9.101</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.5/20</td><td>0.315</td><td>1.024</td><td>109.870</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.5/40</td><td>0.292</td><td>1.000</td><td>16.320</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.5/60</td><td>0.288</td><td>0.921</td><td>9.301</td></tr> <tr><td>Hierro/1.0/20</td><td>0.418</td><td>1.670</td><td>90.544</td></tr> <tr><td>Hierro/1.0/40</td><td>0.392</td><td>1.629</td><td>33.212</td></tr> <tr><td>Hierro/1.0/60</td><td>0.372</td><td>1.428</td><td>8.642</td></tr> <tr><td>Hierro/1.5/20</td><td>0.373</td><td>1.581</td><td>139.381</td></tr> <tr><td>Hierro/1.5/40</td><td>0.369</td><td>1.247</td><td>95.263</td></tr> <tr><td>Hierro/1.5/60</td><td>0.286</td><td>1.099</td><td>14.392</td></tr> </tbody> </table>			NUMERO DE LOTE	Cd (ppm)	Cromo (ppm)	Pbomo (ppm)	Aluminio/1.0/20	0.354	1.131	23.541	Aluminio/1.0/40	0.322	1.016	18.432	Aluminio/1.0/60	0.301	0.820	9.101	Aluminio/1.5/20	0.315	1.024	109.870	Aluminio/1.5/40	0.292	1.000	16.320	Aluminio/1.5/60	0.288	0.921	9.301	Hierro/1.0/20	0.418	1.670	90.544	Hierro/1.0/40	0.392	1.629	33.212	Hierro/1.0/60	0.372	1.428	8.642	Hierro/1.5/20	0.373	1.581	139.381	Hierro/1.5/40	0.369	1.247	95.263	Hierro/1.5/60	0.286	1.099	14.392
NUMERO DE LOTE	Cd (ppm)	Cromo (ppm)	Pbomo (ppm)																																																			
Aluminio/1.0/20	0.354	1.131	23.541																																																			
Aluminio/1.0/40	0.322	1.016	18.432																																																			
Aluminio/1.0/60	0.301	0.820	9.101																																																			
Aluminio/1.5/20	0.315	1.024	109.870																																																			
Aluminio/1.5/40	0.292	1.000	16.320																																																			
Aluminio/1.5/60	0.288	0.921	9.301																																																			
Hierro/1.0/20	0.418	1.670	90.544																																																			
Hierro/1.0/40	0.392	1.629	33.212																																																			
Hierro/1.0/60	0.372	1.428	8.642																																																			
Hierro/1.5/20	0.373	1.581	139.381																																																			
Hierro/1.5/40	0.369	1.247	95.263																																																			
Hierro/1.5/60	0.286	1.099	14.392																																																			

Factor de Conversión unidades SI:


Carlos Cepeda
 Chief Chemist
 For ALFREDO RODRIGUEZ DEL PUEBLO S.A.C.

Los resultados en este informe y los comentarios adjuntos, solo reflejan la información proporcionada por el cliente. No se debe reproducir el informe ni sus datos ni conclusiones sin la aprobación escrita de ALFREDO RODRIGUEZ DEL PUEBLO S.A.C. La responsabilidad de los errores en estos resultados es responsabilidad del cliente. ALFREDO RODRIGUEZ DEL PUEBLO S.A.C. (Guatemala Ciudad) 1981 TEL: 20100047700

1000 TRABAJO ALFREDO RODRIGUEZ DEL PUEBLO S.A.C. SERVICIOS TÉCNICOS Y CONDICIONES GENERALES DE SERVICIO. C/AV. COPÓN 1000, ZONA INDUSTRIAL DE LA ZONA FRANCESA, GUATEMALA. <http://www.alfredorodriguezdelapueblo.com.gt>

Figura 31: Resultados Laboratorio – Repetición 2

INFORME DE ENSAYO

REFERENCIA 143472/A	FECHA 27 dec 17	PÁGINA 1 of 1																																																				
CLIENTE CONTROL INTERNO PERU	MUESTRA																																																					
	DESCRIPCION																																																					
	PRECAUCIONES Frascos de Plástico																																																					
REFERENCIA DEL CLIENTE Efluentes AHK Diciembre 2017	MATERIAL RECORRIDO COMO EFLUENTES																																																					
MATERIAL DE ENVASE																																																						
Como Recibida	Como Recibida	Como Recibida																																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE DE LOTE</th> <th>Cd (ppm)</th> <th>Cromo (ppm)</th> <th>Plomo (ppm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Aluminio/1.0/20</td><td>37.623</td><td>37.816</td><td>89.408</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.0/40</td><td>40.687</td><td>40.690</td><td>91.484</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.0/60</td><td>48.463</td><td>48.333</td><td>95.691</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.5/20</td><td>45.389</td><td>36.437</td><td>30.820</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.5/40</td><td>45.570</td><td>44.023</td><td>92.938</td></tr> <tr><td>Aluminio/1.5/60</td><td>52.441</td><td>47.356</td><td>93.914</td></tr> <tr><td>Hierro/1.0/20</td><td>28.752</td><td>6.264</td><td>51.083</td></tr> <tr><td>Hierro/1.0/40</td><td>32.550</td><td>6.437</td><td>80.293</td></tr> <tr><td>Hierro/1.0/60</td><td>40.145</td><td>18.051</td><td>95.057</td></tr> <tr><td>Hierro/1.5/20</td><td>28.391</td><td>12.874</td><td>15.883</td></tr> <tr><td>Hierro/1.5/40</td><td>41.953</td><td>29.253</td><td>34.650</td></tr> <tr><td>Hierro/1.5/60</td><td>43.942</td><td>34.483</td><td>90.844</td></tr> </tbody> </table>			NOMBRE DE LOTE	Cd (ppm)	Cromo (ppm)	Plomo (ppm)	Aluminio/1.0/20	37.623	37.816	89.408	Aluminio/1.0/40	40.687	40.690	91.484	Aluminio/1.0/60	48.463	48.333	95.691	Aluminio/1.5/20	45.389	36.437	30.820	Aluminio/1.5/40	45.570	44.023	92.938	Aluminio/1.5/60	52.441	47.356	93.914	Hierro/1.0/20	28.752	6.264	51.083	Hierro/1.0/40	32.550	6.437	80.293	Hierro/1.0/60	40.145	18.051	95.057	Hierro/1.5/20	28.391	12.874	15.883	Hierro/1.5/40	41.953	29.253	34.650	Hierro/1.5/60	43.942	34.483	90.844
NOMBRE DE LOTE	Cd (ppm)	Cromo (ppm)	Plomo (ppm)																																																			
Aluminio/1.0/20	37.623	37.816	89.408																																																			
Aluminio/1.0/40	40.687	40.690	91.484																																																			
Aluminio/1.0/60	48.463	48.333	95.691																																																			
Aluminio/1.5/20	45.389	36.437	30.820																																																			
Aluminio/1.5/40	45.570	44.023	92.938																																																			
Aluminio/1.5/60	52.441	47.356	93.914																																																			
Hierro/1.0/20	28.752	6.264	51.083																																																			
Hierro/1.0/40	32.550	6.437	80.293																																																			
Hierro/1.0/60	40.145	18.051	95.057																																																			
Hierro/1.5/20	28.391	12.874	15.883																																																			
Hierro/1.5/40	41.953	29.253	34.650																																																			
Hierro/1.5/60	43.942	34.483	90.844																																																			

Factores de Conversión unidades SI:

Carlos Capela
Chief Chemist
ALPESQUIM S.A.S.

Los resultados aquí se refieren a las muestras enviadas, toda información adicional se proporcionará por escrito. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, en la proporción exacta de 1:1 del IT. En el caso de Perú S.A.S. Los resultados de los ensayos se hacen en el laboratorio con una precisión de conformidad con normas de producción y con el uso de métodos de análisis de la entidad que lo produce.
ALPESQUIM S.A.S. - PUNTO S.A.S.
Calle 10 de Agosto 1581
Cercado De Lima
Perú

TODOS LOS DATOS SON CORRECTOS, ESTE REPORTE SE ELABORA DE ACUERDO A LAS CONDICIONES GENERALES DE SERVICIO. CUALQUIERA SEA SU RESPONSABILIDAD EN EL SERVICIO, INDICAR NUESTRO LOGO Y NOMBRE EN LA PARTE SUPERIOR DEL REPORTE. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, en la proporción exacta de 1:1 del IT. En el caso de Perú S.A.S. Los resultados de los ensayos se hacen en el laboratorio con una precisión de conformidad con normas de producción y con el uso de métodos de análisis de la entidad que lo produce.

Figura 32: Resultados Laboratorio – Repetición 3

INFORME DE ENSAYO

REFERENCIA 184121/A		FECHA 14 may 17	PAGINA 1 of 1
CLIENTE CONTROL INTERNO PERU		MARCAS	
		TIPO DE EMBARQUE	
		PRECINTOS/SELLOS Frascos de Plástico	
REFERENCIA DEL CLIENTE Efluentes AHK Mayo 2017		MATERIAL DESCRITO COMO EFLUENTES	
FECHA MUESTREO			
ESTADO DEL ANALISIS Como Recibida	TIPO DE ENSAYE Lote	NOMBRE	
<p>NUMERO DE LOTE</p> <p>Efluente AHK</p> <p>Hierro/1.0/120/R1</p> <p>Hierro/1.0/120/R2</p> <p>Hierro/1.0/120/R3</p>		<p>Plomo (ppm)</p> <p>141.576</p> <p>0.395</p> <p>0.320</p> <p>0.287</p>	

Externo de Comercio a medida del NI



Carlos Chapcha
Chief Chemist
SOLAR INVESTIGACIONES Y SERVICIOS S.A.S.

Los resultados de este informe de ensayo se basan en la información de los datos proporcionados por el cliente. No se debe depender de la información suministrada por el cliente para la realización de este informe de ensayo. El cliente es responsable de la veracidad de la información proporcionada. El laboratorio no se responsabiliza por los resultados de los ensayos realizados en el presente informe de ensayo. El laboratorio no se responsabiliza por los resultados de los ensayos realizados en el presente informe de ensayo. El laboratorio no se responsabiliza por los resultados de los ensayos realizados en el presente informe de ensayo.

A: **CONTROL INTERNO PERU**
Calle Comercio 1000
Calle Comercio 1000

TEL: 01-800-077777

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, AGUAS Y MATERIAS SÓLIDAS Y LÍQUIDAS. CALLE COMERCIO 1000, CANTÓN GUAYAS, GUAYAS, ECUADOR. WWW.LABORATORIOINPERU.COM

Figura 33: Resultados Laboratorio – Repetición Plomo

ANEXO 4: Supuestos ANOVA - Plomo

En la Figura 34 se puede observar que los residuos son normales, ya que al graficar un Q-Q plot normal los puntos se alinean sobre la recta de 45°.

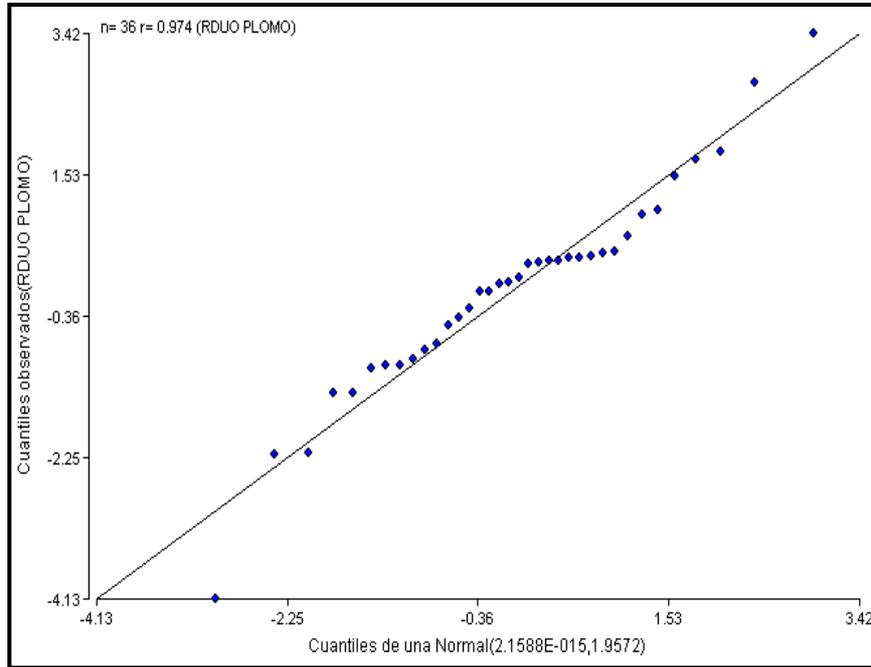


Figura 34: Residuos obtenidos vs. Cuantiles Teóricos - Plomo

En la Figura 35 se observa el gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos, se observa que los puntos forman una estructura, por lo cual se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas.

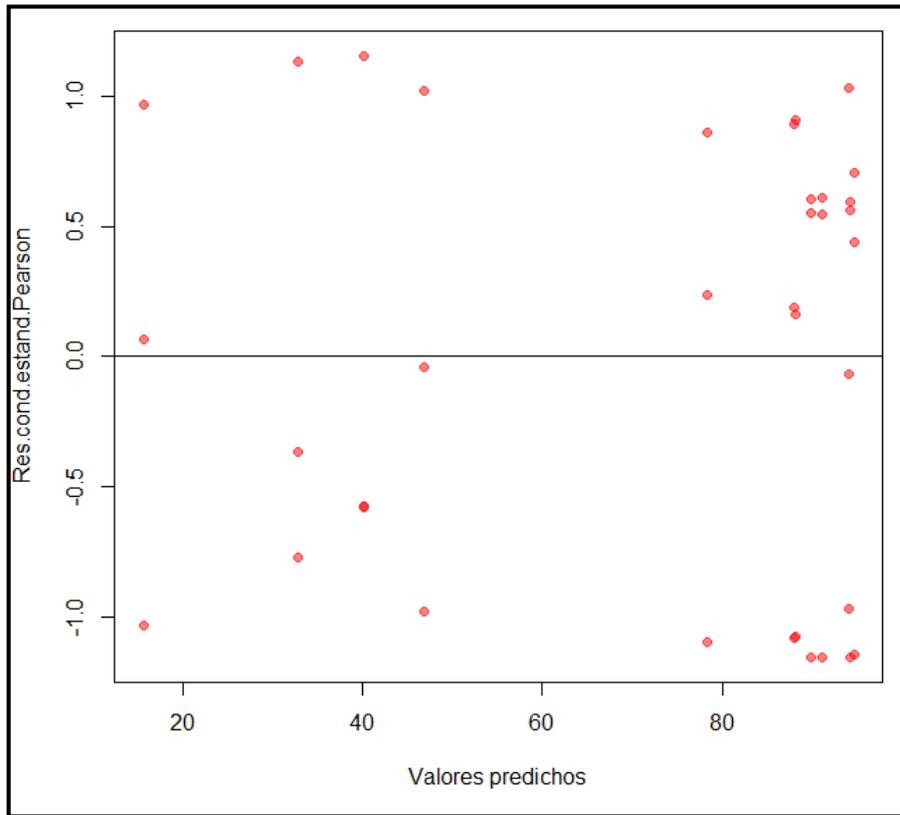


Figura 35: Residuos obtenidos vs. Valores predichos - Plomo

ANEXO 5: Supuestos ANOVA - Cadmio

En la Figura 36 se puede observar que los residuos son normales, ya que al graficar un Q-Q plot normal los puntos se alinean sobre la recta de 45°.

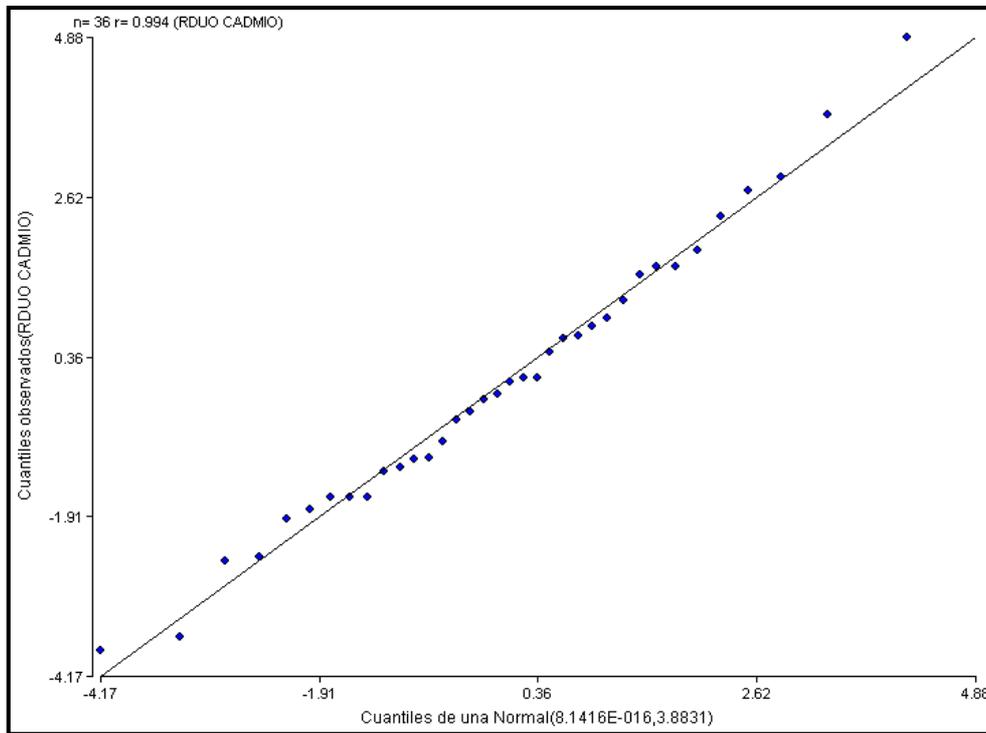


Figura 36: Residuos obtenidos vs. Cuantiles Teóricos - Cadmio

En la Figura 37 se observa el gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos, se observa que los puntos forman una estructura, por lo cual se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas.

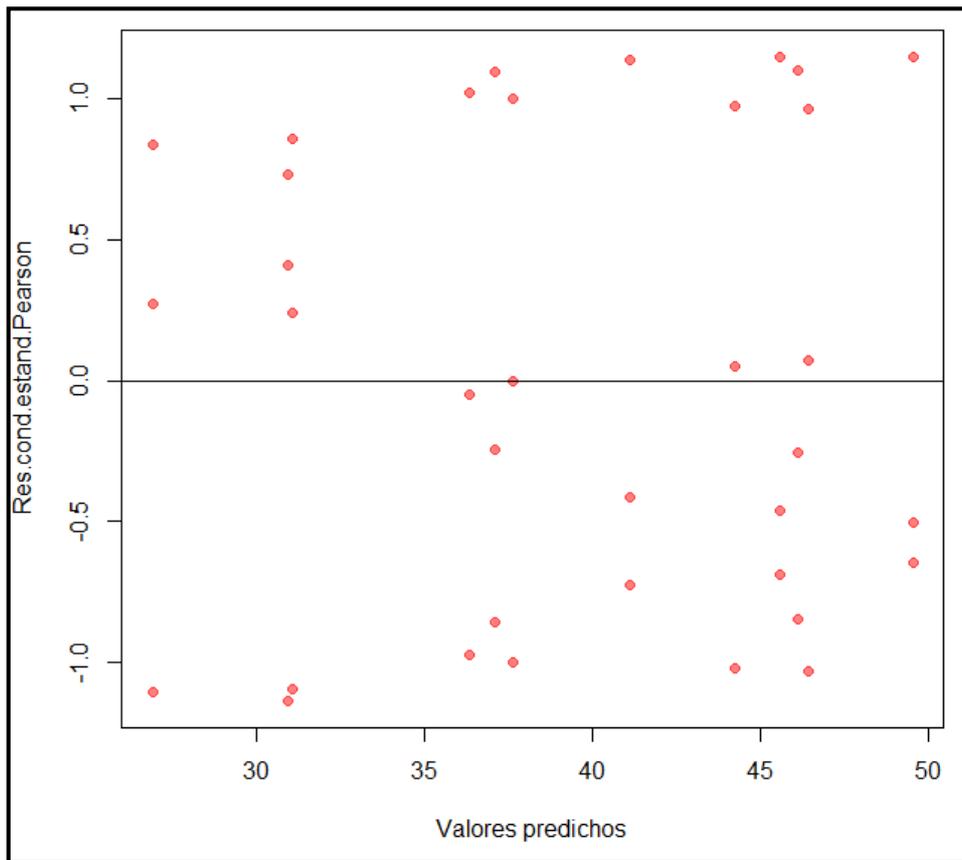


Figura 37: Residuos obtenidos vs. Valores predichos – Cadmio

ANEXO 6: Supuestos ANOVA - Cromo

En la Figura 38 se puede observar que los residuos son normales, ya que al graficar un Q-Q plot normal los puntos se alinean sobre la recta de 45°.

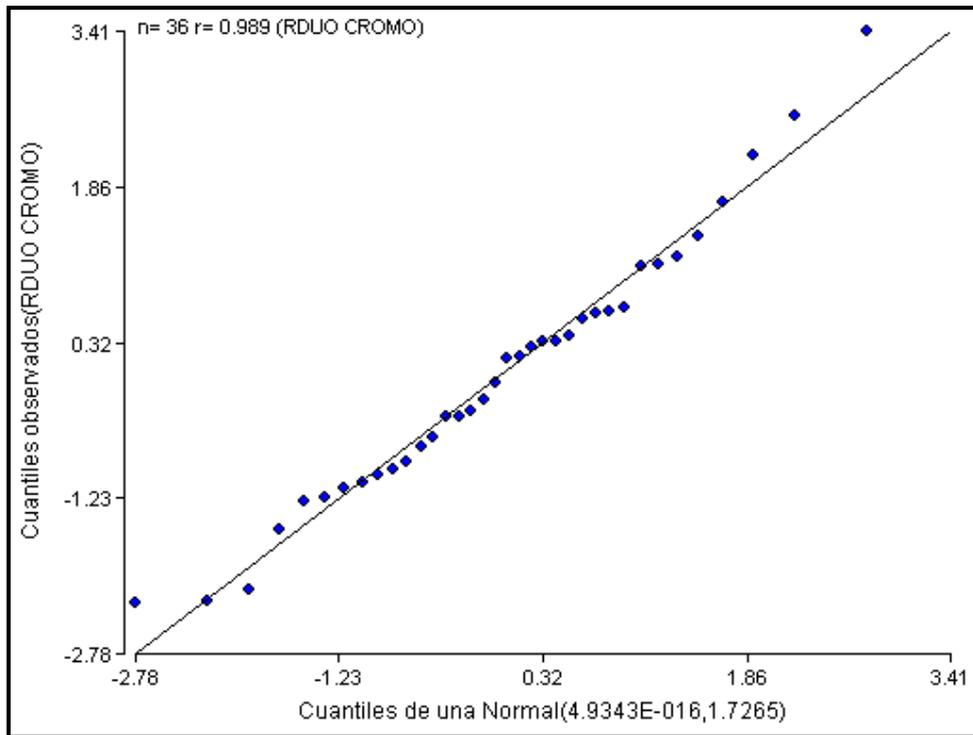


Figura 38: Residuos obtenidos vs. Cuantiles Teóricos - Cromo

En la Figura 39 se observa el gráfico de dispersión de residuos versus valores predichos, se observa que los puntos forman una estructura, por lo cual se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas.

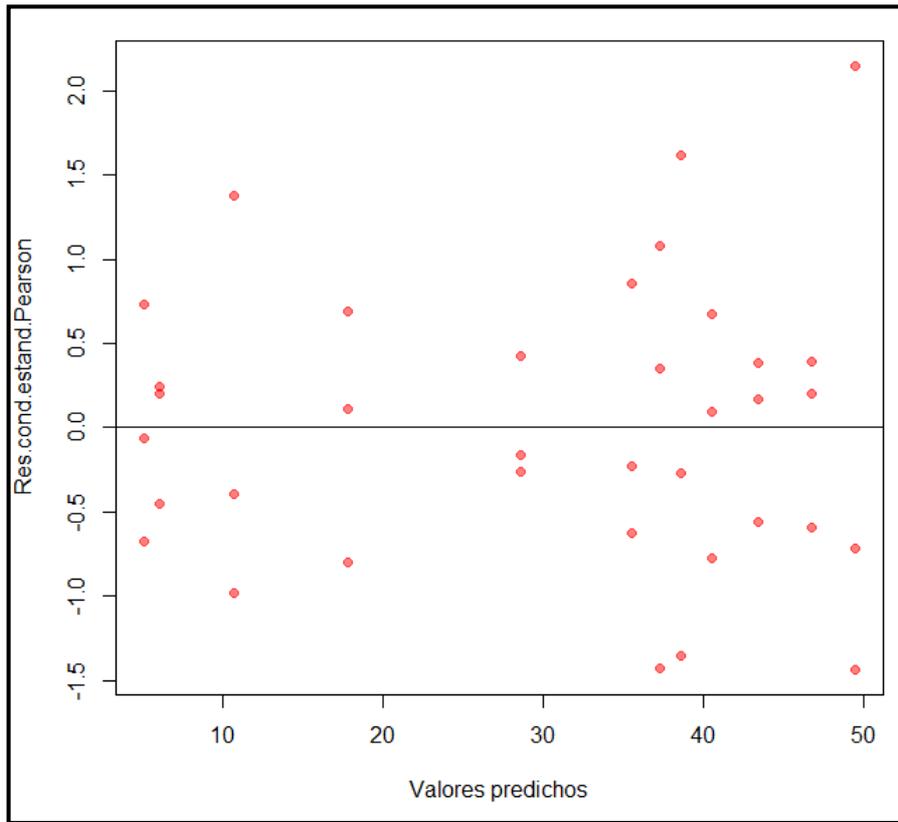


Figura 39: Residuos obtenidos vs. Valores predichos – Cromo

ANEXO 7: Compuestos formados en el lodo

De la Figura 40 se puede decir que la especie insoluble $\text{Pb}(\text{OH})_2$ se forma a valores de pH cercano a 3, sin embargo su presencia en la operación es mínima a diferencia del compuesto Pb^{2+} el cual es abundante.

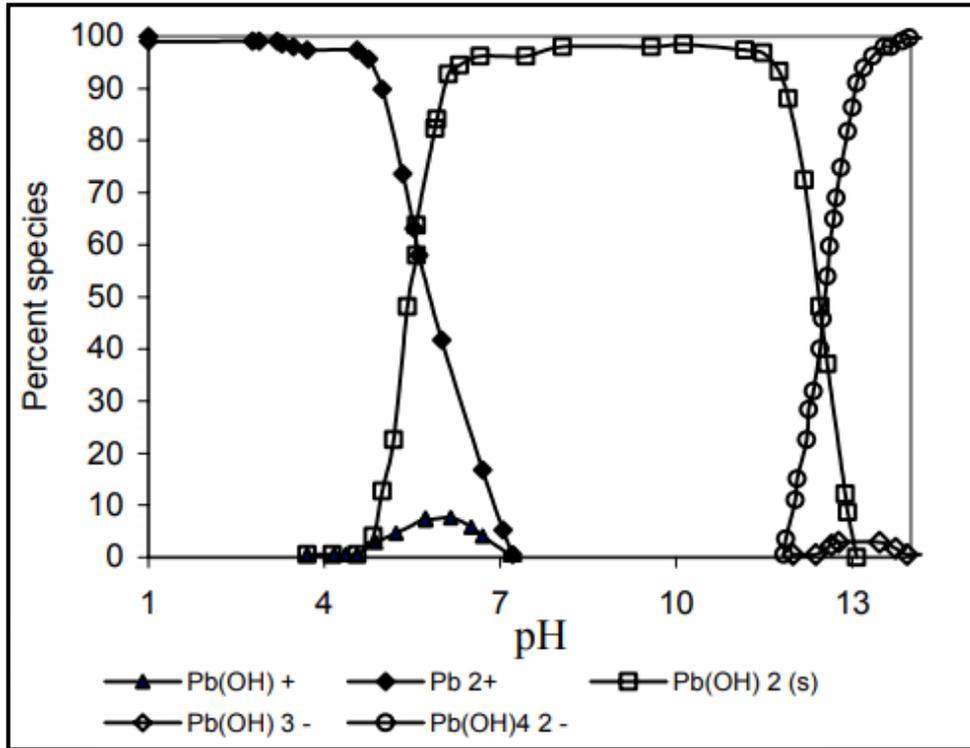


Figura 40: Especies de Plomo en función al pH

FUENTE: Giraldo y Moreno, 2008

Se puede deducir que no se formó hidróxido de Pb como tal, sino que el OH^- actuó como ligando y la remoción de plomo fue debido a la adsorción al hidróxido de hierro formado en la solución durante el proceso de electrocoagulación.

En el caso del Cr (III), estos precipitan como hidróxidos de cromo a pH mayores de 6 (Ver Figura 41). Por este motivo se la generación del hidróxido de cromo no es posible en la solución.

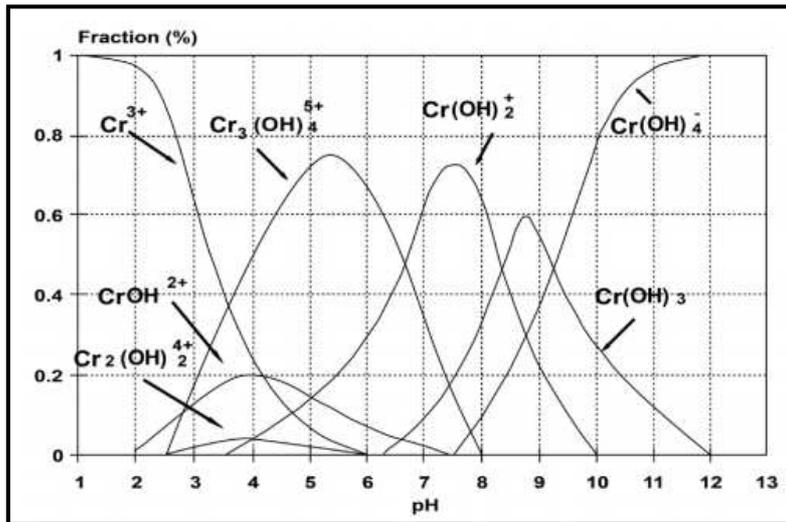


Figura 41: 42Diagrama de especiación del Cromo III

FUENTE: Caetano, *et al.*, 2012

Para el caso del cadmio se observa una condición similar a la del cromo, siendo el más abundante a pH ácido el Cd^{2+} como se observa en la Figura 42.

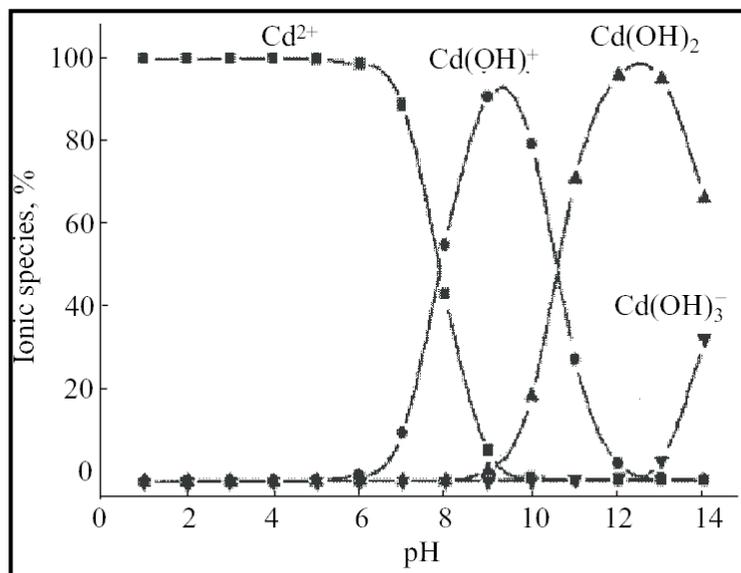
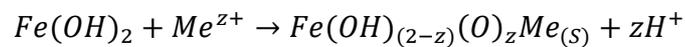


Figura 432: 44Diagrama de especiación del cadmio

FUENTE: Caetano, *et al.*, 2012

Un compuesto que se encuentra presente en la solución es el hidróxido de hierro (III), debido a que este precipita en medios ácidos a diferencia del hierro (II) que precipita en pH mayores a 7, este actúa como coagulante, la alta remoción de Pb se debería a una gran afinidad entre el hidróxido de hierro con el plomo.

Los complejos poliméricos hidróxidos tienen una considerable capacidad de adsorción. Del mismo modo, el monómero $Fe(OH)_2$ puede reaccionar directamente con un contaminante metálico por complejación de superficie o co-precipitación (como se describe en la siguiente reacción):



Como se puede observar en la Figura 43 se puede constatar que el Pb tiene una gran afinidad con el hidróxido de hierro, logando una adsorción mayor de 60% a un pH de 3.4, con esto se sabe el porqué de la alta remoción de Plomo durante el proceso de electrocoagulación a diferencia del Cadmio y Cromo.

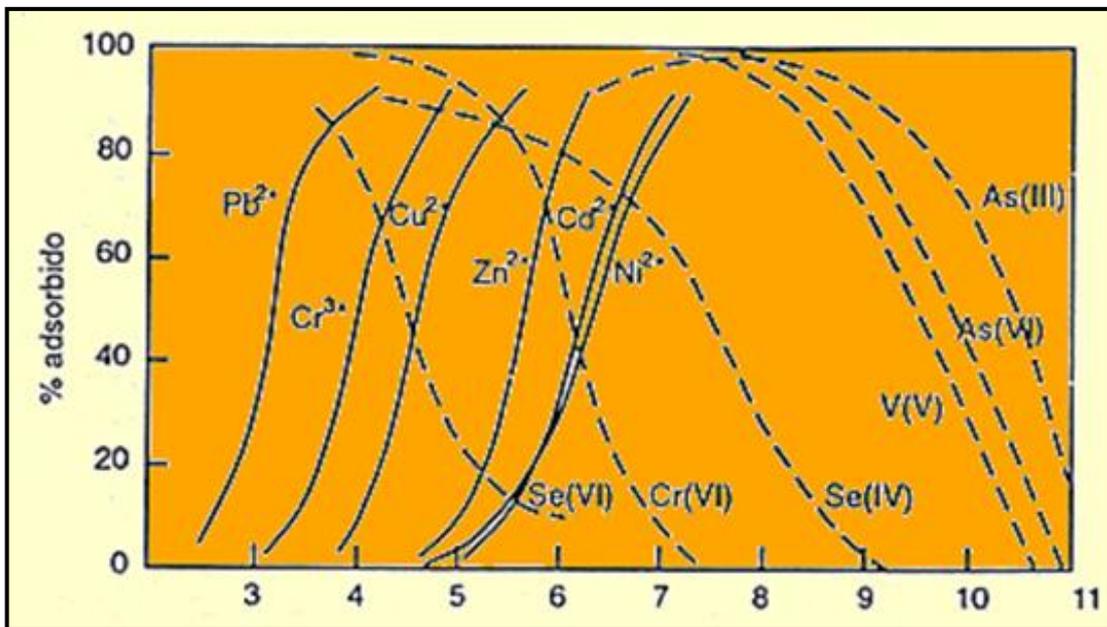


Figura 453: 46 Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales y oxianiones metálicos sobre hidróxidos de Fe amorfo

FUENTE: Manzione y Merrill, 1989

Otro compuesto presente en los lodos fue el sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ producido por la reacción de hidróxido férrico y el ácido sulfhídrico

Por lo antes mencionado en los lodos se pueden encontrar los siguientes compuestos: $\text{Pb}(\text{OH})_2$, $\text{Pb}_{(s)}$, $\text{Cd}_{(s)}$, $\text{Cr}_{(s)}$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, FeO_2Pb , FeO_2Cd , por adsorción los compuestos $\text{Fe}(\text{OH})_3+\text{Pb}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3+\text{Cr}$.

ANEXO 8: Cantidad de NaOH para neutralizar el efluente

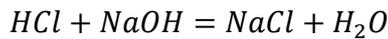
Como no se pudo obtener buenos porcentajes de remoción para el cadmio y cromo, se recomienda neutralizar el efluente a un pH cercano a 7, por este motivo se realizó el cálculo de la cantidad necesaria de NaOH para neutralizar el efluente.

Se conoce que la solución está compuesta por ácido clorhídrico, sulfhídrico y fluorhídrico de acuerdo a su procedimiento en la proporción de 1,3 y 2 respectivamente a una concentración de 1 M.

Se calculó la cantidad en gramos de NaOH para neutralizar 5 litros del efluente, es el volumen que se trató en las pruebas de electrocoagulación.

Para el Ácido Clorhídrico (HCl):

$$\text{Volumen} = \frac{5 \text{ litros}}{6k} \times 1k = 0.83 \text{ litros de HCl } 1 \text{ M}$$

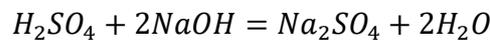


Como se observa en la ecuación se necesita la misma cantidad de moles de NaOH que de HCl, por lo tanto la masa de NaOH en 0.83 litros de solución a 1M es:

$$1 \text{ mol} = \frac{\text{Masa}}{\frac{40 \text{ g/mol}}{0.83 \text{ litros}}} \rightarrow \text{Masa} = 33.3 \text{ gramos de NaOH}$$

Para el Ácido Sulfhídrico (H₂SO₄):

$$\text{Volumen} = \frac{5 \text{ litros}}{6k} \times 3k = 2.5 \text{ litros de H}_2\text{SO}_4 \text{ } 1 \text{ M}$$

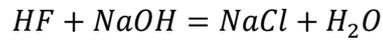


Como se observa en la ecuación se necesita el doble de moles de NaOH que de HCl, por lo tanto la masa de NaOH en 2.5 litros de solución a 1M es:

$$2 \text{ mol} = \frac{\text{Masa}}{\frac{40 \text{ g/mol}}{2.5 \text{ litros}}} \rightarrow \text{Masa} = 200 \text{ gramos de NaOH}$$

Para el Ácido Fluorhídrico (HF):

$$Volumen = \frac{5 \text{ litros}}{6k} \times 2k = 1.67 \text{ litros de HF } 1 \text{ M}$$



Como se observa en la ecuación se necesita la misma cantidad de moles de NaOH que de HF, por lo tanto la masa de NaOH en 1.67 litros de solución a 1M es:

$$1 \text{ mol} = \frac{\text{Masa}}{\frac{40 \text{ g/mol}}{1.67 \text{ litros}}} \rightarrow \text{Masa} = 133.6 \text{ gramos de NaOH}$$

En total para neutralizar 5 litros de efluente se necesita 366.9 gramos de NaOH, se conoce que aproximadamente al mes se generan 2500 litros de efluente, por lo tanto se necesitaría de 183.450 kg de NaOH.