

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE POR PRECIPITACIÓN
QUÍMICA CON $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 EN SOLUCIÓN DE DICROMATO
DE POTASIO A NIVEL DEL LABORATORIO EN LA UNIVERSIDAD
ALAS PERUANAS FILIAL HUANCAYO”**

**PRESENTADO POR LA BACHILLER:
KAREN SUSAN CASALLO IBARRA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

HUANCAYO-PERÚ

2015

**“REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE POR
PRECIPITACION QUÍMICA CON $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 EN
SOLUCIÓN DE DICROMATO DE POTASIO A NIVEL DEL
LABORATORIO EN LA UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FILIAL HUANCAYO”**

DEDICATORIA

Al finalizar mi carrera profesional he logrado uno de mis objetivos en mi vida y quiero darles las gracias de manera especial a las personas que me apoyaron superando todos los obstáculos para lograrlo, con todo respeto y amor dedico este triunfo:

A DIOS.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y ser el manantial de vida, por darme lo necesario para seguir adelante día a día para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A MIS PADRES Y HERMANOS.

Jesús Casallo y Vilma Ibarra, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me han permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y a mis hermanos por brindarme su apoyo incondicional durante el tiempo de estudio.

A MI FAMILIA Y AMIGOS.

Dedico mi triunfo profesional a lo más grande que Dios nos ha dado, que es la familia, en especial a mis abuelas Genoveva Briceño y Francisca Lapa, por su apoyo moral y espiritual, que de una u otra forma estuvieron a mi lado apoyándome y así lograr alcanzar mi meta. A mis amigos, es especial a Pamela Acevedo y Rosario Espinoza, por su comprensión, apoyo y amistad que proporcionaron para obtener mi meta.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a ti Dios por bendecirme porque has estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar.

El presente trabajo de tesis hubiese sido imposible sin la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para ser justo y consecuente con ellas, expresándoles mis agradecimientos.

A la UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera y ser un profesional. A mi Asesor de tesis, Ing. Edgar Quijada Gamarra por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico, así como también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

También me gustaría agradecer a todos y cada uno de los profesores que me dieron clase, por sus enseñanzas, su dedicación y su tiempo, en especial a mis profesores Ing. Carmencita Lavado Meza, Ing. Henry Raúl Ochoa León, Ing. Julio Malca Jáuregui, Ing. Luis Suarez Salas y Blga. Galia Manyari Cervantes, quienes además de enseñarme lo que sé de esta carrera hicieron que mi paso por la universidad fuera agradable. De igual manera agradecer a mi director de escuela profesional Ing. José Manuel Valer Silva por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE DE CONTENIDOS	v
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
CAPÍTULO I.....	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1. Caracterización de la Realidad Problemática	18
1.2. Formulación del Problema	20
1.2.1. Problema General	20
1.2.2. Problemas Específicos	21
1.3. Objetivos	21
1.3.1 Objetivo General.....	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4. Justificación	22
1.5. Importancia	22
1.6. Limitaciones	23
CAPÍTULO II	24
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	24

2.1. Marco Referencial.....	24
2.1.1. Antecedentes de la Investigación.....	24
2.1.2. Referencias Históricas.....	29
2.2. Marco Legal.....	30
2.3. Marco Conceptual.....	31
2.4. Marco Teórico.....	34
2.4.1. El Agua.....	34
2.4.2. Metales Pesados.....	41
2.4.3. El Cromo.....	44
2.4.4. Proceso de Curtido de Pieles:.....	56
2.4.5. Ensayo de Jarras.....	69
CAPÍTULO III.....	73
3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	73
3.1. Metodología.....	73
3.1.1. Preparación de Muestra Patrón.....	73
3.1.2. Determinación de Cromo VI en Aguas para Curva de Calibración....	75
3.1.3. Pruebas Experimentales.....	80
3.1.4. Tipo de la Investigación.....	82
3.1.5. Nivel de la Investigación.....	82
3.2. Diseño de la Investigación.....	83
3.3. Hipótesis de la Investigación.....	84
3.3.1. Hipótesis General.....	84
3.3.2. Hipótesis Específicas.....	84
3.4. Variables.....	85

3.4.1.	Variable Independiente.....	85
3.4.2.	Variable Dependiente.....	85
3.5.	Cobertura del Estudio.....	85
3.5.1.	Universo.....	85
3.5.2.	Población.....	85
3.5.3.	Muestra.....	85
3.5.4.	Muestreo.....	86
3.6.	Técnicas e Instrumentos.....	86
3.6.1.	Técnicas de la Investigación.....	86
3.6.2.	Instrumentos de la Investigación.....	86
3.7.	Procesamiento Estadístico de la Información.....	86
3.7.1.	Estadísticos.....	86
3.7.2.	Representación.....	86
3.7.3.	Técnica de Comprobación de la Hipótesis.....	86
CAPITULO IV.....		87
4.	ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
4.1.	Resultados.....	87
4.1.1.	Concentración de Cromo (VI) Después del Tratamiento.....	87
4.1.2.	Parámetros de Control.....	89
4.1.3.	Remoción de Cromo para cada Dosis.....	91
4.1.4.	Relación de Tiempo Respecto a la Remoción de Cromo Hexavalente.....	100
4.1.5.	Cinética de la Reacción.....	101
4.2.	Contrastación de Hipótesis.....	104

CONCLUSIONES.	108
RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS.	115

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros para Bebida de Animales (CATEGORÍA 3).	40
Tabla 2.2 Metales Pesados Presentes en Efluentes Industriales.....	42
Tabla 2.3 Concentraciones de Cr en Varias Matrices Medioambientales.	45
Tabla 2.4 Compuestos de cromo y usos en diferentes procesos en la industria...	60
Tabla 2.5 Diversas maneras de exposición al cromo	61
Tabla 2.6 Efectos del Cromo en la Salud.....	62
Tabla 3.1 Primer Tratamiento.....	81
Tabla 3.2 Segundo Tratamiento.....	81
Tabla 3.3 Tercer Tratamiento.....	82
Tabla 3.4 Diseño de la Investigación	83
Tabla 3.5 Diseño Factorial Codificada y Real	84
Tabla 4.1 Resultados de Análisis de Cr(VI) con BaCl ₂	87
Tabla 4.2 Resultados de Análisis de Cr(VI) con Ca(OH) ₂	88
Tabla 4.3 Resultados de Remoción de Cr(VI) con BaCl ₂	88
Tabla 4.4 Resultados de Remoción de Cr(VI) con Ca(OH) ₂	89
Tabla 4.5 Datos de pH con el Tratamiento de BaCl ₂	89
Tabla 4.6 Datos de pH con el Tratamiento de Ca(OH) ₂	90
Tabla 4.7 % de Remoción de Cr(VI) con BaCl ₂	92
Tabla 4.8. % de Remoción de Cr(VI) con Ca(OH) ₂	96
Tabla 4.9 Concentraciones Finales de Cromo (VI) con BaCl ₂ y Ca(OH) ₂	100
Tabla 4.10 Datos de Ln(Co/C) con BaCl ₂	101
Tabla 4.11 Datos de Ln(Co/C) con Ca(OH) ₂	102
Tabla 4.12 Datos para Curva de Calibración Cr (VI).....	122

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura del Complejo $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++}$	51
Figura 2.2 Estructura del Ión Cromato CrO_4^{2-}	52
Figura 2.3 Estructura del Ión Dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	52
Figura 2.4 Balance de Materia Global del Proceso de Curtiembre	59
Figura 2.5 Balance de Materia para las Corrientes Líquidas Participantes en el Proceso de Curtiembre	59
Figura 3.1 Dicromato de Potasio	74
Figura 3.2 Solución de Difenilcarbazida	75
Figura 3.3 Soluciones Estándares Disueltos	77
Figura 3.4 Estándares en las Celdas del Espectrofotómetro	77
Figura 3.5 Análisis en el Espectrofotómetro	78
Figura 3.6 Curva de Calibración Cr(VI)	79
Figura 4.1 Datos de pH en la Remoción de Cr(VI) con BaCl_2	90
Figura 4.2 Datos de pH en la Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)_2	91
Figura 4.3 % Remoción de Cr(VI) con 0,36g de BaCl_2	93
Figura 4.4 % Remoción de Cr(VI) con 0,60g de BaCl_2	94
Figura 4.5 % Remoción de Cr(VI) con 1,15g de BaCl_2	95
Figura 4.6 Comparación del % Remoción de Cr(VI) con BaCl_2	95
Figura 4.7 % Remoción de Cr(VI) con 0,36g de Ca(OH)_2	97
Figura 4.8 % Remoción de Cr(VI) con 0,60g de Ca(OH)_2	98
Figura 4.9 % Remoción de Cr(VI) con 1,15g de Ca(OH)_2	98
Figura 4.10 Comparación del % Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)_2	99
Figura 4.11 Relación del Tiempo vs las Concentraciones Finales de Cr(VI)	100
Figura 4.12 Constante Cinética para la Remoción de Cr(VI) con BaCl_2	101
Figura 4.13 Constante Cinética para la Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)_2	102
Figura 4.14 % Remoción de Cr(VI) con dosificación de 1,15g de Ca(OH)_2 y BaCl_2	103
Figura 4.15 Fisher Individual 95% CIs	105
Figura 4.16 Fisher Individual 95% CIs	107

Figura 4.17 Preparación de Estándares.....	116
Figura 4.18 Preparación de Disolución de Ácido Sulfúrico.	116
Figura 4.19 Disolución de la Muestra Madre de Cromo.	117
Figura 4.20 Muestras Diluidas Para Curva de Calibración.....	117
Figura 4.21 Celdas para Análisis Espectrofotométrico.....	118
Figura 4.22 Análisis Espectrofotómetro.	118
Figura 4.23 Pesado de Cloruro de Bario.....	119
Figura 4.24 Disolución de Ácido Sulfúrico.....	119
Figura 4.25 Muestras de Cloruro de Bario e Hidróxido de Calcio.	120
Figura 4.26 Solución Definilcarbazida.....	120
Figura 4.27 Acidificación de la muestra.	121
Figura 4.28 Adición de Cloruro de Bario en la Prueba de Jarra.....	121

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

t	: tiempo, s
texp	: tiempo experimental en alcanzar el punto de ruptura definido como $C/C_0 = 0.05$ predicho por el modelo, h
T	: temperatura, °C
Cc	: Concentrado
EPA	: Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos de Norte América
H	: Horas
LMP	: Límites máximos permisibles
min	: Minutos
p/p	: Peso/peso
p/v	: Peso/volumen
C ₀	: Concentración inicial del Cr (VI) en la solución mg/L
C _e	: Concentración final del Cr (VI) en el equilibrio.mg/L
ANOVA	: Análisis de varianza.
ECA	: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental.
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
N	: Número de experimentos.
OMS	: Organización Mundial de la Salud
OPS	: Organización Panamericana de la Salud.
pH	: Medida de acidez o alcalinidad de la solución.
R	: Número de réplicas.

.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Remoción de cromo hexavalente por precipitación química con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 en solución de dicromato de potasio a nivel del laboratorio en la Universidad Alas Peruanas filial Huancayo”, tiene como objetivo principal evaluar determinar el porcentaje de remoción de cromo VI con la variación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 en determinados tiempos de agitación por un proceso de precipitación química en disolución acuosa; para lo cual se realizó 36 pruebas experimentales con tres diferentes dosificaciones de los dos floculantes y la variación de tres tiempo de agitación.

Se determinaron los porcentaje de remoción de cromo VI con el floculante $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en los diferentes tiempos de 15 min, 30 min y 45 min, en las dosis de 0,36 g resultando 47,1%; 72,4% y 71,5% de remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$ respectivamente para una dosis de 0,60 g resultando 72,4%; 85,9% y 82,8% de remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$ respectivamente y para una dosis de 1,15 g resultando 87,5%; 91,7% y 90,2% de remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$, de igual forma con el floculante BaCl_2 en los diferentes tiempos de 15 min, 30 min y 45 min, con la dosis de 0,36 g resultando 59,0%; 85,6% y 86,9% de remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$ respectivamente, para una dosis de 0,60 g resultando 83,6%; 90,1% y 89,9% de remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$ respectivamente y para una dosis de 1,15 g resultando 94,4%; 96,5% y 93,5% de remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$.

Se determinó el mayor % de remoción de cromo hexavalente en el tiempo de 30 minutos en cada uno de los floculantes y respecto a lo dosificación fueron en 1,15 g respectivamente, el BaCl_2 en solución acida tiene el mayor porcentaje de remoción siendo el 96,50%.

La relación del tiempo de agitación con la remoción de cromo con el floculante BaCl_2 de forma lineal obteniendo una ecuación $Y=-0,0182*X+1,096$ con un coeficiente de relación de 0,9656, también se analizó en función a la cinética de reacción de primer orden obteniendo la constante cinética (K), con un valor de $0,028 \text{ min}^{-1}$ y un coeficiente de correlación de $R^2=0,9796$. De igual forma con el floculante $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de forma lineal obteniendo una ecuación $Y=-0,0353*X+2,398$ con un coeficiente de relación de 0,9579, también se analizó en función a la cinética de

reacción de primer orden obteniendo la constante cinética (K), con un valor de $0,0232 \text{ min}^{-1}$ y un coeficiente de correlación de $R^2=0,9539$. Con estos resultados se logró determinar que floculantes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 tienen altos porcentajes de remoción de cromo hexavalente.

ABSTRACT

This paper titled "Removal of hexavalent chromium by chemical precipitation with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and BaCl_2 in potassium dichromate solution at the level of the laboratory in the University Wings Peruvian subsidiary Huancayo" has as main objective to evaluate determine the percentage of removal of chromium VI variation of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and BaCl_2 in certain mixing times for chemical precipitation process in aqueous solution; 36 for which experimental tests with three different dosages of the two flocculants and variation three stirring time was performed.

The percentage of removal of chromium VI with the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ flocculant in different times of 15 min, 30 min and 45 min, at doses of 0,36 g resulting 47,1% were determined; 72,4% and 71,5% removal of Cr (VI), respectively, for a dose of 0.60 g resulting 72.4%; 85.9% and 82.8% removal of Cr (VI) respectively and a dose of 1,15 g resulting 87,5%; 91,7% and 90,2% removal of Cr (VI), similarly with the flocculant BaCl_2 at different times of 15 min, 30 min and 45 min, the resulting dosage of 0,36 g 59,0 %; 85,6% and 86,9% removal of Cr (VI) respectively, for a dose of 0,60 g resulting 83,6%; 90,1% and 89,9% removal of Cr (VI) respectively and a dose of 1,15 g resulting 94,4%; 96,5% and 93,5% removal of Cr (VI).

The highest % removal of hexavalent chromium was determined in 30 minutes in each of the flocculants and were compared to dosing at 1,15 g respectively, BaCl_2 in the acid solution has the highest removal percentage being 96,50%.

The stirring time relationship with the removal of chromium with the flocculant BaCl_2 linear form obtaining an equation $Y = -0,0182 * X + 1,096$ with correlation coefficient of 0,9656, the kinetics are also analyzed in terms obtaining first-order reaction rate constant (K), with a value of $0,028 \text{ min}^{-1}$ and a correlation coefficient of $R^2 = 0,9796$. Likewise with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ linearly flocculant will obtain an equation $Y = -0,0353 * X + 2,398$ a correlation coefficient of 0,9579, the kinetics are also analyzed in terms of first-order reaction obtaining kinetic constant (K), with a value of $0,0232 \text{ min}^{-1}$ and a correlation coefficient of $R^2 = 0,9539$. With these results it was determined that flocculants $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and BaCl_2 have high percentages of removal of hexavalent chromium.

INTRODUCCIÓN

La industria de curtido de pieles tiene altos índices de consumo de agua y respectivamente, genera grandes cantidades de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica, sólidos, salinidad, grasas y presencia de contaminantes específicos, tales como cromo, sulfuros y amoníaco. La cantidad y las características de las aguas residuales dependen sobre todo de la combinación de operaciones y procesos que utiliza cada una de las categorías de este sector industrial, así como del tipo y los métodos de conservación de las pieles, y de las sustancias químicas utilizadas en las diferentes fases del procesamiento. Influye también el orden en que se llevan a cabo las operaciones y en general el control del proceso de producción.

Como una alternativa para solucionar este problema, se propone aplicar el método de precipitación química, el cual consiste en añadir ciertos productos químicos al agua residual para conseguir que éstos alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación.

Es así que para precipitar químicamente el cromo de la solución, primero el cromo hexavalente debe ser reducido a trivalente entonces el trivalente precipitará como compuesto de hidróxido, finalmente una sedimentación o filtración, o ambas según sea el caso.

Este trabajo de investigación busca obtener una alternativa de solución a la problemática de la contaminación del agua, específicamente por cromo (VI) en los cuerpos receptores, a causa del desecho de efluentes sin ningún tipo de tratamiento conteniendo altas concentraciones de cromo en forma iónica. Debido a que el cromo es un metal tóxico que en aguas residuales de este tipo de industria, se encuentra presente en altas concentraciones, se propone la aplicación de un proceso de precipitación química para la remoción de cromo hexavalente en disolución acuosa, con el cual se dará una alternativa de solución práctica, habiéndose planteado como problema cuál es el porcentaje de remoción de cromo VI con la variación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 en determinados tiempos de agitación, y como objetivos para el desarrollo del trabajo de investigación se calculó el porcentaje de remoción de

cromo VI al aplicar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio, se calculó además el porcentaje de remoción de cromo VI al aplicar BaCl_2 como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio, se determinó también el agente precipitante de mayor % de remoción de cromo VI en un proceso de precipitación química, se determinó la relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) en un proceso de precipitación química con BaCl_2 y se determinó la relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) en un proceso de precipitación química con $\text{Ca}(\text{OH})_2$

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Caracterización de la Realidad Problemática

La contaminación del ambiente por aguas residuales es una problemática a nivel mundial, pero no solo por el incremento lógico de las aguas residuales municipales, sino también de los residuos industriales (curtiembres, minería, textilera, etc.), consecuencia del progreso tecnológico, por una parte y el acelerado crecimiento demográfico, por la otra, este último se ha acentuado aún más en la última década; es decir, existe un crecimiento alarmante, (debido a la falta de planificación familiar, mala educación y la condición socio-económica), que en conjunto producen la alteración del medio, llegando en algunos casos a atentar contra el equilibrio biológico de la Tierra con la generación de nuevos contaminantes, como es el caso del cromo que ha sido designado como un contaminante prioritario según la U.S. EPA (Environmental Protection Agency - Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) debido a su carcinogenicidad y mutagenicidad (Contreras, Ferro Orozco, & Zaritzky, 2014).

En el Perú, existen alrededor de 56 curtiembres formales, siendo el cromo el principal agente contaminante de sus aguas residuales, ello debido a que en

las curticiones al cromo normales, casi un tercio del curtiente del cromo aplicado permanece intacto y pasa como residuo a los desagües de las tenerías; con altas concentraciones se hace necesario generar investigaciones para remover este metal, dando a su vez más importancia a la imposición de medidas estrictas para la depuración de dichos efluentes, con especial consideración en las sales de cromo trivalente que queda sin utilizar (Ricaldi Hurtado, 2003).

A nivel de la provincia de Huancayo, la Dirección de Industria y Artesanía de la Región Junín (DRITINCI), tomó una muestra de 146 artesanos por línea de producción, de los cuales 26 integraban la muestra referente a la industria de curtiembre y peletería formales, obteniéndose que el 65,38% de ellos elaboran de 30 a 50 unidades de artículos de peletería para ofertar en el mercado local, regional y nacional como carteras, zapatos y otros; y el 34,62% procesan el cuero de 10 a 20 unidades mensuales.

Debido a la elevada solubilidad que presenta este metal, puede persistir en ambientes acuáticos, por lo que se constituye como uno de los metales más peligrosos para el ambiente, y por consiguiente para el hombre y los animales.

El cromo es uno de los metales pesados que más problemas han generado debido a su toxicidad en su estado iónico Cromo VI. Quizás la ruta de exposición a los compuestos de cromo más extensa para la población es a través del agua potable contaminada. Dado que el metal es tanto inodoro como insípido, uno no sabría cuando ha sido expuesto. Sin embargo, el cromo podría ser difícil de controlar en el agua potable debido a los niveles naturales que existen en el medio ambiente. Se sabe que las exposiciones a altas concentraciones de cromo VI causan una amplia variedad de síntomas, incluyendo úlceras cutáneas y efectos a la salud más severos, tales como insuficiencia renal y del hígado.

Los cultivos contienen sistemas para gestionar la toma de Cromo para que esta sea lo suficientemente baja como para no causar cáncer. Pero cuando

la cantidad de Cromo en el suelo aumenta, esto puede aumentar las concentraciones en los cultivos. La acidificación del suelo puede también influir en la captación de Cromo por los cultivos. Las plantas usualmente absorben sólo Cromo (III). Esta clase de Cromo probablemente es esencial, pero cuando las concentraciones exceden cierto valor, efectos negativos pueden ocurrir.

No es conocido que el Cromo se acumule en los peces, pero altas concentraciones de Cromo, debido a la disponibilidad de metales en las aguas superficiales, pueden dañar las agallas de los peces que nadan cerca del punto de vertido. En animales el Cromo puede causar problemas respiratorios, una baja disponibilidad puede dar lugar a contraer las enfermedades, defectos de nacimiento, infertilidad y formación de tumores. Lastimosamente, a causa de la deficiente tecnología en cuanto a operaciones y procesos de producción, y el tratamiento de los efluentes tenemos como resultado una gran cantidad de aguas residuales que contaminan el ambiente.

Este panorama sería diferente si se promoviera la aplicación de tecnologías para la remoción del cromo en los efluentes, además de la modificación de las operaciones y procesos de producción; con lo cual se ayudaría a disminuir o minimizar los volúmenes de los efluentes o la concentración en las descargas y se daría, un aprovechamiento integral o parcial de los efluentes para recuperar y/o generar productos valiosos, que ofrezcan alguna rentabilidad interesante.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es el porcentaje de remoción de cromo VI con la variación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 en determinados tiempos de agitación por un proceso de precipitación química en disolución acuosa de dicromato de potasio?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el porcentaje de remoción de cromo VI al aplicar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio?
- ¿Cuál es el porcentaje de remoción de cromo VI al aplicar BaCl_2 como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio?
- ¿Cuál de estos agentes precipitantes: BaCl_2 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tiene mayor % de remoción de cromo VI en un proceso de precipitación química?
- ¿Cuál es la relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) en un proceso de precipitación química con BaCl_2 ?
- ¿Cuál es la relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) en un proceso de precipitación química con $\text{Ca}(\text{OH})_2$?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar el porcentaje de remoción de cromo VI con la variación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 en determinados tiempos de agitación por un proceso de precipitación química en disolución acuosa de dicromato de potasio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular el porcentaje de remoción de cromo VI al aplicar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio.
- Calcular el porcentaje de remoción de cromo VI al aplicar BaCl_2 como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio.
- Determinar el agente precipitante de mayor % de remoción de cromo VI en un proceso de precipitación química.

- Determinar la relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) en un proceso de precipitación química con BaCl_2
- Determinar la relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) en un proceso de precipitación química con $\text{Ca}(\text{OH})_2$

1.4. Justificación

Este trabajo de investigación busca obtener una alternativa de solución a la problemática de la contaminación del agua, específicamente por cromo (VI) en los cuerpos receptores, a causa del desecho de efluentes sin ningún tipo de tratamiento conteniendo altas concentraciones de cromo en forma iónica. Debido a que el cromo es un metal tóxico que en aguas residuales de este tipo de industria, se encuentra presente en altas concentraciones, se propone la aplicación de un proceso de precipitación química para la remoción de cromo hexavalente en disolución acuosa, con el cual se dará una alternativa de solución práctica, al tipo de contaminación que generan las industrias que utilizan este metal como insumo; entonces, lo que se busca, es remover el metal tóxico aplicando dicho proceso, disminuyendo así la contaminación de ríos, lagos y demás fuentes hídricas, lo cual mejorara significativamente la calidad del recurso para ser aprovechado en distintas actividades, y por consiguiente se mejorara la calidad de vida de la población.

1.5. Importancia

El Perú, tiene diversas actividades económicas, donde cabe destacar la industria de curtiembre, como generadora de impactos al recurso hídrico al emitir efluentes con alto contenido de residuos de cromo.

Es de suma importancia buscar remediar la contaminación causada por la actividad antropogénica, en este caso debido a las industrias que utilizan este metal en sus procesos, buscando el desarrollo de métodos que sean amigables con el ambiente; es decir, que sean limpios, sostenibles y

responsables para mantener el equilibrio del ambiente y principalmente recuperar su calidad, como lo es aplicar un proceso de precipitación química con el cual se busca la extracción de cromo hexavalente en disolución acuosa.

De esta manera la población se verá beneficiada pues el cromo dejará de ser un contaminante potencial de sus aguas, y se evitará que esta carga de metal tóxico llegue a niveles de afección en otras de sus actividades económicas, como lo son: La agricultura y la ganadería; además de evitar los graves efectos a la salud del ser humano.

Por otra parte, en cuanto a su alcance, esta investigación abrirá nuevos caminos para estudios que representen situaciones similares a las que aquí se plantean, sirviendo como marco referencial a otras investigaciones.

1.6. Limitaciones

No se cuenta con el efluente residual de una industria de curtiembre local, por lo que, la investigación se llevará a cabo bajo condiciones ideales de laboratorio, preparando una solución sintética con el agua destilada y dicromato de potasio, tratando de obtener parámetros similares a los del agua residual resultante de la etapa de curtición.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Marco Referencial

2.1.1. Antecedentes de la Investigación

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN SOLUCIÓN ACUOSA POR PRECIPITACIÓN Y FLOCULACIÓN EN TOLUCA – MÉXICO, REALIZADO POR JUAREZ RIOS, ROA MORALES, & HERNANDEZ LOPEZ, 2014: En este trabajo utilizaron el cromo hexavalente presente en una solución acuosa preparada en una concentración de 500 mg/L, lo precipitaron químicamente adicionando BaCl_2 0,2 M; las muestras de 100 mL conteniendo 50 mg del metal fueron tratadas con diferentes cantidades de agente precipitante, obteniéndose sólidos en suspensión de BaCrO_4 con una velocidad de sedimentación casi nula para efectos prácticos; a estas soluciones se les adicionaron un polielectrolito aniónico en solución al 0,1%; aplicando dos velocidades diferentes; una velocidad alta para permitir su rápida incorporación en la solución y una velocidad lenta para permitir la formación de los flóculos. La concentración de Cr (VI) se determinó

antes y después del tratamiento utilizando la técnica de espectrofotometría con Difenilcarbazida; así como también se determinó la turbidez de la solución antes y después de la adición de polielectrolito.

Los resultados que obtuvieron fueron muy satisfactorios, alcanzaron un porcentaje de remoción de Cr (VI) del 99,86%; de 500 mg/L presente inicialmente se llegó a una concentración final de 0,67 mg/L esto utilizando 7,5 mL de BaCl₂ 0,2 M y 0,5 mg de polielectrolito aniónico. El uso del polielectrolito para acelerar la sedimentación del precipitado de BaCrO₄, fue determinante para alcanzar este porcentaje de remoción ya que de no hacer uso del mismo, el proceso de precipitación no hubiera sido suficiente para separar el Cr (VI) de la solución debido a que los sólidos permanecen en su gran mayoría suspendidos en la solución. Esto último se comprobó mediante la determinación de la turbidez de la solución antes y después de la adición del polímero, la turbidez inicial de la solución fue de 3500 NTU y la turbidez final fue de 100 NTU.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE AGENTES QUIMICOS EN NUEVO LEON – MÉXICO, REALIZADO POR SOTO REGALADO, LOZANO RAMÍREZ, BARBARÍN CASTILLO, & ALCALÁ RODRÍGUEZ, 2014: Los autores de este trabajo presentan una alternativa para remover metales pesados de aguas residuales que genera la industria galvánica de la ciudad de Monterrey. De acuerdo a los análisis realizados por ellos el agua contiene Cr⁺³, Fe⁺³, Zn⁺² y Ni⁺², en cantidades que rebasan la norma mexicana. La experimentación la realizaron utilizando un equipo de prueba de jarras. Utilizaron cuatro coagulantes: Al₂(SO₄)₃, FeSO₄, Fe(SO₄)₃ y FeCl₃.

El FeCl_3 mostró el mejor nivel de remoción de metales estudiados así como una velocidad de sedimentación más rápida. Con respecto al cromo los coagulantes que mostraron el mejor nivel de remoción fueron el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el FeSO_4 con un 99.96 % de remoción para ambos casos. También se encontró una relación entre el nivel de remoción con el tamaño de los flóculos.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE EL EFECTO DE LA CANTIDAD DE CROMO HEXAVALENTE Y EL pH EN LA REMOCIÓN DE Cr^{+6} EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE ELECTRODOS ROTATORIOS EN AZCAPOTZALCO-MÉXICO, REALIZADO POR RODRIGUEZ, MARTINEZ, & TELLO, 2001: En este documento los autores llevaron a cabo la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6}) de aguas de enjuague de la industria de galvanoplastía mediante tratamiento electroquímico en un reactor de electrodos rotatorios de acero al carbón. Trabajando en reactores por lote, con capacidad de 8, 12 y 16 L de volumen de operación.

Sus resultados muestran que, en las condiciones de experimentación, el tiempo de remoción de Cr^{+6} no depende de la concentración para la misma cantidad de gramos de cromo hexavalente disueltos en el agua residual; además, para diferentes volúmenes de operación a la misma concentración de cromo hexavalente, el tiempo para alcanzar concentraciones de Cr^{+6} menores a 0,5 mg/L incrementa al ser mayor el volumen de operación. Para todos los casos se logró una remoción del 99.96 % pero lo que varía es el tiempo, siendo 22, 32 y 60 minutos para los volúmenes de 8, 12 y 16 litros. Obtuvieron también que el pH en el que se desarrolla el proceso, ya que este es determinante, encontrándose que a pH ácido la reacción es más rápida que a pH =7,0

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE LA REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE Y CROMO TOTAL POR LA CORTEZA DE *Pyrus communis* EN SANTO TOMAS-MÉXICO, REALIZADO POR NETZAHUATL MUÑOZ, PINEDA CAMACHO, BARRAGÁN HUERTA, & CRISTIANI URBINA, 2010: En este documento los autores tomaron como objetivo principal evaluar la remoción de cromo hexavalente [Cr (VI)] y cromo total por la corteza de *Pyrus communis*. Ellos encontraron que en las primeras 24 h de contacto la corteza fue capaz de disminuir la concentración de Cr (VI) y cromo total desde 102 mg/L⁻¹ hasta 20,43 y 39,63 mg/L⁻¹, respectivamente. Subsecuentemente, las concentraciones continuaron disminuyendo lentamente hasta alcanzar valores de 0,91 mg de Cr (VI)/L⁻¹ y 31,26 mg de cromo total/L⁻¹ a las 120 h. Durante todo el periodo experimental se detectaron la presencia de cromo trivalente [Cr (III)] en la solución acuosa, lo que ocasionó que la concentración de cromo total residual fuera superior a la de Cr (VI) residual.

Estos resultados indican que la corteza de *Pyrus communis* fue capaz de biotransformar al menos parte del Cr (VI) inicialmente adicionado a la solución acuosa a cromo trivalente [Cr (III)]. Las capacidades de remoción de Cr (VI) y cromo total se incrementaron progresivamente a medida que aumentó el tiempo de contacto, alcanzándose valores de 101,09 y 70,74 mg/g⁻¹, respectivamente, a las 120 h de contacto.

En contraste, las velocidades volumétricas de remoción de Cr (VI) y cromo total disminuyeron a medida que aumentó el tiempo de contacto. El modelo de pseudosegundo orden describió la cinética de biosorción de cromo, lo que sugiere que el mecanismo cinético de remoción de cromo total es la quimisorción. Concluyeron que la corteza de *Pyrus communis* es capaz de remover cromo de soluciones acuosas por biorreducción y biosorción.

SEGÚN LA INVESTIGACION SOBRE REMOCIÓN Y REDUCCIÓN DE CROMO VI EN SOLUCIÓN POR LA CÁSCARA DE LICHEE (*litchi chinensis soon*) EN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO, realizado por Martínez Pérez, y otros, 2010: En este documento los autores prepararon la biomasa a partir de la cáscara de Litchi, la cortaron en piezas pequeñas, las lavaron exhaustivamente con agua, para remover el polvo y los componentes adheridos, y las secaron a 60°C/12 h y las molieron hasta la obtención de un polvo fino, utilizando 1 g de esta biomasa estéril para los estudios de bioadsorción.

Trabajaron con 100 mL de una solución de 1000 mg/L de concentración de Cr (VI) obtenida por dilución de una solución patrón de 1,0 g/L preparada en agua tridesionizada a partir de K_2CrO_7 . Ajustaron el pH de la dilución a analizar con H_2SO_4 1 M y/o NaOH 1 M, antes de adicionarla a la biomasa celular.

Mezclaron 1,0 g de cáscara de Litchi, con 100 mL de una solución de 1,0 g/L del metal, incubando con agitación constante a 100 rpm a 28°C, tomando a diferentes tiempos y en condiciones estériles, alícuotas de 5 mL cada una, las cuales se centrifugaron a 3000 rpm (5 min), y al sobrenadante respectivo se le determinó la concentración de Cr (VI) en solución, utilizando el método colorimétrico de la Difenilcarbazida.

Inicialmente, se analizaron la bioadsorción de 50 mg/L de Cr (VI), a diferentes tiempos de incubación y valores de pH, encontrando que a pH's más ácidos se absorbe más eficientemente el metal, pues a pH de 1,0 y 2,0 se remueve el 100% a los 5 y 30 minutos, respectivamente.

2.1.2. Referencias Históricas.

Diferentes compuestos del cromo son contaminantes ambientales presentes en agua, suelos y efluentes industriales, debido a que dicho metal es ampliamente utilizado en distintas actividades manufactureras. El Cromo (III) es considerado relativamente inocuo comparado con el Cromo (VI), que usualmente se encuentra en forma de iones cromato (CrO_4^{2-}) o dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), los cuales atraviesan fácilmente barreras biológicas, y que han mostrado ser mutagénicos y carcinogénicos. En las aguas residuales, el Cr (VI), se encuentra en solución como CrO_4^{2-} (Cotton y Wilkinson, 1980), y puede removerse por reducción, precipitación química, adsorción e intercambio iónico (Cervantes et al., 2001). El proceso más utilizado es la adición de un agente reductor que convierta el Cr (VI) a Cr (III) y posteriormente se le precipita con soluciones básicas a $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (Campos et al., 1995). Recientemente, se ha analizado el uso de metodologías alternativas, como la reducción de Cr (VI) a Cr (III) por *Pseudomonas* sp., *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Arthrobacter rhombi*, *Candida maltosa* (Ramírez-Ramírez et al., 2004), *Penicillium* sp. y *Aspergillus* sp. (Acevedo-Aguilar et al., 2006), que son hongos, bacterias y levaduras, así como su bioadsorción por biomásas fúngicas como: *Cryptococcus neoformans* y *Helminthosporium* sp

Por otro lado, también se han utilizado materiales de bajo costo, como residuos industriales agrícolas o urbanos para la adsorción y/o recuperación de metales pesados de efluentes industriales contaminados, entre los que se encuentran: cáscara y semillas de manzana, corteza de árbol cáscara de avellana (Cimino et al., 2000), cáscara de naranja (Pérez-Marín et al., 2007), cáscara de tamarindo (Popuri et. al., 2007; Acosta et. al., 2010). Además, se ha reportado que algunas de estas biomásas pueden reducir el Cr (VI) a Cr (III), como la biomasa de kombucha (hongo del Te) (Razmovski y Sciban,

2008), mezquite (Aldrich et al., 2003), corteza de eucalipto (Sarin y Pant, 2006), bauxita calcinada (Baral, et al., 2007), residuos de rosas rojas (Shafqat, et al., 2008), corteza de yohimbina (Fiol et al., 2008), cáscara de litchi (Martínez Pérez et al., 2010); por lo que es de gran interés analizar otros materiales baratos para tratar de eliminar y/o reducir el metal de suelos y aguas contaminados con el mismo, como la cáscara de naranja (*Citrus sinensis* Osbeck), de la cual se ha reportado que sus desechos remueven eficientemente cadmio (Pérez-Marín et al., 2007), cobre (Lu et al., 2009), cadmio, zinc, cobalto y níquel (Li et al., 2008).

2.2. Marco Legal

La aprobación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el agua tienen el objetivo de establecer el nivel de concentración o el grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los ecosistemas acuáticos, que no representan riesgos significativos para la salud de las personas ni para el ambiente. Los estándares aprobados son aplicables a los cuerpos de agua del territorio nacional en su estado natural y son obligatorios en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Las aguas superficiales, que van a ser destinadas al abastecimiento de agua potable, deben mantener parámetros mínimos de calidad los que aseguren su correcto estado y permitan calificar a los recursos hídricos para el uso que se va a dar. Por ellos se establecieron estándares de calidad ambiental del agua, límites máximos permisibles y valores máximos admisibles las cuales presentare a continuación como medidas que fueron establecidas en normas ambientales:

- Ley N° 29338 “Ley de Recursos Hídricos”

- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, que aprueba los estándares Nacionales de Calidad de Agua.
- Decreto Supremo N° 023-2009.MINAM, que aprueba las disposiciones para la implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua.
- Decreto Supremo N° 001-2010-ANA, que aprueba el reglamento de la ley N° 29338, Ley de recursos hídricos.
- Resolución Jefatural N° 202-2010-ANA, que aprueba la clasificación de cuerpos de aguas superficiales y marino-costeros.
- Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA, que aprueba el protocolo Nacional de Monitoreo de calidad de los recursos hídricos superficiales.

2.3. Marco Conceptual.

- Aguas naturales: Se define como agua natural el agua cruda, subterránea, de lluvia, de tormenta, residual y superficial.
- Aguas residuales: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas.
- Análisis de blanco analítico: Es el someter un alícuota de agua reactivo a todo el proceso de análisis por el cual pasa una muestra real. Los laboratorios deben realizar los análisis de blancos para corregir la señal de fondo del sistema de medición. El análisis de blancos se realizará en forma periódica o con cada lote de muestras según lo requiera el método.
- Anión: Se llaman aniones a las “especies químicas” cargadas negativamente. Los aniones más simples son los monoatómicos, que proceden de la ganancia de uno o más electrones por un elemento electronegativo.

- **Bitácora:** Cuaderno de laboratorio debidamente foliado e identificado, en el cual los analistas anotan todos los datos de los procedimientos que siguen en el análisis de una muestra, así como todas las informaciones pertinentes y relevantes a su trabajo en el laboratorio. Es a partir de dichas bitácoras que los inspectores pueden reconstruir el proceso de análisis de una muestra tiempo después de que se llevó a cabo.
- **Blanco:** Agua reactivo o matriz equivalente a la que no se le aplica ninguna parte del procedimiento analítico y sirve para evaluar la señal de fondo.
- **Calibración:** Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento o sistema de medición, o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud, realizados por los patrones, efectuando una corrección del instrumento de medición para llevarlo a las condiciones iniciales de funcionamiento.
- **Catión:** Cuando un átomo pierde electrones (los electrones de sus orbitales más externos, también llamados electrones de valencia) adquiere, como es lógico, una carga positiva neta.
- **Cromo (VI):** Es un metal que se halla espontáneamente en el agua, el suelo y las rocas. También se lo encuentra en los cultivos y como elemento remanente en los suelos agrícolas. Además, hay niveles traza de cromo en el medio ambiente, el cual proviene de la actividad industrial.
- **Curtido:** Es el proceso de convertir la piel putrescible en cuero imputrescible, tradicionalmente con tanino, un compuesto químico ácido que evita la descomposición y a menudo da color.
- **Descarga:** Acción de verter, infiltrar o depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación.

- Desviación estándar experimental: Para una serie de n mediciones del mismo mensurando, es la magnitud s que caracteriza la dispersión de los resultados
- Disolución estándar: Disolución de concentración conocida preparada a partir de un patrón primario.
- Disolución madre: Corresponde a la disolución de máxima concentración en un análisis. Es a partir de esta disolución que se preparan las disoluciones de trabajo.
- Exactitud: Proximidad de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del mensurando.
- Ion: Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutra. Conceptualmente esto se puede entender como que, a partir de un estado neutro de un átomo o partícula, se han ganado o perdido electrones; este fenómeno se conoce como ionización.
- Límite de cuantificación del método (LCM): Es la menor concentración de un analito o sustancia en una muestra que puede ser cuantificada con precisión y exactitud aceptables bajo las condiciones en que se lleva a cabo el método.
- Límite de detección del método (LDM): Es la mínima concentración de un analito o sustancia en una muestra, la cual puede ser detectada pero no necesariamente cuantificada bajo las condiciones en que se lleva a cabo el método.
- Medición: Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud.
- Mensurando: Magnitud particular sujeta a medición.
- Muestra compuesta: La que resulta de mezclar un número de muestras simples. Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una

de las muestras simples debe ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

- Muestra simple: La que se tome en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento de muestreo. Para nombrar estas “especies químicas” basta anteponer la palabra catión o ion al nombre del elemento.
- Parámetro: Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.
- Precisión: Es el grado de concordancia entre resultados analíticos individuales cuando el procedimiento analítico se aplica repetidamente a diferentes alícuotas o porciones de una muestra homogénea.
- Trazabilidad: Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón por la cual pueda ser relacionado a referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas las incertidumbres determinadas
- Verificación de la calibración: Una verificación periódica de que no han cambiado las condiciones del instrumento en una forma significativa.

2.4. Marco Teórico.

2.4.1. El Agua

El agua es una sustancia polar compuesta, donde las moléculas de agua se disponen alrededor de los iones positivos con la parte negativa de su molécula hacia ellos y en el caso de los iones negativos les enfrentan la parte positiva, siendo la distribución

asimétrica de sus electrones la causa de su polaridad. Además el agua es caracterizada por ser líquida, inodora, insípida, en pequeña cantidad incolora y verdosa o azulada en grandes masas; sus temperaturas de transformación de un estado a otro han sido tomadas como puntos fijos, a pesar de que su punto de congelación y ebullición sean anormales, debido a las asociaciones moleculares, diferente a la mayoría de los líquidos, manifiesta extraordinarias propiedades físicas y químicas. (Universidad de Salamanca, 2014)

2.4.1.1. Aguas Residuales

Se consideran Aguas Residuales a los líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios). Comúnmente las aguas residuales suelen clasificarse como:

- a) Aguas Residuales Municipales: Residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal.
- b) Aguas Residuales Industriales. Las aguas residuales provenientes de las descargas de industrias de manufactura. Otra forma de denominar a las Aguas Residuales es en base al contenido de contaminantes que esta porta.
- c) Aguas negras a las Aguas Residuales provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales.
- d) Aguas grises a las Aguas Residuales provenientes de tinajas, duchas, lavamanos y lavadoras, que aportan sólidos suspendidos, fosfatos, grasas y coliformes fecales, esto es, aguas residuales domésticas, excluyendo las de los inodoros.
- e) Aguas negras industriales a la mezcla de las aguas negras de una industria en combinación con las aguas residuales de sus

descargas. Los contaminantes provenientes de la descarga están en función del proceso industrial, y tienen la mayoría de ellos efectos nocivos a la salud si no existe un control de la descarga (Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana - CESPT, 2014)

A) Aguas Residuales Industriales

El término agua residual define un tipo de agua que está contaminada con sustancias fecales y orina, procedentes de desechos orgánicos humanos o animales. Su importancia es tal que requiere sistemas de canalización, tratamiento y desalojo. Su tratamiento nulo o indebido genera graves problemas de contaminación.

Las aguas negras industriales contienen grandes cantidades de compuestos y elementos tóxicos. Los más comunes son:

- Metales pesados (Hg, Cr, Cd, Zn, Se y Pb),
- Plaguicidas (DDT, etc),
- Compuestos a base de NO_3^- , CN^-
- Organoclorados

Todos estos productos o elementos, cuando en las aguas negras están disueltos en conjunto con otros, tienen un efecto sinérgico, produciendo el fenómeno de *multiplicación de su efecto tóxico* (Acosta, Córdova, Argentina).

2.4.1.2. Contaminación del Agua.

El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación. Pero esta misma facilidad de regeneración del agua, y su aparente abundancia, hace que sea el vertedero habitual en el que arrojamos los residuos producidos por nuestras actividades. Pesticidas, desechos químicos, metales pesados, residuos radiactivos, etc.; se encuentran, en cantidades mayores o menores, al analizar las aguas

de los más remotos lugares del mundo. Muchas aguas están contaminadas hasta el punto de hacerlas peligrosas para la salud humana, y dañinas para la vida (Grundfos X, 2014).

a) Efectos de los Contaminantes

El agua se contamina cuando la descarga de residuos perjudica la calidad del agua o perturba el equilibrio ecológico natural. Los contaminantes que causan problemas comprenden organismos causantes de enfermedades (patógenos), materia orgánica, sólidos, nutrientes, sustancias tóxicas, color, espuma, calor y materiales radiactivos. La descarga de contaminantes específicos no es la única causa de contaminación del agua. La construcción de presas, embalses y desviaciones de ríos también puede degradar seriamente la calidad del agua. (Glynn & Heinke, 1999)

b) Metales Pesados en el Agua.

La composición específica de los vertidos de cada industria en particular, la evacuación de las aguas tratadas (a alcantarillado, lechos de ríos, lagos, etc.), la disponibilidad de terreno en las inmediaciones de la empresa, la distancia a núcleos urbanos, la recuperación y reutilización de estas aguas, su posible utilización para riego, todos estos factores, en función de la legislación sobre vertidos y el estudio económico de aplicación, serán los que nos permitirán escoger el método más eficaz y económico de todos los que se describen.

Los metales pesados provienen generalmente de aguas residuales comerciales e industriales. Aunque algunos de estos metales son necesarios para el desarrollo de la vida biológica, las concentraciones elevadas de éstos pueden interferir en los procesos de depuración y, por supuesto, que su vertido al medio acuático podría poner en peligro el aprovechamiento de las

aguas naturales dada su alta toxicidad (Sans Fonfria & de Pablo Ribas, 1989)

c) Contaminación del Agua por Metales Pesados

En forma general, puede definirse la contaminación del agua como la alteración desfavorable que sufre, al incorporársele una serie de sustancias que cambian sus condiciones naturales de calidad, ocasionando grandes riesgos para la salud y el bienestar de la población. Particularmente peligroso es la contaminación provocada por las altas concentraciones de algunos metales pesados y su incremento en los efectos adversos causados por la persistencia y el fenómeno de biomagnificación, provenientes de las actividades antropogénicas.

Los efluentes industriales son considerados como uno de los principales responsables tanto directos como indirectos de la contaminación de aguas superficiales. Efluentes como los producidos por refinerías de petróleo, industrias de pulpa y papel, textiles, metalúrgicas, industrias productoras de químicos orgánicos e inorgánicos, de plástico, por curtiembres, mineras, de galvanoplastia, entre otras, contienen una gran cantidad de metales pesados.

Al contrario de muchos contaminantes orgánicos los metales pesados, generalmente, no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales debido a que no son biodegradables. Por el contrario son muy contaminantes y sufren un ciclo global exobiológico, donde las aguas naturales son el principal camino. Hoy en día los metales pesados tienen un gran significado como indicadores de la calidad ecológica de todo flujo de agua debido a su toxicidad y muy especialmente al comportamiento bioacumulativo.

Así mismo los metales pesados tienen tendencia a formar asociaciones con sustancias minerales (carbonatos, sulfatos, etc.) y en mayor grado con sustancias orgánicas, mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción, quelación, formación de combinaciones químicas, etc., por lo que se acumulan en el medio ambiente, principalmente en los sedimentos de ríos, lagos y mares. Las altas concentraciones de metales pesados en las aguas de corrientes fluviales asociados a sulfuros tales como el arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) pueden atribuirse a la minería lo cual son causa del fuerte impacto en el medio ambiente. En cambio, otros metales no-sulfurosos como el cromo (Cr), níquel (Ni) y mercurio (Hg) posiblemente indican una contaminación antropogénica de metales pesados que están estrechamente asociados con las descargas industriales. (Copyright © 2014 Universidad Técnica de Machala, 2014)

2.4.1.3. Normas Nacionales de Control de Calidad de Aguas

Mediante el decreto legislativo N° 1013 se aprobó la Ley de la creación, organización y funciones del ministerio del ambiente, señalándose como una de sus funciones específicas la de elaborar los estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles, que contando con la propuesta de la ECA (Estándares nacionales de calidad ambiental) para agua, corresponde aprobarlos mediante Decreto Supremo, conforme a lo establecido en el artículo 7° del decreto legislativo N° 1013 y la ley N° 28611; también mediante la resolución ministerial N°011-96-EMV se aprobaron los niveles máximos permisibles para efluentes líquidos minero-metalúrgicos en base a esta ley, que clasifica las aguas de acuerdo al uso que se le

va a dar, para el caso de la minería le corresponde la clase III (aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales).

Tabla 2.1 Parámetros para Bebida de Animales (CATEGORÍA 3).

PARÁMETRO PARA BEBIDA DE ANIMALES		
PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Fisicoquímicos		
Conductividad eléctrica	uS/cm	<=5000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	<=15
Demanda química de oxígeno	mg/L	40
Fluoruro	mg/L	2
Nitratos (NO ₃ -N)	mg/L	50
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	1
Oxígeno disuelto	mg/L	>5
Ph		6,5-8,4
Sulfatos	mg/L	500
Sulfuros	mg/L	0,05
Inorgánicos		
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,1
Berilio	mg/L	0,1
Boro	mg/L	5
Cadmio	mg/L	0,01
Cianuro WAD	mg/L	0,1
Cobalto	mg/L	1
Cobre	mg/L	0,5
Cromo (+6)	mg/L	1
Hierro	mg/L	1
Litio	mg/L	2,5
Magnesio	mg/L	150
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,2
Plata	mg/L	0,05
NOTA:		
Animales mayores: entiéndase como animales mayores a ovinos, vacunos, porcinos, camélidos y equinos, etc.		
Animales menores: entiéndase como animales menores a coprinos, cuyes, aves y conejos.		
SAAM: sustancias activas de azul de metileno.		

Artículo 7° del decreto legislativo N° 1013 y la ley N° 28'611; resolución ministerial N°011-96-EMV

2.4.2. Metales Pesados

Los metales pesados constituyen un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm^3 . El rasgo distintivo de la fisiología de los metales pesados, es que aun cuando muchos de ellos son esenciales para el crecimiento como el sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), calcio (Ca), vanadio (V), manganeso (Mn), hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), Cu, Zn y molibdeno (Mo), se ha reportado que también tienen efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas. (Branco, 1984)

El concepto de metal pesado puede tener diferentes acepciones:

- Todo metal que tenga densidad superior a 5 g/cm^3 ;
- Todo metal con número atómico superior al del Na ($Z = 11$);
- Todo metal con peso atómico comprendido entre 63,546 y 200,590;
- Todo metal que sea potencialmente tóxico para los sistemas biológicos.

Los metales pesados poseen carácter acumulativo, su concentración no disminuye con el tiempo; son necesarios y beneficiosos para las plantas y otros organismos a determinados niveles, pero también son tóxicos cuando exceden unos niveles de concentración. Están siempre presentes en los suelos a unos niveles de concentración denominados niveles de fondo o "Background", cuyo origen no es externo, sino que proviene del material parental originario de las rocas y su transformación; con frecuencia se encuentran como cationes que interactúan fuertemente con la matriz del suelo, lo que en ocasiones se traduce en que incluso a altas concentraciones pueden encontrarse en forma química no dañina o inerte. Sin embargo estos metales pueden mobilizarse y cambiar de

forma química debido a cambios en las condiciones medio ambientales. Por esta razón se les ha catalogado como bomba de relojería química. (Branco, 1984)

En la Tabla 2.2 se pueden observar los distintos metales pesados que pueden estar presentes en los efluentes generados por las industrias (Rigola Lapeña, 1990) En general, el tipo y concentración de los metales pesados presentes en los residuos líquidos generados por las distintas industrias va a depender del proceso productivo, de la etapa en que se produzcan y de la materia prima utilizada. (Sanchez, 2010)

Tabla 2.2 Metales Pesados Presentes en Efluentes Industriales.

	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Al	Sn	Sb
Refinería de petróleo	X		X	X	X		X		X				
Pulpa y papel			X	X	X	X	X		X				
Textiles	X	X	X	X	X		X	X	X				
Metalúrgicos	X		X		X		X	X	X	X			X
Química orgánica	X		X			X	X	X	X	X	X	X	
Química inorgánica	X		X			X	X	X	X	X	X		
Plásticos	X												
Curtiembres									X				
Mineras		X		X		X	X	X		X			
Drenaje ácido de minas	X	X	X	X							X		
Galvanoplastia		X	X	X	X		X		X				

(Branco, 1984)

2.4.2.1. Grupo de Metales Pesados

Dentro de los metales pesados se distinguen dos grupos:

- **Los Micronutrientes:** necesarios para el desarrollo de la vida de determinados organismos, son requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza y pasado cierto umbral se vuelven

tóxicos. Dentro de este grupo se encuentran As, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Se, V, Zn.

- **Los Metales Pesados no Esenciales:** metales cuya presencia en determinadas cantidades en los seres vivos, provocan disfunciones en sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son principalmente: Be, Cu, Cd, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Ti (Galán et al., 2008).

2.4.2.2. Toxicidad de los Metales Pesados

Las investigaciones de la última década sobre metales pesados muestran que los efectos tóxicos pueden generarse a concentraciones bajas, y que podrían afectar a más población mundial de lo que se había pensado. En las evaluaciones más recientes de los efectos toxicológicos de metales pesados se llegó a la conclusión de que el sistema nervioso en desarrollo del feto y el recién nacido, son los más sensibles, a juzgar por las pruebas aportadas por estudios en seres humanos y animales. Tales efectos pueden aparecer aún a niveles de exposición en que la madre conserva la salud o sufre sólo síntomas menores. (Harris , 2007)

La elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación en los organismos vivos, los convierte en contaminantes prioritarios cuyos efectos tóxicos no se detectan fácilmente a corto plazo, aunque si puede haber una incidencia muy importante a mediano y largo plazo. (Contreras, Ferro Orozco, & Zaritzky, 2014)

2.4.2.3. Remoción de Metales Pesados

En la actualidad existen una serie de procesos que son utilizados en la remoción de metales pesados, entre los que se encuentran la precipitación química, la filtración por medio de membranas, la

reducción electrolítica, la extracción por medio de solventes, el intercambio iónico, y la adsorción.

Algunas de estas tecnologías no son aplicables en todas las situaciones, debido a una serie de inconvenientes tales como: baja eficiencia y aplicabilidad a una amplia gama de contaminantes, generación de residuos, dificultad de encontrar condiciones óptimas de operación cuando se presentan distintos metales pesados en una solución y la necesidad de pre tratamientos. (Universidad de Salamanca, 2014)

2.4.3. El Cromo

El cromo, Cr fue descubierto en 1798 por Vauquelin, que le dio su nombre derivado del griego “croma”, color por la cantidad de colores vivos que dan sus sales. Pertenece a los metales de transición y se halla dentro de la tabla periódica en el bloque d, en el grupo VI A.

El cromo puede presentarse en los estados de oxidación +2 (cromoso), +3 (crómico) y +6 (cromato y dicromato). El estado divalente es básico, el estado trivalente anfótero y el estado hexavalente ácido. Las aplicaciones comerciales fundamentalmente se refieren a compuestos hexavalentes y menos a compuestos de cromo trivalente.

El cromo +6 es fuertemente oxidante y el más tóxico, los dos estados de oxidación más frecuentes en el ambiente, Cr^{+6} y Cr^{+3} son fácilmente ínter convertibles, dependiendo la dirección de esta conversión fundamentalmente del pH del medio, de la presencia de condiciones aeróbicas o anaeróbicas y de la temperatura. (Méndez Pampín, Vidal Sáez, Lorber, & Márquez Romegialli, 2007)

2.4.3.1. Origen del Cromo

En la naturaleza nunca se halla el cromo en estado libre, constituye el 0,030% de la corteza terrestre. El cromo se encuentra combinado principalmente en el compuesto con el nombre de cromita ($\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$), que es un cromo ferroso, y en la crocoita o cromato de plomo (PbCrO_4), sólido de color rojo.

El contenido natural de cromo en suelos superficiales varía ampliamente y depende fuertemente del tipo de roca madre a partir del cual se haya formado. Los suelos arenosos suelen contener relativamente poco cromo. No obstante, existen suelos que de forma natural contienen mucho más cromo, son los llamados suelos serpentinos (poco productivos para la agricultura) (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua - CIDTA, 2014). Las concentraciones de cromo en distintos materiales del medio ambiente se recogen en la tabla 2.3

Tabla 2.3 Concentraciones de Cr en Varias Matrices Medioambientales.

Material	Concentración media	Rango
Corteza continental	125.0	80,0-200,0
Calizas	10.0	<1,0-120,0
Areniscas	35.0	-
Esquistos	120.0	30,0-590,0
Fertilizantes fosfatados	-	30,0-3'000
Suelos	40.0	10,0-150,0
Agua dulce (g/l)	1.0	0,10-6,0
Agua marina (g/l)	0.3	0,2-50,0

(Arriaga, García, & Cid, 2004)

2.4.3.2. Propiedades del Cromo

El cromo metálico es un sólido cristalino gris-azulado parecido al hierro. Es un elemento brillante, que por su densidad elevada ($7,19 \text{ g/cm}^3$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) pertenece al grupo de los metales pesados. Su punto

de fusión es de 1875 °C y de ebullición de 2672 °C (Severiano A., et al 1985). Con su configuración electrónica $3d^54s^1$, pertenece a los metales de transición y se halla dentro de la tabla periódica en el bloque d, en el grupo VIA, con un número atómico 24 (Microsoft[®] Encarta[®], 1993-1998).

En las sales crómicas y en la cromita, el cromo tiene una valencia de 3+. La mayoría de estos compuestos son de color verde, pero algunos son de color rojo o azul. El óxido de cromo (III) (Cr_2O_3) es un sólido verde. En cromatos y dicromatos, el cromo tiene una valencia de 6+. El dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) es un sólido rojo, soluble en agua; el cromato de plomo ($PbCrO_4$) es un sólido insoluble, muy usado como pigmento llamado amarillo de cromo. En el estado de oxidación 3+, el cromo se presenta bajo la forma Cr^{+++} en solución ácida; si el medio es acuoso se presenta de color violeta debido a la existencia de complejo $Cr(H_2O)_6^{+++}$, cuando se adiciona una base al ión crómico acuoso se forma el hidróxido crómico, $Cr(OH)_3$ de color gris. (Secretaria Distrital del Ambiente- Bogotá, 2014)

2.4.3.3. Derivados del Cromo

El Cromo aparece naturalmente en el medio ambiente en su estado de valencia +3 (forma estable), mientras que el Cromo (+6) y el Cromo (0) son producidos generalmente mediante procesos industriales. El cromo metálico, es un sólido metálico gris con un alto punto de fusión, que se usa principalmente en manufacturas de acero y otras aleaciones.

- a) **El cromo (Cr^{+2})** es muy inestable ya que se oxida rápidamente al estado crómico +3 lo que limita el empleo de los compuestos cromosos.
- b) **El cromo trivalente (Cr^{+3})** es estable y forma muchos compuestos con aplicaciones comerciales como; el caso de

la cromita, usado en la fabricación de ladrillos para alta temperatura (refractarios), también como curtiente de pieles, pigmentos y otros.

- c) El cromo hexavalente (Cr^{+6}),** es el de mayor aplicación industrial por sus propiedades ácidas y oxidantes y su capacidad para formar sales muy coloreadas e insolubles. Los compuestos hexavalentes más importantes son; el dicromato sódico y el dicromato potásico y el ácido crómico, a partir del dicromato sódico se fabrican los demás compuestos hexavalentes. Algunas de las aplicaciones de ellas son; cromado, fabricación de pigmentos y colorantes, conservador de maderas. En pequeñas cantidades, en lodos para lubricación de perforaciones, textiles y en máquinas de copiado con toner. También resaltamos que el dicromato de sodio y/o potasio es empleado como reactivo de flotación (agente depresor) en la obtención de concentrados de Cobre y Plomo.

2.4.3.4. Características Generales del Cromo:

El cromo es un metal de transición duro, frágil, gris acerado y brillante. Es muy resistente frente a la corrosión. Su estado de oxidación más alto es el +6, aunque estos compuestos son muy oxidantes. Los estados de oxidación +4 y +5 son poco frecuentes, mientras que los estados más estables son +2 y +3. También es posible obtener compuestos en los que el cromo presente estados de oxidación más bajos, pero son bastante raros. (Copyright © 2014 Universidad Técnica de Machala, 2014).

a) Compuestos de Cromo:

El dicromato de potasio, $K_2Cr_2O_7$, es un oxidante enérgico y se utiliza para limpiar material de vidrio de laboratorio de cualquier resto orgánico que pueda contener.

El "verde de cromo" (es el óxido de cromo (III), Cr_2O_3) es un pigmento que se emplea, por ejemplo, en pinturas esmaltadas y en la coloración de vidrios. El "amarillo de cromo" (es un cromato de plomo, $PbCrO_4$) también se utiliza como pigmento. No se encuentran en la naturaleza ni el ácido crómico ni el dicrómico, pero sus aniones se encuentran en una amplia variedad de compuestos. El trióxido de cromo, CrO_3 , el que sería el anhídrido del ácido crómico, se vende industrialmente como "ácido crómico". (Ecured-C.U., 2014)

b) Papel Biológico:

En principio, se considera al cromo (en su estado de oxidación +3) un elemento esencial, aunque no se conocen con exactitud sus funciones. Parece participar en el metabolismo de los lípidos, en el de los hidratos de carbono, así como otras funciones.

Se ha observado que algunos de sus complejos parecen participar en la potenciación de la acción de la insulina, por lo que se los ha denominado "factor de tolerancia a la glucosa"; debido a esta relación con la acción de la insulina, la ausencia de cromo provoca una intolerancia a la glucosa, y esta ausencia provoca la aparición de diversos problemas.

No se ha encontrado ninguna metaloproteína con actividad biológica que contenga cromo y por lo tanto no se ha podido explicar cómo actúa.

Por otra parte, los compuestos de cromo en el estado de oxidación +6 son muy oxidantes y son carcinógenos. (Ecured-R.U., 2014)

c) Aplicaciones:

Más de la mitad de la producción total de cromo se destina a productos metálicos, y una tercera parte es empleada en refractantes. El cromo está presente en diversos catalizadores importantes. Principalmente se utiliza en la creación de aleaciones de hierro, níquel o cobalto. Al añadir el cromo se consigue aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión de la aleación. En los aceros inoxidable, constituye el 10% de la composición final. Debido a su dureza, la aleación de cromo, cobalto y wolframio se emplea para herramientas de corte rápido de metales. Al depositarse electrolíticamente, el cromo proporciona un acabado brillante y resistente a la corrosión (cromado). Debido a ello se emplea a gran escala en el acabado de vehículos. El amplio uso de la cromita como refractante se debe a su alto punto de fusión, su moderada dilatación térmica y la estabilidad de su estructura cristalina.

Para ello se pueden fijar los siguientes ejemplos de aplicación sobre este metal:

- El cromo se utiliza principalmente en metalurgia para aportar resistencia a la corrosión y un acabado brillante.
- En aleaciones, por ejemplo, el acero inoxidable es aquel que contiene más de un 12% en cromo, aunque las propiedades antioxidantes del cromo empiezan a notarse a partir del 5% de concentración.
- En procesos de cromado (depositar una capa protectora mediante electrodeposición).
- También se utiliza en el anodizado del aluminio.

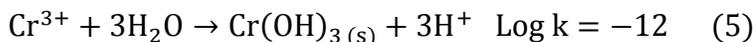
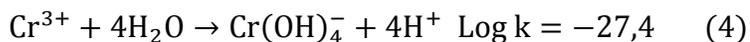
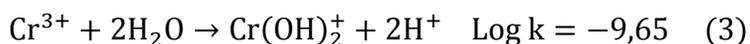
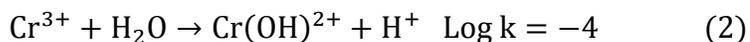
- En pinturas cromadas como tratamiento antioxidante
- En el curtido del cuero es frecuente emplear el denominado "curtido al cromo" en el que se emplea hidroxisulfato de cromo (III) (Cr(OH)(SO₄)). (Copyright © 2014 Universidad Técnica de Machala, 2014)

2.4.3.5. Química del Cromo

La presencia y estado del cromo en el agua natural depende de las posibilidades de la reducción del Cr (VI) y la oxidación del Cr (III) en el agua (*Schroeder DC et al., 1974*). Los iones Cr (VI) están normalmente presentes en forma soluble, mientras que los iones Cr (III) son normalmente adsorbidos por sólidos o acumulados en los sedimentos. El Cr (VI) es rápidamente hidrolizado en agua. Las especies dominantes de Cr (VI) a concentraciones de cromo total bajo 500ppm (0,01mol.dm⁻³) son los oxianiones HCrO₄⁻ y CrO₄²⁻. La reacción de equilibrio entre las dos especies es altamente dependiente del pH:

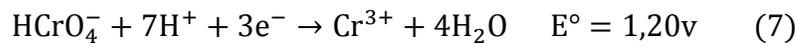
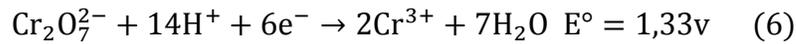


A bajo pH, el HCrO₄⁻ es la especie dominante, mientras que el CrO₄²⁻ predomina a pH muy altos tales como el agua natural. Los iones dicromato Cr₂O₇²⁻, predomina en ambientes ácidos a concentraciones de Cr (VI) mayores a 500ppm. Las especies de Cr (III) dominantes en el agua también dependen del pH, de acuerdo a las siguientes reacciones de equilibrio:



Las especies de Cr (OH)₂⁺ son dominantes a valores de pH entre 6 y 8, mientras que Cr (OH)₂⁺ y Cr³⁺ predominan en condiciones más

ácidas. El $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Cr}(\text{OH})_3(s)$ son más probablemente hallados en aguas alcalinas. El cromo sigue la reacción redox bajo ciertas condiciones (Aylward G. H. et al., 1971):



Las reacciones de reducción requieren iones hidrógeno para conducir la reacción. En el estado de oxidación 3+, el cromo forma una amplia gama de iones complejos en los cuales el ión está rodeado por otras seis especies iónicas o moleculares, estos complejos tienen casi todas formas octaédricas. Algunos complejos importantes del cromo son:



Por ejemplo, las disoluciones de cloruro de cromo (III) cambian lentamente de verde a violeta al producirse una disolución, como consecuencia de un desplazamiento de tipo:

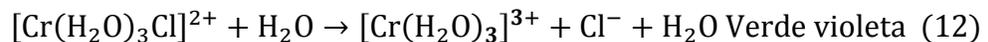
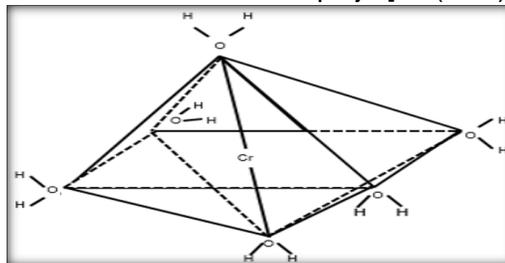


Figura 2.1 Estructura del Complejo $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++}$.

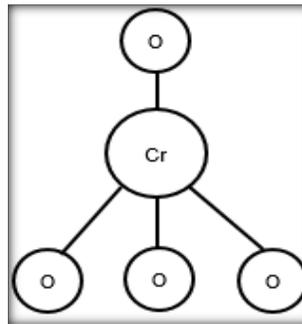


Fuente: Moeller et al., 1961.

En el estado de oxidación 6+, el cromo se presenta bajo la forma $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, ión dicromato de color anaranjado en solución

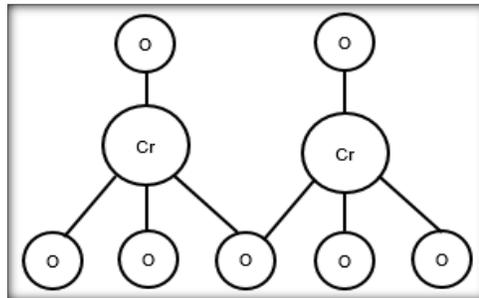
ácida y bajo la forma de cromato CrO_4^{2-} , de color amarillo. Los estudios para determinar la estructura de los iones cromato y dicromato indican que el cromato es tetraédrico, con el ión Cr (VI) en el centro y el ión dicromato es un doble tetraedro con un puente de oxígeno. (Moeller et al., 1961).

Figura 2.2 Estructura del Ión Cromato CrO_4^{2-} .



Fuente: Moeller et al., 1961.

Figura 2.3 Estructura del Ión Dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$.

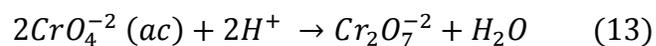


Fuente: Moeller et al., 1961.

2.4.3.6. Comportamiento del Cromo Hexavalente, Cr^{+6}

El cromo Cr^{+6} actúa con la misma valencia cuando se presenta en forma de cromatos o dicromatos, presentando reacciones químicas características que se detallan a continuación:

a) Reacción Ácida.



Esta reacción química representa la variación de los colores característicos que adopta el cromo Cr^{+6} , en función del pH, en

estado básico se presenta como cromato de color amarillo y al disminuir el pH por medio de un modificador ácido toma una coloración anaranjada.

b) Reacción Básica.



En esta reacción el dicromato por acción de un modificador básico incrementa el pH del medio, para transformar el radical de dicromato a cromato adquiriendo la coloración amarilla.

2.4.3.7. Toxicidad del Cromo

Es común que en algunos medios se califique con el adjetivo de peligroso a elementos o sustancias que no siempre revisten ese carácter. En muchos casos, la ignorancia o falta de información llevan a transmitir conclusiones erróneas al respecto. Nada es tóxico o peligroso si se dosifica, manipula, transporta y/o dispone adecuadamente.

2.4.3.8. Efectos Sobre el Medio Ambiente.

El cromo presente en el aire, suelo o agua, resulta de procesos naturales y actividades humanas. Las emisiones del mismo por chimeneas, sólidos y aguas industriales, pueden incrementar su contenido en el medio ambiente. Los compuestos de cromo soluble pueden permanecer por largo tiempo en el agua antes de sedimentar.

La mayor parte del cromo presente en el suelo, es insoluble en agua; sólo pequeñísimas cantidades podrían disolverse, pero el movimiento del mismo, depende fundamentalmente de la forma en que éste sea dispuesto.

2.4.3.9. Relación con el Cuerpo Humano.

Puede entrar al cuerpo humano cuando se respire, coma o tome líquido que lo contenga. El cromo Cr^{+6} entra más fácilmente al cuerpo que el cromo Cr^{+3} , pero rápidamente pasa al estado trivalente (forma estable) por reducción. Todos de una u otra manera incorporamos cromo a nuestro organismo, la mayor parte de éste es eliminado por las heces y prácticamente no entra en la corriente sanguínea; una pequeña cantidad (0,4 - 2,1 %) pasa a través del riñón y es eliminado por la orina en pocos días.

El cromo (+3) presente en los alimentos en forma combinada, previo paso por el estómago e intestinos, pasa a la corriente sanguínea, cumpliendo funciones específicas, puesto que es un nutriente esencial que ayuda al cuerpo en la asimilación del azúcar, proteínas y grasas. La dosis diaria necesaria de cromo (+3), va de 0,05 mg a 0,20 mg, la ausencia de éste, provoca pérdida de peso, retardo en el crecimiento, alteraciones del sistema nervioso y tendencia a la diabetes. Es pública y notoria la promoción televisiva y por distintos medios escritos de productos con contenido de cromo trivalente para lograr una mejor forma física.

Los efectos del cromo (+3) y del cromo (+6). están perfectamente diferenciados por el United States Department of Health & Human Services (USA) quienes indican a modo de ejemplo que respirar aire con niveles de cromo, Cr de $0,002 \text{ mg/m}^3$ en forma continuamente expuesta provocarían perforaciones en el tabique nasal con pérdidas de sangre, úlceras o asma; iguales o mayores niveles de (cromo +3), no causan trastorno alguno. Lo mismo ocurre con la ingestión de (cromo +6), el que provoca trastornos y úlceras estomacales, convulsiones, daños al hígado y riñón; o úlceras en la piel si el contacto es externo.

Toda esta fenomenología se produce debido a que el cromo hexavalente en caso de ser asimilado por humanos busca siempre su forma estable cromo +3 (Cr^{+3}). Estas reacciones que lo llevan de la forma (+6) a (+3) generan el consiguiente perjuicio para la salud por cuanto se producen a nivel intracelular degenerando en tumor ulceroso (cáncer).

La OMS (Organización Mundial de Salud), establece el NMP de cromo hexavalente en el agua potable; 0,05 ppm Cr.

Deben entonces diferenciarse las determinaciones de (Cr^{+3}) y (Cr^{+6}) y no tomarlos como una sola unidad, por cuanto es abismal el grado del efecto producido tanto en la salud humana, como en el medio ambiente de uno u otro estado de valencia; siendo esta diferenciación fundamental a la hora de fijar límites de emisión, volcamiento y disposición para los residuos gaseosos, líquidos y sólidos. Existen valores de límites ocupacionales para el cromo hexavalente.

2.4.3.10. Contaminación por Cromo:

La presencia de cationes de metales pesados en el agua crea problemas serios por sus efectos tóxicos sobre animales, plantas y sobre la salud humana. Como existe una gran variedad de procesos industriales que generan este tipo de contaminación, el control de la presencia de metales pesados en agua es difícil. (Arriaga, García, & Cid, 2004)

El cromo es uno de los metales pesados que más problemas han generado debido a su toxicidad en su estado iónico Cromo III y Cr VI. La contaminación ambiental con cromo se debe principalmente a causas antropogénicas como resultado de ciertas actividades industriales, entre las que podemos citar galvanizados (inhibidores de corrosión), pinturas, tratamiento para la preservación de postes

de madera, tintas, curtiembres, cerámicas, preservadores de telas, en la fabricación de explosivos, etc.

El cromo metálico carece de toxicidad, por ello se usa en gastronomía, utensilios de cocina, en medicina: instrumental de cirugía, etc. En cambio las especies de cromo (VI) y cromo (III) tienen diferentes biodisponibilidad y toxicidad en los seres humanos, y por esta razón, para preservar la salud de la población, se requiere de un estricto control de sus contenidos en el medio ambiente. Tanto es así que, mientras el cromo (III) es esencial para el ser humano puesto que participa en el metabolismo de la glucosa, los efectos tóxicos de los derivados del cromo (VI) están bien comprobados, principalmente se absorbe por vía respiratoria y secundariamente por vía digestiva o cutánea, la inhalación produce, úlceras, dermatitis, etc. (Romero, Pellerano, Acevedo, & Vázquez, 2006)

2.4.4. Proceso de Curtido de Pieles:

El curtido es el proceso mediante el cual se realiza transformación de las pieles animales en cuero, por la reacción de fibras de colágeno de la piel con agentes curtientes, para de esta forma, estabilizar las fibras, mediante la formación de complejos tipo quelatos, con el fin de evitar su descomposición y facilitar su uso. El producto final es empleado como materia prima para la fabricación de productos de calzado, marroquinería, talabartería, tapizados, entre otros.

El procesamiento de pieles puede empezar poco después del sacrificio animal y se encuentran en el Distrito Capital divididas en dos tipos: Pieles saladas y pieles frescas. En muchos casos las pieles son almacenadas por tiempo prolongado y según el tipo de piel utilizado en la industria, estas deben recibir un tratamiento para impedir el desarrollo de microorganismos con la consecuente putrefacción de las mismas.

- i) Pielés saladas: La preservación se realiza inicialmente por inmersión en salmuera. Las pieles se apilan, intercalándolas con una capa de sal. En estas condiciones se pueden guardar por meses previos al proceso de curtación, ya que saladas presentan una fuerte resistencia a los microorganismos.
- ii) Pielés frescas: Cuando el tiempo entre el sacrificio del animal y el procesamiento de las pieles es corto, la curtación se puede iniciar sin ningún pretra-tamiento (Secretaria Distrital del Ambiente-Bogotá, 2014).

Según Vargas (2008), la curtación es por definición una transformación de cualquier piel en cuero, crea una estabilización de la proteína de la piel por el tratamiento de la misma con un agente curtiente, el cual a través de reacciones químicas, produce un reticulación (unión de las cadenas poliméricas), aumentando la rigidez y la temperatura de retracción entre otras propiedades.

El proceso de curtación puede describirse tanto como un fenómeno químico (reacción entre los diversos componentes), como físico (difusión de los mismos hacia el interior de la piel).

La curtación se puede dividir de acuerdo al tipo de curtiente: curtación con productos orgánicos y curtación con productos inorgánicos. Dentro de la curtación con productos orgánicos encontramos a las sales de cromo, las cuales representan el 80% de la producción total de cueros en el mundo, esto debido a las diferentes ventajas que se obtienen, entre las cuales se pueden mencionar: (Vargas Hernández, 2008).

- Muy buen nivel de calidad constante y uniforme
- Producción racional
- Acabado económicamente ventajoso

2.4.4.1. Etapas del Proceso de Curtido:

El proceso de curtido comprende generalmente cuatro etapas: ribera, curtido, recurtido y acabado. En la etapa de ribera la piel es sometida a sucesivas etapas de remojo y lavado que permiten remover impurezas y rehidratar las pieles, que en su gran mayoría son conservadas con sal. Posteriormente, en la operación de pelambre, se agregan al baño sulfuro e hidrógenosulfuro de sodio con el fin de eliminar los pelos de la piel del animal. En la segunda etapa del proceso de curtido, las pieles son convertidas en cueros. Luego de ser liberadas de pelos, grasas y carnes, las pieles son tratadas con reactivos que enlazan las fibras de colágeno para formar un material estable y duradero. Dentro de los agentes de curtido más utilizados actualmente se encuentran las sales de aluminio, taninos naturales y los óxidos o sales de cromo, siendo estos últimos los agentes más utilizados debido a su bajo costo y a la calidad del producto obtenido. En la etapa de recurtido el cuero es nuevamente tratado con agentes de curtido (generalmente taninos y/o sales de cromo) para dar al producto la calidad deseada. Finalmente en la etapa de acabado se realizan las operaciones necesarias para dar al cuero las propiedades de tersura, color, así como otras características deseadas en el producto final.

El proceso de curtido se caracteriza por su baja eficiencia. De acuerdo a distintos balances de materia, sólo alrededor del 50% de la materia prima ingresada al proceso es convertida en producto final. En la siguiente figura se presenta el balance global de materia de proceso de una empresa de curtiembre, tomando como base de cálculo 1 tonelada de piel salada (t_{ps}).

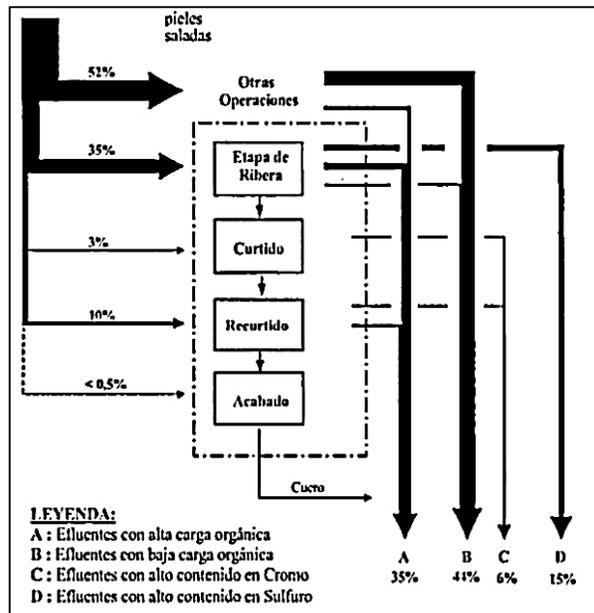
Figura 2.4 Balance de Materia Global del Proceso de Curtiembre



Méndez Pampín, Vidal Sáez, Lorber, & Márquez Romegialli, 2007.

Las aguas residuales de curtiembres se caracterizan por sus altos niveles de carga orgánica, así como también por sus altas concentraciones de sulfuros y cromo. Los efluentes con contenido de sulfuro se generan en la etapa de pelambre, mientras que los efluentes con alto contenido en cromo se generan en la etapa de curtido. Un estudio de las corrientes de salida de las operaciones unitarias del proceso de curtiembre, permite observar que las corrientes con contenidos de sulfuros y cromo corresponden a un 15 % y 6 % de los efluentes totales generados, tal como se puede observar en la siguiente figura. (Méndez Pampín, Vidal Sáez, Lorber, & Márquez Romegialli, 2007).

Figura 2.5 Balance de Materia para las Corrientes Líquidas Participantes en el Proceso de Curtiembre.



Referencia: Méndez Pampín, Vidal Sáez, Lorber, & Márquez Romegialli, 2007.

2.4.4.2. Cromo en la Industria

El cromo y sus compuestos son muy importantes para diversos usos, por ejemplo: es utilizado en la limpieza de metales de procesamiento curtido de cuero, conservación de la madera, la cerámica, la pirotecnia, la electrónica, fabricación de aleaciones metálicas, en la industria química, colorantes, (plaguicidas, el cromado electrolítico o galvanoplastia, el uso de compuestos de cromo mordientes en teñido de telas y otros usos menores como conservación de la madera, fotograbado, fabricación de cerillos, explosivos, linóleo, como colorantes, pigmentos, por lo que es el contaminante más común en una amplia variedad de desechos industriales, es por ello primordial considerar su toxicidad en el medio laboral y en el medio ambiente en general (Morales et al., 2008).

Tabla 2.4 Compuestos de cromo y usos en diferentes procesos en la industria.

Tipo de compuesto	Usos
Ácido crómico	Galvanoplastia
Dicromato sódico	Curtido de pieles
Trifluoruro de cromo y Cloruro crómico	Mordiente para teñidos
Sulfato crómico	Colorantes de gemas sintéticas
Fluoruro de cromo y Dicromato sódico	Tinción de telas
Dicromato de sodio	Mordiente
Acetato de cromo	Estampados textiles
Ión trivalente (Cr^{3+}) Ión hexavalente Cr^{6+} , (CrO_4^{2-})	Colorante de vidrio

Referencia: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/2611/1/T-ESPE-0339.pdf>

Entre los efluentes que causan mayor preocupación están los desagües de galvanoplastia que pueden descargar Cr VI. El curtido de cueros y la industria textil, como también la manufactura de

colorantes y pigmentos, pueden descargar Cr III y Cr VI a los cuerpos de agua (Tinitus, 2010).

2.4.4.3. Maneras de Exposición al Cromo.

Tabla 2.5 Diversas maneras de exposición al cromo

El aire	<p>El cromo se puede liberar al aire desde:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Industrias que usan o manufacturan cromo. ✓ Sitios de desechos peligrosos que contienen cromo. ✓ Humo de cigarrillo. <p>El aire rural o suburbano no generalmente contiene concentraciones de cromo más bajas que el aire urbano.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Menos de 10 mg/m³ en áreas rurales. ✓ 0 a 30 mg/m³ en áreas urbanas como consecuencia de fumar, la concentración de cromo puertas adentro puede ser 10 a 400 veces más alta que al aire libre
El aire del trabajo	<p>Un número alto de trabajadores están potencialmente expuestos al cromo. La probabilidad de exposición más alta ocurre en las industrias metalúrgicas y de curtido, en donde los trabajadores pueden estar expuestos a cantidades altas de cromo en el aire.</p>
El agua y el suelo	<p>Exposición al cromo puede ocurrir:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bebiendo agua que contiene cromo. ✓ Bañándose en agua que contiene cromo.
Los alimentos	<p>La población general tiene mayor probabilidad de exposición a niveles muy bajos de cromo en los alimentos que consumen. Niveles bajos de cromo (III) ocurren naturalmente en una variedad de alimentos tales como frutas, hortalizas, nueces, bebidas y carnes.</p>

Referencia: http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf.

2.4.4.4. Toxicidad del Cromo

Anualmente grandes cantidades de cromo se utilizan en la producción de acero inoxidable, de metales cromados, en la industria del cuero para el curtido de las pieles, etc. La industria papelera especialmente las curtidoras generan miles de toneladas de desechos sólidos, potencialmente tóxicos, debido a su alto contenido de cromo. Respecto a esto la agencia de protección ambiental de EEUU (EPA), advirtió que “el cromo y los sulfuros que utilizan las empresas textiles y de curtiembres, y que estos no saben cómo

eliminar o que son lanzados a la superficie causan severos daños, como la leucemia. Son también cancerígenos de pulmón, cavidad nasal y seno paranasal”. A pesar de los anuncios de organismos como la EPA, la OMS, o la OPS, los tóxicos, en el medio ambiente y en la salud de la población, siguen ocasionando graves pérdidas naturales y humanas (Dra. Papaie Susana, 1999-2002). Por regla general la contaminación por cromo del agua superficial y de los sedimentos no suele repercutir de forma peligrosa en los niveles de cromo en el agua subterránea, debido a la retención de este por las partículas del suelo durante el proceso de infiltración. No obstante, en ocasiones se ha observado contaminación por Cr (VI) en aguas subterráneas, causando problemas en el abastecimiento de agua potable (Poschenrieder Ch et al., 1986).

Los compuestos de cromo trivalente no son nocivos, los de cromo hexavalente, como los cromatos y dicromatos, ocasionan erupciones cutáneas; cuando contaminan el aire en forma de polvo o aspersion, con el tiempo pueden llegar a ocasionar ciertos efectos mostrados en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6 Efectos del Cromo en la Salud

Vías respiratorias	El problema de salud más común que ocurre en trabajadores expuestos al cromo involucra a las vías respiratorias. Estos efectos incluyen irritación del revestimiento del interior de la nariz, secreción nasal, y problemas para respirar (asma, tos, falta de aliento, respiración jadeante). Los trabajadores también han desarrollado alergias a compuestos de cromo, lo que puede producir dificultad para respirar y salpullido en la piel. Las concentraciones de cromo en el aire que pueden producir estos efectos pueden ser diferentes para los diferentes tipos de compuestos de cromo. Así, estos efectos ocurren con concentraciones de cromo (VI) mucho más bajas que de cromo (III). Sin embargo, las concentraciones que causan problemas respiratorios en trabajadores son por lo menos 60 veces más altas que los niveles que se encuentran
---------------------------	---

	normalmente en el ambiente. En animales expuestos a cromo en el aire se han observado problemas de las vías respiratorias similares a los observados en trabajadores.
El estómago e intestino delgado	En animales, la ingestión de cromo (VI) principalmente afecta al estómago e intestino delgado (irritación y úlceras) y a la sangre (anemia). Los compuestos de cromo (III) son mucho menos tóxicos y aparecen no causar estos problemas.
El sistema reproductivo del macho	En animales de laboratorio machos expuestos al cromo (VI) también se han observado daño de los espermatozoides y del sistema reproductivo.
Cáncer	La agencia internacional para la investigación del cáncer (IARC) ha determinado que los compuestos de cromo (VI) son carcinogénicos en seres humanos. El un décimo Informe sobre sustancias carcinogénicas del Programa Nacional de Toxicología clasifica a los compuestos de cromo (VI) como sustancias reconocidas como carcinogénicas en seres humanos. En trabajadores, la inhalación de cromo (VI) ha causado cáncer del pulmón. Los estudios de poblaciones que viven en áreas con niveles altos de cromo (VI) han dado resultados mixtos. En animales de laboratorio, los compuestos de cromo (VI) han producido tumores del estómago, los intestinos y el pulmón.

Referencia: http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf.

2.4.4.5. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

a) Tratamiento Químico.

El tratamiento químico forma parte del proceso de tratamiento de aguas residuales y se usa en la mayor parte de las plantas para aumentar la calidad del efluente y garantizar que exista un medio con unas condiciones óptimas para la actividad bacteriana.

La selección de los métodos de tratamiento químico a utilizar depende de las características que deba tener el efluente; habitualmente se incluye una fase de precipitación química que permite eliminar el fósforo y regular el pH (Grundfos X, 2014).

b) Precipitación Química.

Por precipitación química se entiende la formación, por acción de los reactivos apropiados, de compuestos insolubles de los

elementos indeseables contenidos en un agua, aplicando las leyes de oxidación-reducción.

Los procesos que se emplean más corrientemente en tratamiento de aguas son, en el primer caso, el de la precipitación cristalina de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} y, en el segundo caso, la precipitación de hidróxidos metálicos. (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua - CIDTA, 2014).

La precipitación química de un metal en solución mediante un reactivo adecuado está determinado principalmente por los siguientes factores:

- La cinética del proceso
- La composición del efluente
- El flujo de efluente a tratar

La cinética del proceso de precipitación química a su vez depende de variables como la concentración, temperatura. Además de las condiciones del proceso como la dosificación del reactivo precipitante y la agitación del sistema para lograr reacción uniforme en toda la masa reaccionante.

La cinética del proceso permite deducir el tiempo de residencia necesario para que un volumen de efluente igual al volumen del recipiente reaccione a producto hasta una determinada fracción convertida.

La composición del efluente influye en el proceso debido a que diferentes metales disueltos necesitaran diferente concentración de reactivo precipitante conforme a su producto de solubilidad haciendo que no todos precipiten uniformemente.

El flujo del efluente es un dato para el diseño del equipo necesario en un determinado sistema de precipitación química, el otro dato es el tiempo de residencia que se obtiene de la cinética del proceso.

Pero la precipitación química puede ser un proceso eficiente hasta ciertos valores de la concentración remanente y para seguir precipitando se necesitaría de otra etapa de precipitación con lo que se incrementan los costos y el tiempo de procesamiento, se plantea entonces una operación de adsorción para la solución remanente que permita lograr el objetivo propuesto (Puente Santibáñez, 2002).

En conclusión, la precipitación química consiste en añadir ciertos productos químicos al agua residual para conseguir que éstos alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación.

La precipitación química puede ser el principal y único método de depuración de aguas residuales industriales; en otros lados puede ayudar a la operación de sedimentación cuando exista una gran concentración de sólidos disueltos y en suspensión, y se pueda utilizar como un tratamiento anterior a un proceso biológico.

Mediante la precipitación química puede obtenerse un agua casi exenta de sólidos en suspensión y en estado coloidal. En general se elimina del 80 al 90 % de la materia total en suspensión, del 40 al 70% de la DBO, del 30 al 60 % de DCO y del 80 al 90% de bacterias. Tiene especial interés la eliminación de fósforo y de sustancias orgánicas disueltas.

El uso de la precipitación química presenta dos problemas fundamentales frente a otros procedimientos de depuración.

- El volumen de fangos obtenidos es más elevado que mediante los procesos biológicos, y la precipitación de algunos metales pesados que se puedan encontrar disueltos en las aguas residuales producirá problemas en

la estabilización de fangos mediante procedimientos de digestión anaerobia.

- Al utilizar reactivos químicos aumentará la concentración de los componentes de dichos reactivos en las aguas residuales tratadas, lo cual puede ser un grave inconveniente si estas aguas (mayoritariamente en procesos industriales) quieren ser reutilizadas.

Los productos químicos más utilizados como agentes precipitantes son: sulfato de aluminio hidratado, sulfato ferroso hidratado y sales félicas (cloruro y sulfato) (Sans Fonfria & de Pablo Ribas, 1989).

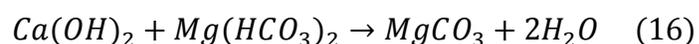
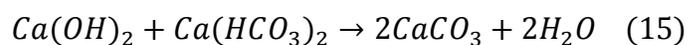
c) La cal.

El tratamiento de precipitación más utilizado es el de la descarbonatación con cal. Su misión es la de eliminar la dureza bicarbonatada de un agua.

Se recuerda que, en los análisis relativos a este tipo de agua, la dureza se expresa por el grado hidrotimétrico (en grados franceses TH), suma de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} , y el contenido de bicarbonatos por el grado alcalimétrico completo (en grados franceses TAC). La dureza no carbonatada se expresa entonces por: TH-TAC

El tratamiento de descarbonatación con cal únicamente conduce, por lo tanto, a una eliminación parcial de la suma de los iones de calcio y magnesio, puesto que no ejerce acción alguna sobre la dureza permanente.

- Reacciones básicas. Las reacciones químicas de descarbonatación son las siguientes:



Teniendo en cuenta que el carbonato magnésico es relativamente soluble, un exceso de cal conducirá a la reacción:



Si las dosis de reactivos se ajustan exactamente, se reduce la alcalinidad del agua a la solubilidad teórica del sistema $CaCO_3 + Mg(OH)_2$, que está comprendida entre 2° y 3° franceses, en las condiciones habituales de concentración y temperatura. Este valor límite, sin embargo, puede encontrarse incrementado, en la práctica, por la presencia de impurezas orgánicas.

Por otra parte, si el agua bruta contiene bicarbonato sódico ($TAC > TH$), se mantendrá en el agua, además del valor indicado, una alcalinidad suplementaria en forma de carbonato sódico o sosa cáustica, correspondiente al valor $TAC - TH$.

- Mecanismo de la precipitación: Para apreciar mejor el interés que ofrecen los distintos sistemas de decarbonatación con cal, es necesario tener en cuenta el mecanismo de la precipitación del carbonato cálcico y el hidróxido magnésico.

La reacción de la cal sobre un agua bruta es extraordinariamente lenta en ausencia de gérmenes de cristalización. En los decantadores estáticos utilizados antiguamente, se necesitaban varios días para llegar al equilibrio químico. En decantadores de marcha continua sin dispositivos de contacto de fangos, que actualmente casi no se utilizan, el tiempo de reacción es de varias horas.

Por el contrario, cuando el agua y la cal se ponen en contacto con una masa suficiente de cristales de $CaCO_3$ ya precipitados, la reacción alcanza su punto de equilibrio en unos minutos. Como la precipitación se efectúa sobre los cristales, éstos tienden a aumentar su volumen: la velocidad de sedimentación, que debe

cumplir la ley de Stokes, aumenta, y pueden reducirse las dimensiones de los aparatos.

Esto sólo es válido si la superficie de los cristales de CaCO_3 se encuentra suficientemente limpia. La presencia de coloides orgánicos puede impedir la cristalización, y por ello se añaden normalmente al agua bruta que se va a descarbonatar, reactivos coagulantes, como son el cloruro férrico, el sulfato de aluminio o el policloruro de aluminio, con el fin de eliminar estos coloides.

Por último, conviene insistir sobre el hecho de que el CaCO_3 si se encuentra solo, tiene tendencia a formar agrupaciones de cristales muy duras y muy voluminosas, que sedimentan a gran velocidad, mientras que el hidróxido magnésico, si se encuentra solo, se presenta siempre en forma de flóculos muy ligeros de Mg(OH)_2 . Si la proporción de hidróxido magnésico es pequeña, se ocluye dentro del precipitado cálcico, pero si su proporción es considerable, no pueden obtenerse precipitados densos, y la velocidad de sedimentación admisible es mucho menor.

En la elección de un aparato de descarbonatación, debe tenerse en cuenta, sobre todo, su adecuación para realizar una mezcla homogénea del agua bruta, el reactivo, y los gérmenes de CaCO_3 , en una zona de reacción convenientemente dimensionada, seguida de una zona de decantación, cuya superficie depende de las condiciones de formación del precipitado y especialmente del contenido de materias orgánicas coloidales y de sales de magnesio.

Hay que advertir que, si se desea un agua descarbonatada perfectamente limpia, debe completarse siempre la descarbonatación con una filtración (Universidad de Salamanca, 2014).

d) La soda caustica.

La eliminación de los iones de calcio y magnesio por precipitación con sosa cáustica es una variante del proceso de tratamiento conjunto, mediante cal y carbonato sódico.

La reacción básica es la siguiente:



La precipitación del carbonato cálcico va unida a la formación de carbonato sódico, el cual reaccionará sobre la dureza permanente. Mediante el empleo de sosa cáustica puede reducirse, por lo tanto, la dureza de un agua hasta un valor igual a dos veces la disminución del contenido de bicarbonatos alcalinotérreos. El TAC del agua únicamente podrá reducirse hasta un valor próximo a 3° franceses, en tanto que existan suficientes iones de calcio para combinarse con el carbonato sódico formado (Universidad de Salamanca, 2014)

2.4.5. Ensayo de Jarras

La prueba de jarras es la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros para tratamientos de agua. En ella se trata de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio.

Existe en el mercado una gran variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en toda su versatilidad debe radicar en utilizar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (r.p.m) En este proceso influyen factores químicos e hidráulicos. Entre éstos tenemos:

- pH
- Temperatura
- Concentración de coagulante
- Secuencia de aplicación de las sustancias químicas
- Grado de agitación

- Tiempo de sedimentación

El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación- floculación, es así como una parte de la carga de las partículas coloidales que han absorbido iones OH^- , queda destruida por un aumento de la concentración de iones H_3O^+ que ocasiona una disminución de la estabilidad de la suspensión coloidal. Preferiblemente el pH debe quedar dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante usado.

La temperatura del agua también influye grandemente en la efectividad de la coagulación y en la velocidad de formación del flóculo. Según disminuye la temperatura del agua debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, con el objetivo de lograr o asegurar la formación de flóculos adecuados.

El tiempo de mezclado del coagulante en el agua a tratar será el necesario para que el producto utilizado se difunda con la mayor rapidez posible. El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve, menos de un segundo y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar.

El ensayo de jarras ha sido ampliamente usado; sus resultados tienen gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de las unidades de tratamiento, así como en la optimización de plantas existentes. El procedimiento requiere como datos previos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua contaminada.

La unidad de mezcla típica consiste en una serie de agitadores de paletas acoplados mecánicamente para operar a la misma velocidad, generalmente entre 10 a 300 RPM. Como jarras de coagulación se recomienda, jarras rectangulares de 1 a 2 litros en acrílico transparente.

2.4.5.1. Aspectos Técnicos de la Prueba

Hay varios aspectos que deben tomarse en consideración antes de realizar una prueba de jarras.

- Equipo
- Reactivos (coagulantes)
- Gradientes de floculación (mecánica hidráulica)

a) Equipo:

- Aparato agitador para prueba de jarras
- Vasos de precipitación o beakers, capacidad 1000 ml ó 2000 ml
- Deflectores
- Vasos de precipitación o beakers, capacidad 100 ml
- Recolector de muestra (después de la prueba)
- Almacenador y preparador de muestra

b) Reactivo

Solución estándar de coagulante, preferentemente el utilizado en el tratamiento. Pueden utilizarse concentraciones del 1%, 2%, 5%, 10%, 15%, 20% respectivamente. Para mayor eficiencia se puede determinar la concentración óptima de coagulante.

c) Gradiente de floculación

Aspecto de importancia vital en lo concerniente a la prueba de jarras, ya que dependiendo de las condiciones o la mecánica hidráulica del diseño del tratamiento así se realizará la prueba en el laboratorio.

2.4.5.2. Condiciones de la Prueba de Jarras

Debido a que la prueba de jarras es sólo una simulación del proceso, es necesario mantener las condiciones operacionales que existen en el proceso industrial como son: gradiente hidráulico y tiempo en la

mezcla lenta y rápida, punto de aplicación de los reactivos, el orden y el tiempo de dosificación de los mismos.

a) Mezcla rápida

El objetivo de la mezcla rápida es crear la turbulencia o movimiento necesario en el líquido contenido en la jarra para poner en contacto los reactivos químicos con las partículas coloidales del agua, modo de neutralizar sus cargas, desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto período de tiempo. El tiempo de aplicación de la mezcla rápida depende de la clase del coagulante.

b) Mezcla lenta

Generalmente, el tiempo de mezcla no excede de 15 min. Un tiempo excesivo puede crear calentamiento de la muestra originando una floculación más eficiente, pero a su vez una pobre sedimentación, ya que ocurre la liberación de los gases disueltos en el agua, formando burbujas que se adhieren a los flóculos y los hacen flotar.

c) Reposo (Sedimentación).

Durante este tiempo los coloides sedimentan por gravedad y se obtiene el agua clarificada.

CAPÍTULO III

3. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

3.1. Metodología

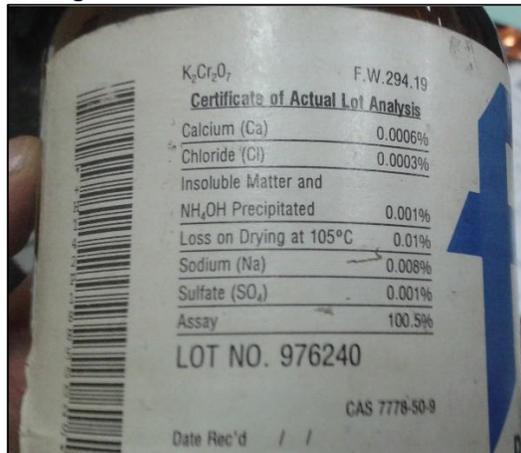
La parte experimental se realizó en los laboratorios de la Universidad Alas Peruanas y la Universidad Nacional del Centro del Perú, en la Facultad de Ingeniería Química y los análisis respectivos se analizaron en el laboratorio de aguas de la Facultad de Ingeniería Química.

La muestra sintética fue elaborada a partir del dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ realizando las disoluciones respectivas para encontrar las concentraciones a las que se trabajaron en la parte experimental con los floculantes de $BaCl_2$ y $Ca(OH)_2$.

3.1.1. Preparación de Muestra Patrón

Se pesó aproximadamente 2 g de dicromato de potasio y se llevó al horno a una temperatura de $105^\circ C$ por 1 h dejándolo enfriar en el desecador.

Figura 3.1 Dicromato de Potasio



Referencia propia

Se pesó aproximadamente y con precisión 141,4 mg de dicromato de potasio, para disolver con agua y aforando a 100 mL.

Se conoce que 1 mL de esta disolución es equivalente a 500,0 µg de Cr (VI). Quiere decir que la concentración es de 500 mg/L de Cr(VI), para determinar la concentración inicial en la muestra se utiliza la ecuación 18

$$C_i * V_i = C_f * V_f \quad (19)$$

Se preparó una solución con una concentración de 15 ppm de Cr(VI) en un litro a partir de Dicromato de potasio

$$\frac{500\text{mg}}{L} * V_i = \frac{15\text{mg}}{L} * 1L$$

$$V_i = \left(\frac{15}{500}\right)L$$

$$V_i = 0,03L = 30\text{mL de Dicromato de potasio}$$

3.1.2. Determinación de Cromo VI en Aguas para Curva de Calibración

3.1.2.1. Patrones

Se prepararon patrones para la determinación de Cr (VI) en aguas siendo los siguientes:

a) **Disolución de Difenilcarbazona (5 mg/mL):**

Se pesó aproximadamente y con precisión 250 mg de difenilcarbazona y disolvió en 50 mL de acetona. Almacenado en frascos de color ámbar con tapa con recubierta de teflón; esta disolución es transparente al momento de prepararla, después toma un color amarillo claro. Se descarta la disolución cuando comience a decolorarse, debe conservarse en refrigeración.

Figura 3.2 Solución de Difenilcarbazona



Referencia propia

b) **Disolución Madre de Cromo (500 mg/L):**

Se secaron aproximadamente 2 g de dicromato de potasio, en horno a 105°C por 1 h luego se enfrió en el desecador. Se pesó

aproximadamente, con precisión 141,4 mg de dicromato de potasio, disolvió con agua y aforando a 100 mL, 1 mL de esta disolución es equivalente a 500,0 µg de Cr (VI).

c) Disolución estándar de Cr (VI) 5 mg/L:

Se adicionó una alícuota de 1 mL de la disolución madre de cromo VI a un matraz volumétrico de 100 mL y aforar con agua. 1 mL de esta disolución equivale a 5,0 µg de Cr (VI).

d) Disolución de ácido sulfúrico 0,2 N:

Se agregó 5,6 mL de ácido sulfúrico concentrado a un matraz que contenga 500 mL de agua, mezcle y deje enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente diluyó con agua a 1 L.

3.1.2.2. Determinación de Curva de Calibración

Se debe contar con un registro de verificación de la calibración de los equipos y materiales siguientes:

- Material volumétrico
- Balanza analítica
- Espectrofotómetro. Se calibró el equipo de acuerdo a las instrucciones específicas del fabricante.

a) Curva de Calibración

Se midieron volúmenes de disolución estándar de Cr (VI) 5,0 µg/mL aproximadamente entre 2,0 mL y 20,0 mL. De esta disolución con un mínimo de 5 disoluciones para obtener estándares en el intervalo de 10 µg a 100 µg de Cr (VI), en matraces aforados de 100 mL, después transferirlos a matraces Erlenmeyer de 250 mL; agregar ácido sulfúrico 0,2 N hasta pH de $1,0 \pm 0,3$

Figura 3.3 Soluciones Estándares Disueltos



Referencia propia

Se añadieron 2 mL de disolución de difenilcarbazida, mezclar y dejó reposar 10 min para desarrollar el color completamente.

Se transfirió una alícuota de cada estándar a la celda de absorción de 1 cm y midió su absorbancia a 540 nm.

Se medirán las disoluciones de calibración comenzando con la de menor concentración.

Figura 3.4 Estándares en las Celdas del Espectrofotómetro



Referencia propia

Se construyó una curva de calibración, graficando la absorbancia leída contra los μg de Cr (VI), evaluar la calidad de la curva obtenida obteniendo la Figura 3.8.

NOTA.- Para compensar las posibles pérdidas de Cr (VI) durante las operaciones analíticas se debe seguir el mismo procedimiento a las disoluciones estándar de Cr (VI) que el que se realiza a la muestra.

b) Procedimiento

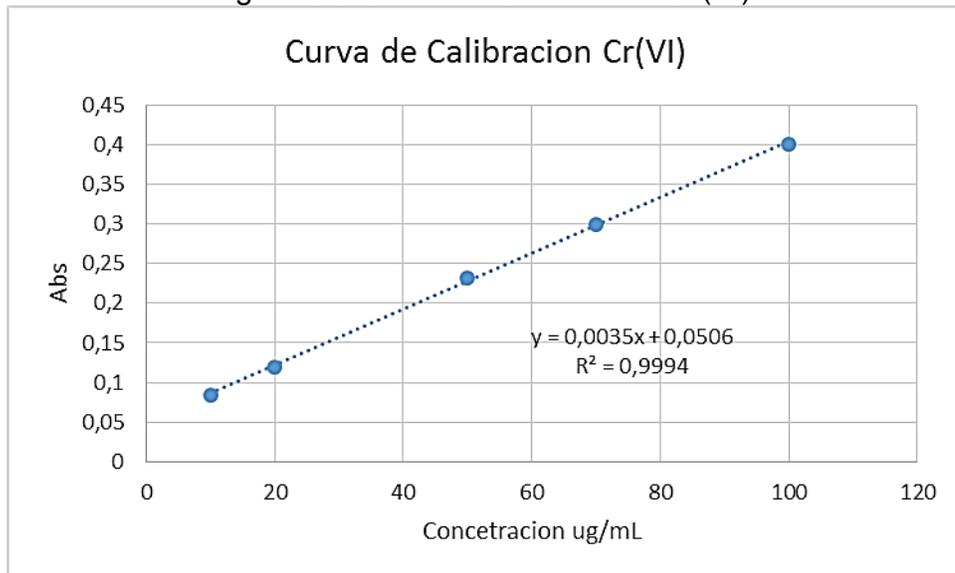
La alícuota necesaria para realizar el análisis de la muestra debe estar lo más clara posible, por lo que antes de empezar el método debe filtrarse a través de un papel filtro de poro fino. La alícuota para muestras muy claras debe ser de 100 mL.

Figura 3.5 Análisis en el Espectrofotómetro



Referencia propia

Figura 3.6 Curva de Calibración Cr(VI)



c) Cálculos

Calcular la concentración de la muestra en $\mu\text{g Cr (VI)}$ a partir de la ecuación de la recta representada por la siguiente ecuación:

$$Y = mX + b \quad (20)$$

Donde:

m =pendiente;

b=ordenada al origen;

Y=absorbancia, y

X=son los $\mu\text{g/mL Cr (VI)}$.

Remplazando en la ecuación 19 los resultados de la Figura 3.8

Se obtiene:

$$\text{Abs} = 0,0035 \cdot \text{Conc} + 0,0506 \quad (21)$$

Despejando la concentración de la ecuación 19 se obtiene:

$$\text{Conc} = 285,71 \cdot \text{Abs} - 14,4571$$

Considerando el empleo de los 102 mL de volumen final para la realización de los cálculos, ya que si el volumen de la muestra está en 100 mL y posteriormente se realizó la adición de los 2 mL de

difenilcarazida el cuál no provocó ningún factor de dilución. Lo anterior siempre y cuando tanto los estándares de la curva de calibración y las muestras sean procesadas de la misma forma. Los resultados se reportaron en mg Cr/L, con la precisión correspondiente.

3.1.2.3. Tratamiento de la Muestra

a) Desarrollo de Color:

Se ajustó el pH a 1 con ácido sulfúrico 0,2 N, tomando una alícuota de 100 mL o una alícuota conveniente de acuerdo al contenido de Cr (VI) en la muestra y aforar con agua a 100 mL, si la muestra esta turbia, tomar una lectura de absorbancia previa a la adición del reactivo de difenilcarbazida, restar la absorbancia medida previamente al valor de la lectura final.

Se añadió 2 mL de disolución de difenilcarbazida, mezclar y dejar reposar 10 min para desarrollar el color completamente, ajustando el espectrofotómetro con el blanco de reactivos a cero de absorbancia, medir la absorbancia a 540 nm en una celda de cuarzo de 1 cm de las muestras y estándares.

Registrar las lecturas de las absorbancias. Determinar los μg de Cr (VI) presentes en la muestra directamente de la curva de calibración.

3.1.3. Pruebas Experimentales

El trabajo se realizó utilizando un equipo de pruebas jarras de cuatro vasos, puestos programable hasta tres ciclos de velocidad en un determinado tiempo de marca LOVIBOND, Equipo digital automático de fácil programación, altura libre de 28 cm para vaso de prueba de hasta 2 litros, línea de voltaje: 120V-AC, fusible de 1,5^a, velocidad variable de 20-350/400 RPM y hasta tres ciclos

continuos, lámpara fluorescente de 60W/120V (interruptor independiente).

El cual permitirá controlar las variables independientes en la remoción del cromo VI mediante el uso de dos tipos de reactivos químicos.

Se inició con la preparación de disoluciones líquidas compuestas por agua destilada y dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$, se preparó un volumen de 7,2 L de solución de cromo (VI) de 15 mg/L, y se procedió con la metodología siguiente:

El tratamiento experimental en el cual se dividieron las muestras en grupos, tal como se muestra en el diseño experimental ($3^2 = 9$, tres niveles, dos variables independientes) variando en este caso la cantidad del agente precipitante y el tiempo de retención hidráulica.

Tabla 3.1 Primer Tratamiento

Muestra	Concentración	Dosificación	Tiempo de Mezcla
200 mL	15 mg/L de Cr(VI)	0,36 g de $BaCl_2$	15 min.
			30 min.
			45 min.
200 mL	15 mg/L de Cr(VI)	0,36 g de $Ca(OH)_2$	15 min.
			30 min.
			45 min.

Tabla 3.2 Segundo Tratamiento

Muestra	Concentración	Dosificación	Tiempo de Mezcla
200 mL	15 mg/L de Cr(VI)	0,60 g de $BaCl_2$	15 min.
			30 min.
			45 min.
200 mL	15 mg/L de Cr(VI)	0,60 g de $Ca(OH)_2$	15 min.
			30 min.
			45 min.

Tabla 3.3 Tercer Tratamiento

Muestra	Concentración	Dosificación	Tiempo de Mezcla
200 mL	15 mg/L de Cr(VI)	1,15 g de BaCl ₂	15 min.
			30 min.
			45 min.
200 mL	15 mg/L de Cr(VI)	1,15 g de Ca(OH) ₂	15 min.
			30 min.
			45 min.

Estos tratamientos se realizaron con una repetición para tener mayor precisión, lo cual nos permitirá una mejor discusión de resultados.

Terminada esta fase se procedió a la respectiva recolección de datos referido a la concentración de Cr (VI) en el agua, la cual se determinará mediante técnica de espectrofotometría UV-VIS con Difenilcarbazida; además se determinará la cantidad y el tiempo óptimo de retención hidráulica para un mejor porcentaje de remoción de cromo VI por precipitación química.

3.1.4. Tipo de la Investigación

El tipo de investigación que se utilizó es la investigación experimental, para analizar el efecto producido por la acción o manipuleo de las variables independientes (cantidad de reactivo químico, y tiempo de retención hidráulica) sobre la variable dependiente (concentración de cromo VI).

3.1.5. Nivel de la Investigación

De acuerdo a la naturaleza de la investigación reúne por su nivel las características de un estudio correlacional, donde se tiene por finalidad explicar el comportamiento de las variables independientes (cantidad de reactivo químico y tiempo),

encontrando relación causa – efecto. Donde se requiere un control metodológico y estadístico.

3.2. Diseño de la Investigación.

Para la investigación se utilizó un diseño experimental del tipo factorial ($3^2 = 9$ por dos agentes precipitantes nos da un total de 18 experimentos; donde existen 2 factores o variables independientes y 3 niveles de los factores), en el cual se estimarán los efectos de 2 factores experimentales que son la cantidad del agente precipitante y el tiempo de retención hidráulica sobre la variable dependiente (concentración de Cr VI).

Como se muestra en el diseño se tendrá 9 experimentos por cada tipo de agente precipitante, los mismos que tendrán 1 repetición. Por lo que se tendrá un total de 36 experimentos.

Tabla 3.4 Diseño de la Investigación

PRUEBAS/VARIABLES	X1= Cantidad de agente precipitante			X2= Tiempo de retención hidráulica		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
1	1	0	0	1	0	0
2	0	1	0	1	0	0
3	0	0	1	1	0	0
4	1	0	0	0	1	0
5	0	1	0	0	1	0
6	0	0	1	0	1	0
7	1	0	0	0	0	1
8	0	1	0	0	0	1
9	0	0	1	0	0	1

Referencia: Elaboración propia.

Tabla 3.5 Diseño Factorial Codificada y Real

PRUEBA	CODIFICADO		REAL	
	X1	X2	Cantidad de agente precipitante (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)
1	-1	-1	0,36	15
2	0	-1	0,60	15
3	+1	-1	1,15	15
4	-1	0	0,36	30
5	0	0	0,60	30
6	+1	0	1,15	30
7	-1	+1	0,36	45
8	0	+1	0,60	45
9	+1	+1	1,15	45

Referencia: Elaboración propia.

3.3. Hipótesis de la Investigación

3.3.1. Hipótesis General

Con la aplicación del proceso de precipitación química y la variación de la dosificación del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y del BaCl_2 en determinados tiempos de retención hidráulica se removerá significativamente el $\text{Cr}(\text{VI})$ en disolución acuosa de dicromato de potasio.

3.3.2. Hipótesis Específicas

- La remoción de cromo VI es mayor del 50% al aplicar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio.

- La remoción de cromo VI es mayor del 50% al aplicar BaCl₂ como agente precipitante en disolución acuosa de dicromato de potasio.
- El agente precipitante de mayor % es el BaCl₂ en la remoción de cromo VI en un proceso de precipitación química.
- La relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) es lineal en un proceso de precipitación química con BaCl₂
- La relación del tiempo de agitación y la remoción del Cr (VI) es lineal en un proceso de precipitación química con Ca (OH)₂

3.4. Variables

3.4.1. Variable Independiente

- Cantidad de agente precipitante o dosificación (g)
- Tiempo de Retención Hidráulica (min)

3.4.2. Variable Dependiente

- Concentración del cromo VI (ppm)

3.5. Cobertura del Estudio.

3.5.1. Universo.

Agua contaminada con Cromo (VI) de los efluentes de la industria de la curtiembre.

3.5.2. Población.

Con un tamaño de muestra aproximado (Nº) de 7,2 litros, valor de significancia ($Z\alpha$) del 0,5367, y un error de la tolerancia de investigación o precisión del 10 % y un nivel de confianza del 85,27 %, se define que la población es infinita.

3.5.3. Muestra.

La conforma la disolución acuosa preparada a partir de dicromato de potasio anhidro K₂Cr₂O₇ con agua destilada, en

un volumen de 200 mL a la concentración de 15mg/L de Cr(VI) para cada uno de los experimentos.

3.5.4. Muestreo.

No se realizó el muestreo se preparó la muestra a la concentración de 15 mg/L de concentración de Cr(VI).

3.6. Técnicas e Instrumentos

3.6.1. Técnicas de la Investigación.

Observación de procesos experimentales según la manipulación de las variables, trabajos de investigación realizados con características semejantes, libros de investigación.

3.6.2. Instrumentos de la Investigación.

Los instrumentos de investigación son los reportes de los procesos experimentados por el laboratorio correspondiente, los resúmenes de los trabajos de investigación, los reportes de campo.

3.7. Procesamiento Estadístico de la Información.

3.7.1. Estadísticos.

Se utilizó un software estadístico denominado Minitab, para los análisis de medidas de dispersión, correlación de Pearson.

3.7.2. Representación.

Las representaciones de la parte experimental se dieron por medio de reportes de laboratorios y gráficas, las relaciones de variables mediante ecuaciones y los análisis estadísticos según el software estadístico desarrollado.

3.7.3. Técnica de Comprobación de la Hipótesis.

Para el trabajo de investigación se utilizó el Análisis de varianza mediante una Anova de Fisher.

CAPITULO IV

4. ORGANIZACIÓN, PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados.

4.1.1. Concentración de Cromo (VI) Después del Tratamiento

Utilizando la prueba de jarra para las pruebas experimentales con las dosificaciones según referencia (Soto Regalado, Lozano Ramírez, Barbarín Castillo, & Alcalá Rodríguez, 2004), se obtuvieron los resultados correspondientes.

Tabla 4.1 Resultados de Análisis de Cr(VI) con BaCl₂

BaCl ₂ (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)	Cr _o (VI) ppm	Cr _f (VI) ppm	pH	Cr _f (VI) - Repetición ppm	pH - Repetición
0,36	15	15	6,13	2,47	6,16	2,46
0,36	30	15	2,15	2,45	2,16	2,47
0,36	45	15	1,98	2,55	1,96	2,58
0,6	15	15	2,47	2,49	2,46	2,48
0,6	30	15	1,49	2,67	1,47	2,67
0,6	45	15	1,51	2,63	1,51	2,61
1,15	15	15	0,84	2,61	0,83	2,59
1,15	30	15	0,53	2,82	0,52	2,79
1,15	45	15	0,97	2,63	0,96	2,63

Tabla 4.2 Resultados de Análisis de Cr(VI) con Ca(OH)₂

Ca(OH) ₂ (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)	Cr _o (VI) ppm	Cr _f (VI) ppm	pH	Cr _f (VI) - Repetición ppm	pH - Repetición
0,36	15	15	7,89	8,88	7,99	8,86
0,36	30	15	4,14	8,92	4,15	8,92
0,36	45	15	4,25	8,51	4,29	8,53
0,6	15	15	4,15	8,79	4,13	8,8
0,6	30	15	2,11	8,99	2,13	8,96
0,6	45	15	2,54	8,96	2,61	8,92
1,15	15	15	1,89	8,73	1,86	8,72
1,15	30	15	1,25	8,83	1,24	8,85
1,15	45	15	1,46	8,79	1,48	8,74

El trabajo de investigación utilizó dos floculantes que son el BaCl₂ y el Ca(OH)₂ variando en peso para los diferentes tratamientos, las condiciones de pH fueron constante para la remoción del cromo hexavalente de las muestras de agua contaminada. Cada prueba experimental cuenta con su respectiva replica obteniendo los resultados siguientes de concentraciones de cromo hexavalente en las tablas 4.3 y tabla 4.4, según el diseño experimental desarrollado.

Tabla 4.3 Resultados de Remoción de Cr(VI) con BaCl₂

BaCl ₂ (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)	Cr _o (VI) ppm	Cr _f (VI) ppm	Cr _f (VI) - R ppm
0,36	15	15	6,13	6,16
0,36	30	15	2,15	2,16
0,36	45	15	1,98	1,96
0,6	15	15	2,47	2,46
0,6	30	15	1,49	1,47
0,6	45	15	1,51	1,51
1,15	15	15	0,84	0,83
1,15	30	15	0,53	0,52
1,15	45	15	0,97	0,96

En la Tabla 4.3 se presenta los resultados de Cromo hexavalente al inicio y final del tratamiento con sus respectivas réplicas utilizando como floculante al BaCl₂

Tabla 4.4 Resultados de Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)₂

Ca(OH) ₂ (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)	Cr _o (VI) ppm	Cr _f (VI) ppm	Cr _f (VI) - R ppm
0,36	15	15	7,89	7,99
0,36	30	15	4,14	4,15
0,36	45	15	4,25	4,29
0,6	15	15	4,15	4,13
0,6	30	15	2,11	2,13
0,6	45	15	2,54	2,61
1,15	15	15	1,89	1,86
1,15	30	15	1,25	1,24
1,15	45	15	1,46	1,48

En la Tabla 4.4 se presenta los resultados de Cromo hexavalente al inicio y final del tratamiento con sus respectivas replicas utilizando como floculante al Ca(OH)₂.

4.1.2. Parámetros de Control

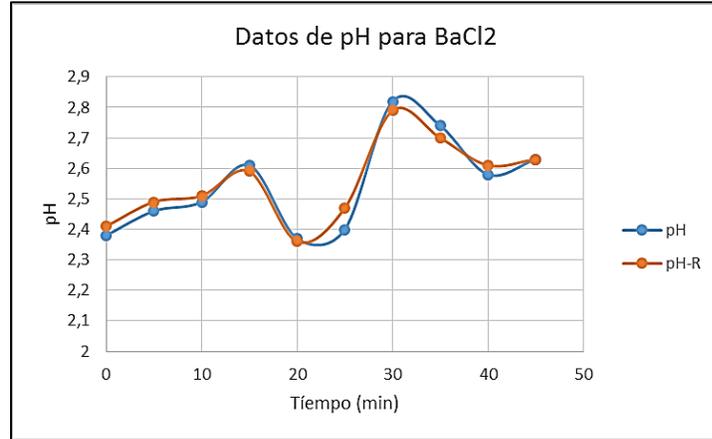
Se midió el pH cada 5 minutos durante los (45 min) que duró el tratamiento con BaCl₂ con una dosificación de 1,15 g en peso, en dicho tratamiento se determinó el mayor porcentaje de remoción, los datos del pH se muestran en la tabla 4.5

Tabla 4.5 Datos de pH con el Tratamiento de BaCl₂

Tiempo (min)	pH	pH-R
0	2,38	2,41
5	2,46	2,49
10	2,49	2,51
15	2,61	2,59
20	2,37	2,36

25	2,4	2,47
30	2,82	2,79
35	2,74	2,7
40	2,58	2,61
45	2,63	2,63

Figura 4.1 Datos de pH en la Remoción de Cr(VI) con BaCl₂



La Figura 4.1. muestra la relación existente entre el pH y el tiempo (minutos) de aplicación del método utilizando el BaCl₂, se observa que el pH se encuentra en el rango de 2,38 a 2,82 y la réplica 2,36 a 2,79, siendo la solución ácida y no habiendo mucha variación de los resultados de la réplica.

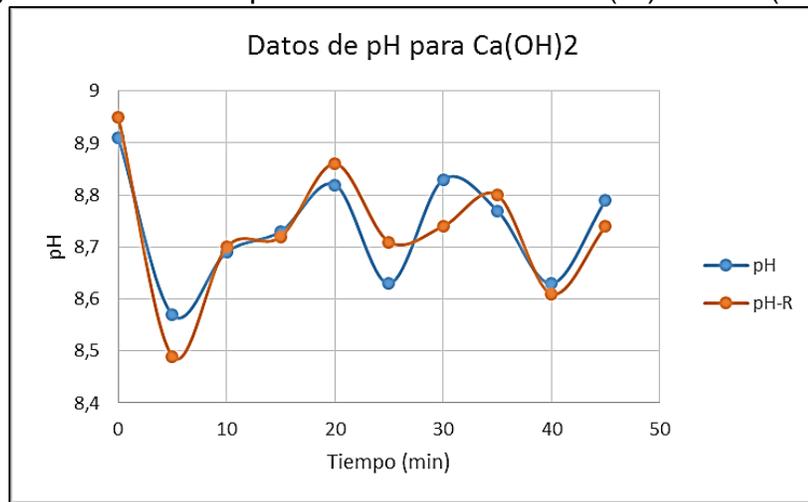
Se midió el pH cada 5 minutos durante los (45 min) que duró el tratamiento con Ca(OH)₂ con una dosificación de 1,15 g en peso, en dicho tratamiento se determinó el mayor porcentaje de remoción y los datos de pH se muestran en la tabla 4.6

Tabla 4.6 Datos de pH con el Tratamiento de Ca(OH)₂

Tiempo (min)	pH	pH-R
0	8,91	8,95
5	8,57	8,49
10	8,69	8,7

15	8,73	8,72
20	8,82	8,86
25	8,63	8,71
30	8,83	8,74
35	8,77	8,8
40	8,63	8,61
45	8,79	8,74

Figura 4.2 Datos de pH en la Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)₂



La Figura 4.2. muestra la relación existente entre el pH y el tiempo (minutos) de aplicación del método utilizando el Ca(OH)₂, se observa que el pH se encuentra en el rango de 8,57 a 8,91 y la réplica 8,49 a 8,95, siendo la solución básica y no habiendo mucha variación de los resultados de la réplica.

4.1.3. Remoción de Cromo para cada Dosis

Se calculó la remoción de cromo hexavalente en los diferentes tiempos y con las dosificaciones respectivas como se muestran en la tabla 4.7 y 4.8

Tabla 4.7 % de Remoción de Cr(VI) con BaCl₂

BaCl ₂ (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)	Cr _o (VI) ppm	Prom. Cr _f (VI)	% remoción de Cr (VI)
0,36	15	15	6,15	59,0%
0,36	30	15	2,15	85,6%
0,36	45	15	1,97	86,9%
0,6	15	15	2,46	83,6%
0,6	30	15	1,48	90,1%
0,6	45	15	1,51	89,9%
1,15	15	15	0,84	94,4%
1,15	30	15	0,52	96,5%
1,15	45	15	0,97	93,5%

El porcentaje de remoción de cromo (VI) con las dosificaciones del floculante BaCl₂, en el tratamiento del efluente sintético con una concentración inicial de 15 ppm Cr(VI) preparado en el laboratorio a partir de dicromato de cromo, se experimentaron a diferentes tiempos de retención.

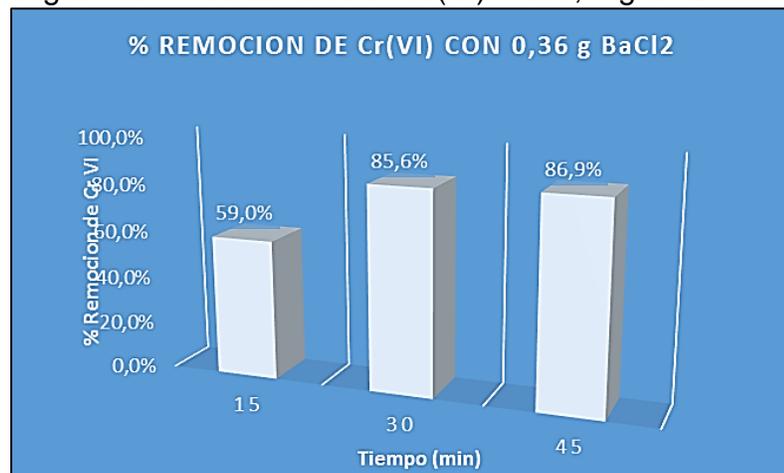
Según la tabla 4.7 existe mayor remoción, cuyo valor es de 96,5% a la dosificación de 1,15g de BaCl₂ y un tiempo 30 minutos de agitación completa en el equipo de prueba de jarras a 100RPM, con un pH final de 2.82, debido a que la solución se encuentra en un estado ácido al haber sido adicionado el HCl al 0,1N; el Cr(VI) que pasó a su estado de oxidación de Cr(III).

Al pasar el Cr(VI) a otro estado de oxidación de Cr(III), se empiezan a flocular en forma de cloruros tomando un color violeta al dejar reposar por un periodo de una hora se sedimentan los cloruros formados en la reacción acuosa ácida. Según la tabla 4.7 a mayor dosificación del agente floculante de BaCl₂ en la muestra de Cr(VI) los porcentajes de remoción aumentan debido a que se estaría formando más cloruros de cromo, el tiempo de contacto es importante debido a la formación de flóculos para la sedimentación

respectiva debido a esto el tiempo más adecuado es de 30 minutos como se muestra en la Figura 4.5, La formación más rápida de los floculantes se presentan en soluciones acidas obteniendo mayores porcentajes de remoción como el antecedente de LA INVESTIGACION SOBRE LA REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN SOLUCIÓN ACUOSA POR PRECIPITACIÓN Y FLOCULACIÓN EN TOLUCA – MÉXICO, REALIZADO POR JUAREZ RIOS, ROA MORALES, & HERNANDEZ LOPEZ, 2014. El valor final de Cr (IV) en el agua tratada mediante este método con el floculante de BaCl₂ se obtiene el valor de 0,52 ppm de Cr(VI) menor a los estándares de calidad del agua según los ECA's correspondientes.

Según la tabla 4.7 se observa que el mayor % de remoción se puede determinar con las dosificaciones de 1,15 g de BaCl₂ con un tiempo de 30 minutos donde no rompen a los flóculos formados con la adición del floculante y la mezcla completa con las paletas del equipo de pruebas de jarra a 100RPM.

Figura 4.3 % Remoción de Cr(VI) con 0,36g de BaCl₂



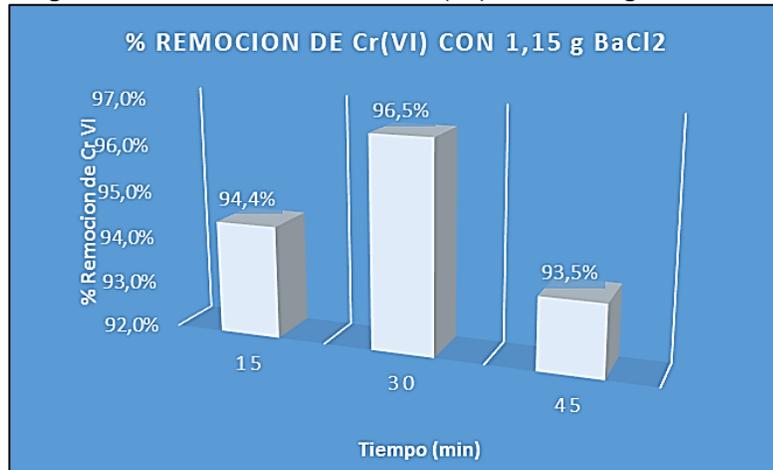
La figura 4.3 muestra la relación existente entre el % de remoción de Cr VI y el tiempo, se observa que a una dosificación de 0,36 g de BaCl₂ y a un tiempo de 45 minutos donde se obtiene el mayor porcentaje de remoción, resultando un 86,9%, a diferencia en los otros tiempos de 15 y 30 minutos de mezcla completa en la prueba de jarra que tienen menor % de remoción.

Figura 4.4 % Remoción de Cr (VI) con 0,60g de BaCl₂



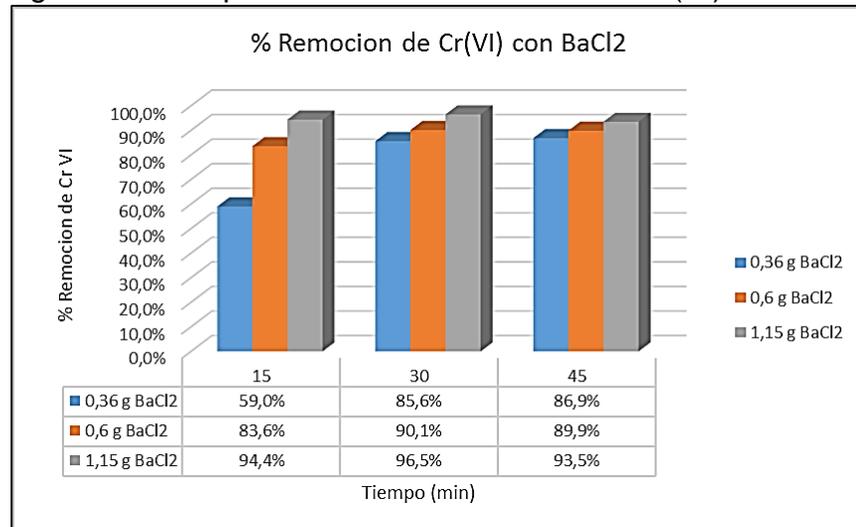
La figura 4.4 muestra la relación existente entre el % de remoción de Cr VI y el tiempo, se observa que la dosificación de 0,60 g de BaCl₂ y a un tiempo de 30 minutos obtiene el mayor porcentaje de remoción resultando un 90,1%, a diferencia del tiempo de 45 minutos que es menor la remoción obteniendo un 89,9% siendo la variación muy pequeña.

Figura 4.5 % Remoción de Cr(VI) con 1,15g de BaCl₂



La figura 4.5 muestra la relación existente entre el % de remoción de Cr VI y el tiempo, se observa que a mayor dosificación de 1,15 g de BaCl₂ y a un tiempo de 30 minutos se obtiene el mayor porcentaje de remoción resultando un 96,5%, en comparación a las otras dosificaciones y el tiempo de mezcla para la mayor remoción es igual al de 30 minutos como en la anterior corrida experimental.

Figura 4.6 Comparación del % Remoción de Cr(VI) con BaCl₂



La figura 4.6 muestra la relación existente entre los diferentes % de remoción en diferentes tiempos y con diferentes dosis de BaCl₂ encontrando que a un tiempo de 30 minutos y una dosis de 1,15 g de BaCl₂ en porcentaje más alto de remoción es de 96,5%. Ello se debe a que la remoción de Cr VI se llevó en condiciones de pH ácidas, cuyo rango no fue muy variable, lo que permitió que la reacción se desarrolle de forma estable, además según la investigación sobre el EFECTO DE LA CANTIDAD DE CROMO HEXAVALENTE Y EL pH EN LA REMOCIÓN DE Cr⁺⁶ EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE ELECTRODOS ROTATORIOS EN AZCAPOTZALCO – MÉXICO realizada por Rodriguez Martinez & Tello en el 2001, concluye que el pH en el que se desarrolla el proceso es determinante, encontrándose que a pH ácido la reacción es más rápida que a pH neutro.

Tabla 4.8. % de Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)₂

Ca(OH) ₂ (gramos)	Tiempo de agitación (minutos)	Cr _o (VI) ppm	Prom. Cr _r (VI)	% remoción de Cr (VI)
0,36	15	15	7,94	47,1%
0,36	30	15	4,15	72,4%
0,36	45	15	4,27	71,5%
0,6	15	15	4,14	72,4%
0,6	30	15	2,12	85,9%
0,6	45	15	2,58	82,8%
1,15	15	15	1,88	87,5%
1,15	30	15	1,25	91,7%
1,15	45	15	1,47	90,2%

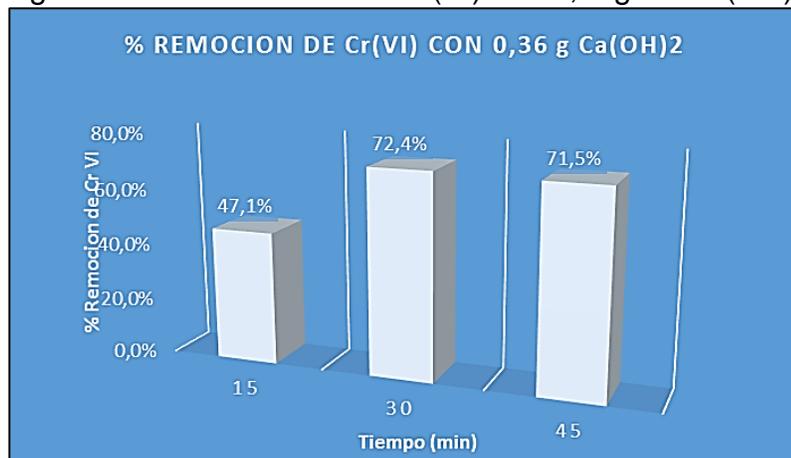
El porcentaje de remoción de cromo VI con las dosificaciones del floculante Ca(OH)₂, en el tratamiento de la disolución patrón de cromo con una concentración inicial de 15 ppm Cr(VI) preparado en el laboratorio a partir de bicromato de cromo, se experimentaron a

diferentes tiempos de retención según la tabla 4.8 existe mayor remoción de 91,7% a la dosificación de 1,15g de Ca(OH)_2 y un tiempo 30 minutos de agitación completa en el equipo de prueba de jarras a 100RPM, con un pH final de 8,83, debido a que la solución se encuentra en un estado básico, el Cr(VI) que pasó a sus estados de oxidación de Cr(OH)_4^- y Cr(OH)_3 , al pasar el Cr(VI) a los otros estados de oxidación de Cr(IV) y Cr(III), se empiezan a flocular en forma de hidróxidos tomando un color gris al dejar reposar por un periodo de una hora se sedimentan los hidróxidos formados en la reacción acuosa básica.

El valor final de Cr(IV) en el agua tratada mediante este método con el floculante de Ca(OH)_2 se obtiene 1,25 ppm de Cr(VI) sobrepasando los estándares de calidad del agua según los ECAS correspondientes.

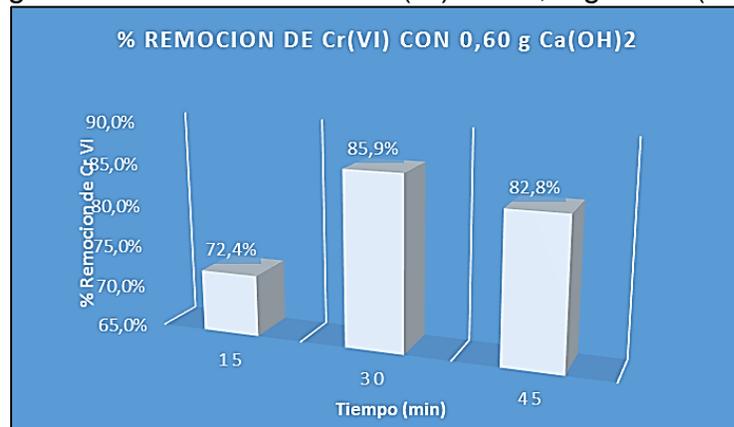
Según la tabla 4.8 se observa que el mayor % de remoción se puede determinar con la dosificaciones de 1,15g de Ca(OH)_2 con un tiempo de 30 minutos, donde con la adición del floculante no se rompen los flóculos formados y la mezcla es completa con las paletas del equipo de pruebas de jarras a 100RPM.

Figura 4.7 % Remoción de Cr (VI) con 0,36g de Ca(OH)_2



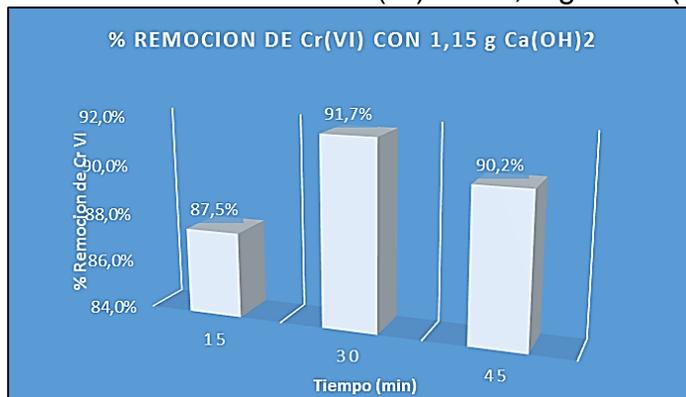
La figura 4.7 muestra la relación existente entre el % de remoción de Cr VI y el tiempo, se observa que con una dosificación de 0,36 g de Ca(OH)_2 y a un tiempo de 30 minutos se obtiene el mayor porcentaje de remoción resultando un 72,4%, a diferencia en los otros tiempos que es menor la remoción.

Figura 4.8 % Remoción de Cr(VI) con 0,60g de Ca(OH)_2



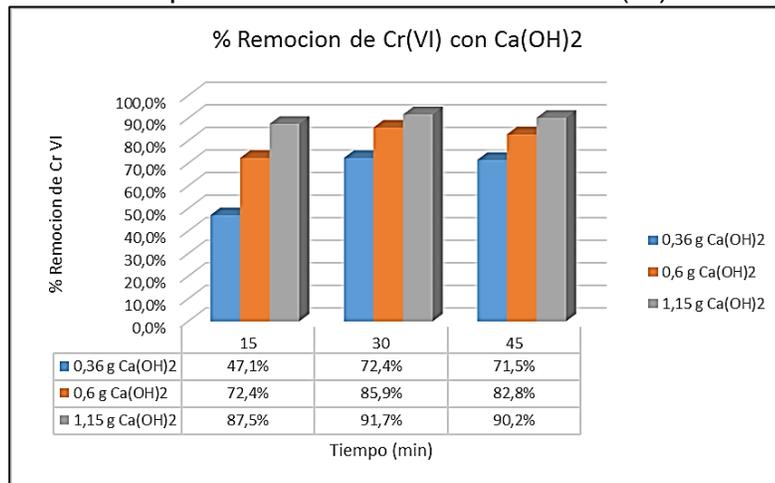
La figura 4.8 muestra la relación existente entre el % de remoción de Cr VI y el tiempo, se observa que con una dosificación de 0,60 g de Ca(OH)_2 y a un tiempo de 30 minutos se obtiene el mayor porcentaje de remoción resultando un 85,9 %, a diferencia de los otros tiempo que es menor la remoción

Figura 4.9 % Remoción de Cr(VI) con 1,15g de Ca(OH)_2



La figura 4.9 muestra la relación existente entre el % de remoción de Cr VI y el tiempo, se observa que con una dosificación de 1,15 g de Ca(OH)_2 y a un tiempo de 30 minutos se obtiene el mayor porcentaje de remoción resultando un 91,7%, a diferencia en los otros tiempos que es menor la remoción.

Figura 4.10 Comparación del % Remoción de Cr(VI) con Ca(OH)_2



La figura 4.10 muestra los diferentes % de remoción en diferentes tiempos y con diferentes dosis de Ca(OH)_2 encontrándose que a un tiempo de 30 minutos y una dosis de 1,15 g de BaCl_2 el porcentaje más alto de remoción es de 91,7%. Ello se debe a que la remoción de Cr VI se llevó en condiciones de pH básicas, cuyo rango no fue muy variable, lo que permitió que la reacción se desarrolle de forma estable. Según la Figura 4.10 a mayor dosificación de del agente floculante de Ca(OH)_2 en la muestra de Cr(VI) los porcentajes de remoción aumentan debido a que se estaría formando más Hidróxidos de cromo, el tiempo de contacto es importante debido a la formación de flóculos para la sedimentación respectiva debido a esto el tiempo más adecuado es de 30 minutos.

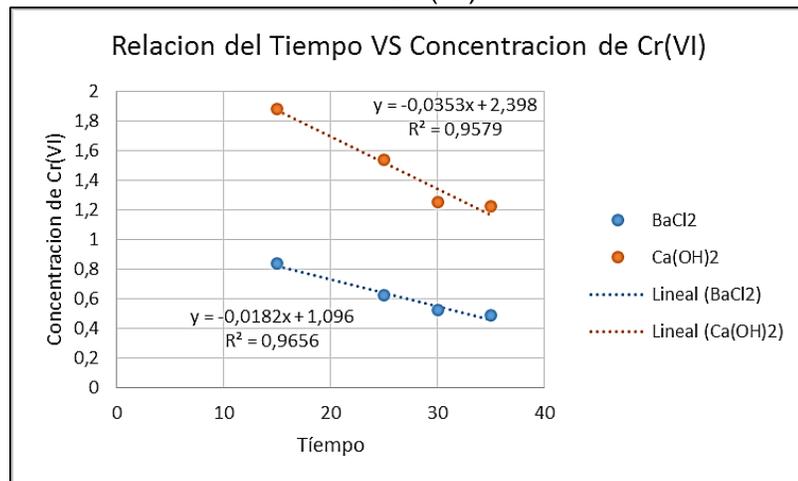
4.1.4. Relación de Tiempo Respecto a la Remoción de Cromo Hexavalente.

De los resultados de las pruebas experimentales se busca la relación más óptima entre el tiempo y la remoción de cromo para este caso se tomó los resultados de los tratamientos de dosificación de 1,15 g de BaCl₂ y Ca (OH)₂ como se muestra en la tabla (Se tuvo una concentración de 15 ppm).

Tabla 4.9 Concentraciones Finales de Cromo (VI) con BaCl₂ y Ca(OH)₂

Tiempo (min)	Cr _f (VI) con BaCl ₂ ppm	Cr _f (VI) con Ca(OH) ₂ ppm
15	0,84	1,88
25	0,62	1,54
30	0,52	1,25
35	0,49	1,22

Figura 4.11 Relación del Tiempo vs las Concentraciones Finales de Cr (VI)



De la figura 4.11 se puede observar la relación lineal del tiempo de agitación y la concentración final de cromo hexavalente con las diferentes compuestos flocculantes para el caso del BaCl₂ se

determinó la ecuación $Y=-0,0182*X+1,096$ con un coeficiente de relación de 0,9656 y para el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ la ecuación $Y=-0,0353*X+2,398$ y el coeficiente de relación de 0,9579.

4.1.5. Cinética de la Reacción

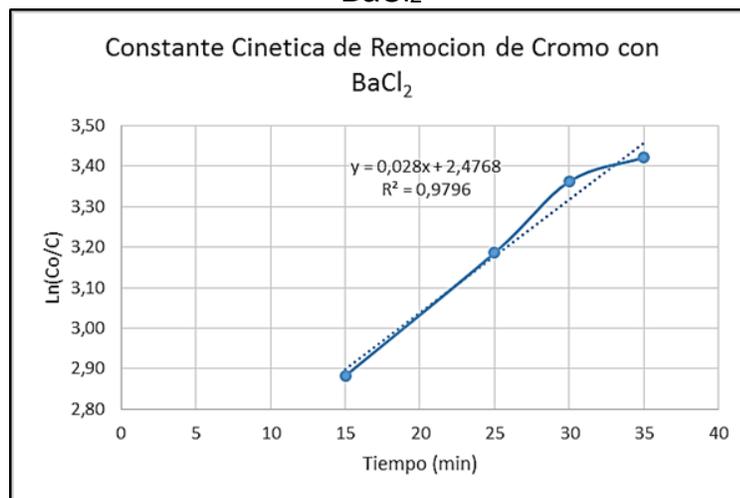
La determinación de la constante cinética se desarrolló de forma gráfica, para una cinética de reacción de primer grado con los siguientes datos mostrados en la tabla 4.10 y 4.11.

Tabla 4.10 Datos de $\text{Ln}(\text{Co}/\text{C})$ con BaCl_2

Tiempo (min)	Cr (VI) ppm	$\text{Ln}(\text{Co}/\text{C})$
15	0,84	2,88
25	0,62	3,19
30	0,52	3,36
35	0,49	3,42

Graficando el tiempo respecto a los logaritmos de las concentraciones se determinara las constantes cinéticas en función a la pendiente para el floculante BaCl_2

Figura 4.12 Constante Cinética para la Remoción de Cr(IV) con BaCl_2



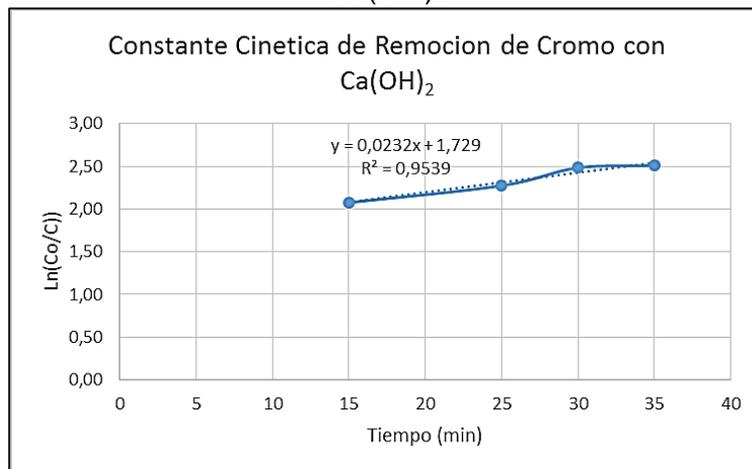
En la figura 4.12 se determinó la constante cinética (K) para remoción de Cr(VI) con BaCl₂, obteniendo el valor de 0,028 min⁻¹ con un coeficiente de correlación de R²=0,9796

Tabla 4.11 Datos de Ln(Co/C) con Ca(OH)₂

Tiempo (min)	Cr (VI) ppm	Ln(Co/C)
15	1,88	2,08
25	1,54	2,28
30	1,25	2,48
35	1,22	2,51

Graficando el tiempo respecto a los logaritmos de las concentraciones se determinara las constantes cinéticas en función a la pendiente para el floculante Ca(OH)₂

Figura 4.13 Constante Cinética para la Remoción de Cr(IV) con Ca(OH)₂

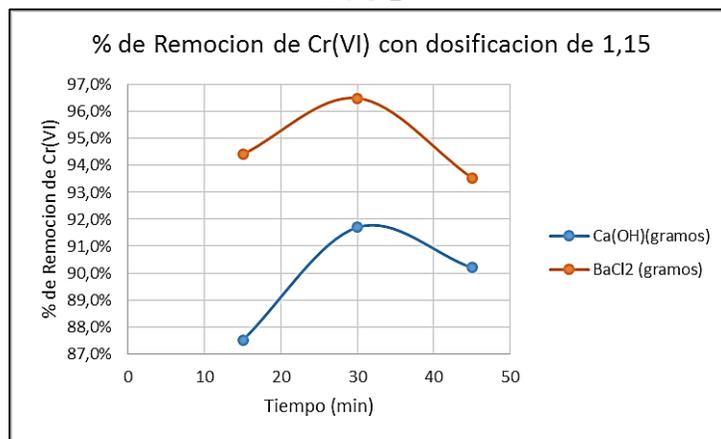


En la figura 4.13 se determinó la constante cinética (K) para remoción de Cr(VI) con Ca(OH)₂, obteniendo el valor de 0,0232 min⁻¹ con un coeficiente de correlación de R²=0,9539.

Realizadas las pruebas experimentales realizadas en función del tiempo y de la dosificación de cada uno de los floculantes se puede observar según las

Figuras 4,6 y 4,10 los mayores % de remoción de cromo hexavalente se dieron en el tiempo de 30 minutos donde se obtiene la mayor formación de flóculos con cada uno de los floculantes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2 respectivamente, y a mayor dosificación mayor porcentaje de remoción como se muestra en la Figura 4.14.

Figura 4.14 % Remoción de Cr(VI) con dosificación de 1,15g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y BaCl_2



Respecto a lo dosificación 1,15 g respectivamente para cada floculante, de los resultados en comparación, el floculante BaCl_2 en soluciones acidas tiene el mayor porcentaje de remoción siendo el 96,50%.

La relación del tiempo de agitación con la remoción de cromo con el floculante BaCl_2 se analizó según la Figura 4.11 encontrando una relación lineal obteniendo una ecuación $Y = -0,0182 \cdot X + 1,096$ con un coeficiente de relación de 0,9656, también se analizó en función a la cinética de reacción de primer orden obteniendo la Figura 4.12 de la cual se determinó la constante cinética (K), obteniendo el valor de $0,028 \text{ min}^{-1}$ con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9796$.

La relación del tiempo de agitación con la remoción de cromo con el floculante $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se analizó según la figura 4.11 en una relación lineal obteniendo una ecuación $Y = -0,0353 \cdot X + 2,398$ con un coeficiente de relación de 0,9579, también se analizó en función a la cinética de reacción de primer orden obteniendo la figura 4.13 de la cual se determinó la constante cinética (K), obteniendo el valor de $0,0232 \text{ min}^{-1}$ con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9539$.

4.2. Contrastación de Hipótesis

One-way ANOVA: % Remocion versus BaCl₂

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
BaCl ₂	3	0,36; 0,60; 1,15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
BaCl ₂	2	0,04740	0,023702	2,70	0,146
Error	6	0,05272	0,008786		
Total	8	0,10012			

Según el análisis de anova y el valor P-value tiene un valor de 0,146 siendo mayor al valor de significancia del 0,05 por lo tanto se acepta la hipótesis de la remoción de cromo hexavalente con el floculante BaCl₂

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0937330	47,35%	29,80%	0,00%

Means

BaCl ₂	N	Mean	StDev	95% CI
0,36	3	0,7718	0,1573	(0,6394; 0,9042)
0,60	3	0,8788	0,0373	(0,7464; 1,0112)

1,15 3 0,94824 0,01523 (0,81583; 1,08066)
 Pooled StDev = 0,0937330

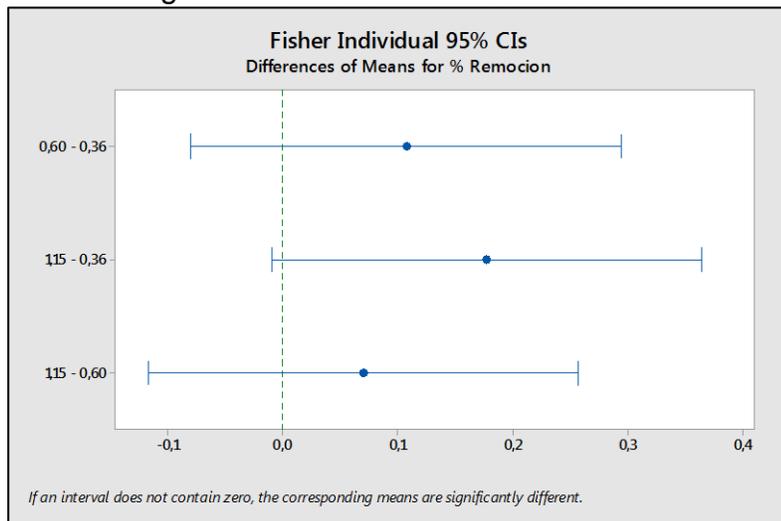
Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

BaCl2	N	Mean	Grouping
1,15	3	0,94824	A
0,60	3	0,8788	A
0,36	3	0,7718	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 4.15 Fisher Individual 95% CIs



Según la Figura 4.14 se observa que la media de las tres pruebas experimentales que se encuentran dentro de los intervalos de confianza por lo tanto pertenece a un solo grupo por la homogeneidad de los resultados

One-way ANOVA: % Remocion_1 versus Ca(OH)₂

Method

Null hypothesis

All means are equal

Alternative hypothesis

At least one mean is different

Significance level

$\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Ca(OH) ₂	3	0,36; 0,60; 1,15

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Ca(OH) ₂	2	0,10518	0,052589	6,04	0,036
Error	6	0,05220	0,008700		
Total	8	0,15738			

Según el análisis de anova y el valor P-value tiene un valor de 0,036 siendo menor al valor de significancia del 0,05 por lo tanto se rechaza la hipótesis de la remoción de cromo hexavalente con el floculante Ca(OH)₂

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0932735	66,83%	55,78%	25,37%

Means

Ca(OH) ₂	N	Mean	StDev	95% CI
0,36	3	0,6366	0,1437	(0,5048; 0,7683)
0,60	3	0,8037	0,0706	(0,6719; 0,9354)
1,15	3	0,8980	0,0213	(0,7662; 1,0298)

Pooled StDev = 0,0932735

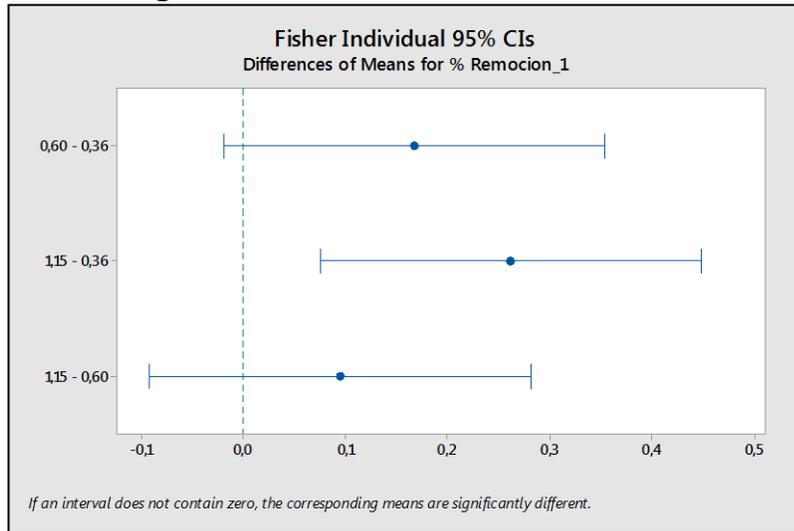
Fisher Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Ca(OH) ₂	N	Mean	Grouping
1,15	3	0,8980	A
0,60	3	0,8037	A B
0,36	3	0,6366	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Figura 4.16 Fisher Individual 95% CIs



Según la Figura 4.15 se observa que las medias de la primera y de la tercera prueba experimental están dentro de los intervalos mientras que la segunda prueba experimental se encuentra fuera obtenido dos grupos que difiere con los resultados de la concentración siendo esto heterogéneo

CONCLUSIONES.

Se calculó el porcentaje de remoción de cromo VI con el floculante $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en los diferentes tiempos de 15 min, 30 min y 45 min, para cada dosis de 0,36 g resultando 47,1%; 72,4% y 71,5% respectivamente para una dosis de 0,60 g resultando 72,4%; 85,9% y 82,8% respectivamente y para una dosis de 1,15 g resultando 87,5%; 91,7% y 90,2%.

Se calculó el porcentaje de remoción de cromo VI con el floculante BaCl_2 en los diferentes tiempos de 15 min, 30 min y 45 min, para cada dosis de 0,36 g resultando 59,0%; 85,6% y 86,9% respectivamente para una dosis de 0,60 g resultando 83,6%; 90,1% y 89,9% respectivamente y para una dosis de 1,15 g resultando 94,4%; 96,5% y 93,5%.

Se determinó según las pruebas experimentales realizadas en función del tiempo y de la dosificación de cada uno de los floculantes el mayor % de remoción de cromo hexavalente se dieron en el tiempo de 30 minutos en cada uno de los floculantes y respecto a lo dosificación fueron en 1,15 g respectivamente, de los resultados en comparación el BaCl_2 en soluciones acidas tiene el mayor porcentaje de remoción siendo el 96,50%.

Se determinó la relación del tiempo de agitación con la remoción de cromo con el floculante BaCl_2 de forma lineal obteniendo una ecuación $Y = -0,0182 \cdot X + 1,096$ con un coeficiente de relación de 0,9656, también se analizó en función a la cinética de reacción de primer orden obteniendo la constante cinética (K), con un valor de $0,028 \text{ min}^{-1}$ y un coeficiente de correlación de $R^2 = 0,9796$.

Se determinó la relación del tiempo de agitación con la remoción de cromo con el floculante $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de forma lineal obteniendo una ecuación $Y = -0,0353 \cdot X + 2,398$ con un coeficiente de relación de 0,9579, también se analizó

en función a la cinética de reacción de primer orden obteniendo la constante cinética (K), con un valor de $0,0232 \text{ min}^{-1}$ y un coeficiente de correlación de $R^2=0,9539$.

RECOMENDACIONES

- Probar diferentes dosis de agentes precipitantes, y probar nuevos tiempos para optimizar al máximo la remoción de Cromo VI de efluentes conteniendo dicho metal.
- Se recomienda que la adición de los flocculantes se realicen en un periodo de 5 minutos para que no se formen grumos del flocculante y exista una mezcla completa durante el proceso.
- Se debe controlar el valor del pH ya sea una solución ácida o básica, según el flocculante que se va a adicionar, debido a que los estados de oxidación del cromo varían en función del pH.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, R. S. (Córdoba, Argentina). *Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos*. 2008: Brujas.
- Arriaga, R., García, R., & Cid, R. (2004). *Retención de cromo y mercurio con zeolitas naturales y sintéticas*. Chile: Facultad de Ciencias Químicas-Universidad de Concepción.
- Branco, M. M. (1984). *“Limnología Sanitaria”. Estudio de la contaminación de aguas continentales*. Washington: OEA, programa regional de desarrollo científico y tecnológico.
- Campos Gómez, I. (2003). *Saneamiento ambiental*. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad Estatal a Distancia - EUNED.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua - CIDTA. (30 de Setiembre de 2014). *Universidad de Salamanca*. Obtenido de Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua - CIDTA: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/quimica.pdf>
- Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana - CESPT. (26 de Febrero de 2014). *Cuido el agua.org*. Obtenido de Tipos de agua: <http://www.cuidoelagua.org/empapate/origendelagua/tiposagua.html>
- Contreras, E., Ferro Orozco, M., & Zaritzky, N. (30 de Marzo de 2014). *Remoción de cromo hexavalente mediante barros activados: modelado matemático*. Obtenido de Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria: <http://www.fcai.uncu.edu.ar/upload/17amtc-contreras-fce-unlp.pdf>
- Copyright © 2014 Universidad Técnica de Machala. (5 de Enero de 2014). *Blogspot - Química para ingeniería*. Recuperado el 4 de Enero de 2014, de Universidad Técnica de Machala química para ingeniería civil: <http://quimicaparaingenieria.blogspot.com/2012/12/cromo.html>
- ECURED-CU. (5 de Enero de 2014). Recuperado el 4 de Enero de 2014, de ECURED - Conocimiento con todos y para todos: <http://www.ecured.cu/index.php/Cromo>

- ECURED-RU. (5 de Enero de 2014). Recuperado el 4 de Enero de 2014, de ECURED - Conocimiento con todos y para todos: <http://www.ecured.cu/index.php/Electrodeposici%C3%B3n>
- Glynn, H., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería ambiental* (Segunda ed.). México: Prentice Hall.
- GRUNDFOS X. (13 de 04 de 2014). *Tratamiento químico: aguas residuales*. Obtenido de Tratamiento químico: aguas residuales: <http://es.grundfos.com/industries-solutions/applications/chemical-treatment-wastewater.html>
- Harris, D. (2007). *Análisis Químico Cuántico*. Reverte.
- Juarez Rios, J. G., Roa Morales, G., & Hernandez Lopez, S. (10 de 03 de 2014). *Red de Ciencias Ambientales*. Obtenido de Red de Ciencias Ambientales: http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Resumen/TA/RO/TAO-55.pdf
- Lavado Meza, C., Sun Kou, M. d., & Recuay Arana, N. (2012). Remoción de cromo (VI) empleando carbones preparados por activación química a partir de las astillas de eucalipto. *Sociedad Química del Perú*.
- Martínez Pérez, R., Bautista Mata, D. K., Sandobal Ibarra, P., Cardenas Gonzales, J. F., Martínez Juárez, V. M., & Acosta Rodríguez, I. (2010). *Remoción y reducción de cromo VI en solución por la cáscara de lichee (litchi chinensis soon)*. San Luis Potosí, México: Facultad de Ciencias Químicas - Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Méndez Pampín, R., Vidal Sáez, G., Lorber, K., & Márquez Romegialli, F. (2007). *Producción limpia en la industria de curtiembre*. Santiago de Compostela: Servicio de Publicaciones e intercambio Científico.
- Netzahuatl Muñoz, A. R., Pineda Camacho, G., Barragán Huerta, B., & Cristiani Urbina, E. (3 de Febrero de 2010). *Remoción de cromo hexavalente y cromo total por la corteza de Pyrus communis*. Santo Tomas-Mexico: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

- Obtenido de Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620500026>
- Organizacion Panamericana de la Salud - Organizacion Mundial de la Salud. (27 de Febrero de 2014). *Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. Obtenido de Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/033446/033446-02.pdf>
- Puente Santibáñez, L. (2002). *Precipitación química y adsorción en el tratamiento*. Lima, Perú: Revista del instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia, y ciencias geográficas.
- Ramos Olmos, R., Sepúlveda Marqués, R., & Villalobos Moreno, F. (2002). *El agua en el medio ambiente: Muestreo y análisis*. Mexicale, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California: Plaza y Valdés S. A.
- Rey de Castro Rosas, A. C. (20 de 03 de 2014). Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo. Lima, Lima, Perú.
- Ricaldi Hurtado, R. (2003). *Empresas familiares de producción artesanal de mates burilados de huancayo: problemática y lineamientos básicos para la creación de consorcios de exportación*. Lima - Perú: San Marcos.
- Rigola Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: Marcombo.
- Rodriguez, M., Martinez, S., & Tello, L. (2001). *Efecto del la cantidad de cromo hexavalente y el ph en la remocion de cr 6+ en un reactor electroquimico de electrodos rotatorios*. Azcapotzalco, México.
- Romero, C. H., Pellerano, R. G., Acevedo, H. A., & Vázquez, F. A. (2006). *Estandarización condiciones preliminares para la determinación de cromo en muestras ambientales*. Argentina: Comunicaciones Científicas y Tecnológicas - Universidad Nacional del Nordeste.
- Sanchez, M. (2010). *Tratamiento de Aguas para la Eliminacion de Microorganismos y Agentes Contaminantes (Aplicacion de Procesos Industriales a la Reutilizacion de Aguas Residuales)*. Madrid: Diaz y Santos.

- Sans Fonfria, R., & de Pablo Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos*. Barcelona, España: MARCOMBO.
- Secretaría Distrital del Ambiente- Bogotá. (8 de Octubre de 2014). *Guía para la gestión y manejo integral de residuos de industria de curtiembres y tenerías*. Bogotá, Colombia: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Soto Regalado, E., Lozano Ramírez, T., Barbarín Castillo, J. M., & Alcalá Rodríguez, M. (2004). *Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos*. Nuevo León, México: Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas, UANL.
- Universidad de Salamanca. (13 de 04 de 2014). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua*. Obtenido de CIDTA: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/quimica.pdf>
- Vargas Hernández, J. (2008). *Estudio electroquímico y termodinámico para la reducción de Cr VI a Cr III*. México: Instituto Politécnico Nacional - Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.

ANEXOS.

**FOTOGRAFÍAS DE LOS TRABAJOS REALIZADOS EN LAS PRUEBAS
EXPERIMENTALES**

Figura 4.17 Preparación de Estándares.



Figura 4.18 Preparación de Disolución de Ácido Sulfúrico.



Figura 4.19 Disolución de la Muestra Madre de Cromo.



Figura 4.20 Muestras Diluidas Para Curva de Calibración.



Figura 4.21 Celdas para Análisis Espectrofotométrico.



Figura 4.22 Análisis Espectrofotómetro.



Figura 4.23 Pesado de Cloruro de Bario.



Figura 4.24 Disolución de Ácido Sulfúrico.



Figura 4.25 Muestras de Cloruro de Bario e Hidróxido de Calcio.



Figura 4.26 Solución Definilcarbazona.



Figura 4.27 Acidificación de la muestra.



Figura 4.28 Adición de Cloruro de Bario en la Prueba de Jarra.



Tabla 4.12 Datos para Curva de Calibración Cr (VI)

Nº muestras	Concentración	Abs.
1	10	0,084
2	20	0,120
3	50	0,232
4	70	0,300
5	100	0,401