

**RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE CROMO DE LAS AGUAS
RESIDUALES DEL PROCESO DE CURTIDO DE CURTIEMBRES DE SAN
BENITO (BOGOTÁ), MEDIANTE UN PROCESO SOSTENIBLE Y VIABLE
TECNOLÓGICAMENTE**

**COHORTE VI
TESIS DE GRADO**

**DIRECTOR
DOCTOR JUAN CARLOS CARMONA HERNÁNDEZ**

NIDIA ELENA ORTIZ PENAGOS

**DIRECTOR DE LA LÍNEA EN BIOSISTEMAS INTEGRADOS
DOCTOR JOHN FREDY BETANCUR P. (Esp. PhD.)**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MODALIDAD VIRTUAL
OCTUBRE DE 2013**

ÍNDICE

	Pág
RESUMEN	8
ABSTRACT	10
CONTEXTO DEL PROBLEMA	12
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	16
Estado General del sector curtiembre en Colombia	12
Análisis regional	15
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	24
OBJETIVOS	25
General	25
Específicos	25
JUSTIFICACIÓN	26
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	28
Contaminación hídrica por industrias de curtiembres	28
Sustentabilidad del recurso hídrico	28
Precipitación del cromo	29
Agentes precipitantes del cromo	31
Regeneración y reutilización del cromo recuperado	33
Proceso de curtido y calidad del cuero	33
Prueba de encogimiento del cuero	34
Resistencia a la flexión del cuero	35
Parámetros fisicoquímicos de calidad del agua	35
Tratamiento de aguas residuales	43
Tipos de tratamientos	44

Tratamientos preliminares	44
Procesos de tratamiento de aguas residuales	45
Tratamientos primarios	45
Tratamientos secundarios	46
Tratamientos terciarios	49
Sostenibilidad Económica y Financiera de Procesos	49
METODOLOGÍA	52
Enfoque metodológico	52
Población y muestra	52
Desarrollo metodológico	52
Técnicas e instrumentos	59
RESULTADOS	61
ESTUDIO DE SOSTENIBILIDAD	76
Diseño del proceso y dimensionamiento de la planta piloto	76
Estudio Económico para recuperar cromo de 500 L de agua residual de curtido	82
Ahorro en materias primas por cada lote de 100 pieles curtidas	84
Ahorro de agua en cada lote de 100 pieles	85
Ahorro por tasa retributiva en cada lote de 100 pieles	87
Costo mano de obra por cada lote de 100 pieles	88
Ahorro Total por lote de 100 pieles	89
Costos Equipos requeridos a nivel industrial	89
Elementos de seguridad, adicionales a los ya existentes en la planta	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	
REGISTRO FOTOGRÁFICO Y ESQUEMA DE LA PLANTA	

CRONOGRAMA

PRESUPUESTO

**ANEXO: ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LOS DISEÑOS
EXPERIMENTALES**

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Número y tamaño de las curtiembres registradas en Colombia	19
Tabla 2. Límite permisible de cromo en vertimientos	32
Tabla 3. Conductividad de diversos tipos de agua y soluciones a 25°C	39
Tabla 4. Parámetros Fisicoquímicos a analizar en el agua residual de curtido	59
Tabla 5. Concentración de cromo III (mg/L) en aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito	61
Tabla 6. Concentración de cromo en el agua residual (mg/L), después de la precipitación con hidróxido de sodio	62
Tabla 7. Análisis de varianza para concentración de cromo	63
Tabla 8. Porcentaje en volumen de hidróxido de cromo húmedo precipitado	64
Tabla 9. Análisis de varianza para porcentaje en volumen de hidróxido de sodio	65
Tabla 10. Porcentaje de encogimiento de la piel después del proceso de curtido con sal regenerada con ácido sulfúrico	66
Tabla 11. Resistencia a la flexión en húmedo del cuero terminado en la pre-experimentación	67
Tabla 12. Parámetros Fisicoquímicos del agua residual de curtido	67
Tabla 13. Parámetros Fisicoquímicos del agua residual de curtido descontaminada de cromo y del agua tratada	70
Tabla 14. Porcentaje de encogimiento de la piel después del proceso de curtido	74
Tabla 15. Porcentaje de encogimiento de la piel después del proceso de curtido	76
Tabla 16. Resistencia a la flexión en húmedo del cuero terminado	76
Tabla 17. Análisis Económico Costo/Beneficio por la implementación del proceso por cada lote de 100 pieles	90
Tabla 18. Costo Equipos y Elementos Adicionales de Seguridad	91

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Concentraciones de metales pesados en el sistema hídrico de Bogotá	13
Figura 2. Porcentaje de las empresas curtidoras en Colombia con base en su tamaño	20
Figura 3. Porcentaje de las empresas curtidoras en Colombia con base en su ubicación por departamentos	21
Figura 4. Esquema general de un proceso de lagunaje	48
Figura 5. Concentración de cromo (mg/L) en el agua residual, después de la precipitación con hidróxido de sodio	63
Figura 6. Porcentaje en volumen de hidróxido de cromo húmedo precipitado	64
Figura 7. Planta requerida para el proceso de recuperación de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido, regeneración y reutilización en el mismo proceso	80
Figura 8. Nacimiento del Río Bogotá	98
Figura 9. Río Tunjuelito en el sector de San Benito (Bogotá)	98
Figura 10. Preparación de solución de soda cáustica	98
Figura 11. Filtración en el laboratorio del agua residual del proceso de curtido	99
Figura 12. Filtración en la planta del agua residual del proceso de curtido	99
Figura 13. Adición de soda cáustica al agua residual de curtido filtrada hasta pH 9, en el laboratorio	100
Figura 14. Adición de soda cáustica al agua residual de curtido filtrada hasta pH 9, en la planta	100
Figura 15. Precipitado de hidróxido de cromo obtenido del agua residual del proceso de curtido variando la concentración de soda cáustica y pH 9 en laboratorio	101

Figura 16. Precipitado de hidróxido de cromo y agua sobrenadante del agua residual del proceso de curtido en planta	101
Figura 17. Separación del agua sobrenadante y tratamiento con policloruro de aluminio y cloro	102
Figura 18. Adición de ácido para obtener la sal para curtir: sulfato básico de cromo	103
Figura 19. Curtido de pieles con mezcla de sal de cromo regenerada y sal de cromo comercial	103
Figura 20. Prueba de encogimiento del cuero después de curtido con la mezcla sal regenerada y sal de cromo comercial	104

RESUMEN

Se evaluó la factibilidad técnica y sostenible para recuperar cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de una curtiembre en San Benito (Bogotá), precipitándolo con soda cáustica 4 M y regenerándolo con sulfato de sodio y ácido fórmico grado industrial, para reutilizarse en el mismo proceso. Su implementación minimiza contaminación de aguas con cromo y disminuye costos de producción. Se requieren en promedio 6,69 g de soda cáustica grado industrial del 99,8 % de pureza para precipitar el cromo de un litro de agua residual; 5,49 g de ácido fórmico del 85 % de pureza y 7,21 g de sulfato de sodio grado industrial del 99 % de pureza.

Se redujo el contenido de cromo del agua residual del proceso de curtido en 99,9 % desde una concentración promedio de 2.475 mg/L hasta niveles inferiores a 1,0 mg/L (límite permisible según Resolución 1074 de 1997 para el Distrito capital), utilizando hidróxido de sodio 4 M, permitiendo reutilización del agua para el proceso de lavado de las pieles saladas que ingresan a la planta de producción de cuero, después de tratamiento convencional del agua con policloruro o hidroxiclورو de aluminio y con hipoclorito de sodio, disminuyendo significativamente su consumo desde 12 m³ hasta 9 m³ por cada lote de 100 pieles, que representa una reducción del 25% de consumo de agua en la etapa de lavado.

Las concentraciones de cromo se determinaron por espectrofotometría en el laboratorio de Química de la Universidad Santo Tomás y para tener mayor confiabilidad en los resultados se solicitaron los análisis de cromo por absorción atómica en laboratorios acreditados por el IDEAM (CIAN y Quimica).

Se encontró que pueden mezclarse sulfato básico de cromo recuperado y comercial en proporción 40:60 respectivamente, para curtir pieles para calzado colegial y confección. Se determinó la calidad del cuero obtenido mediante pruebas de encogimiento y resistencia a la flexión.

El costo del sulfato básico de cromo comercial es de \$4.640/Kg y el costo por recuperar el sulfato básico de cromo de las aguas residuales es de \$4.237/Kg, utilizándose 80 Kg de sal

de cromo en cada lote; además se obtiene un ahorro adicional de agua de 3 m³ por cada lote de 100 pieles tratadas que representan \$9.600 y se dejaría de pagar \$869,4 por tasa retributiva. El costo por mano de obra es de \$10.218 correspondientes a 2 horas por lote. Por consiguiente, implementar el proceso implicaría un ahorro de \$11.163,9 por cada lote de 100 pieles tratadas, con una inversión relativamente baja en equipos de \$4'802.409, que puede recuperarse en un período aproximado de dos años con una producción entre 15 y 20 lotes mensuales en pequeñas industrias curtidoras, lo cual hace el proceso sostenible; después de la recuperación de la inversión inicial se continuaría con una reducción en los costos de producción de \$11.163,9 por lote.

Palabras clave: aguas residuales, curtiembres, cromo, precipitación, recuperación, reutilización

ABSTRACT

Technical and sustainable viability of chromium retrieval was evaluated in residual waters for a leather industrial process in San Benito (Bogotá); the previous work was achieved with precipitating reactions using 4 M sodium hydroxide solutions and looking for the regeneration of the element, adding sodium sulphate and formic acid, with the goal of chromium re-use, in the same process. The application of the results in this research process would contribute to minimization of water contamination with chromium, besides the economic expenses reduction. It takes on average 6,69 g of industrial grade caustic soda 99,8% purity to precipitate chromium liter of wastewater; 5,49 g of formic acid of 85% purity and 7,21 g of sodium sulfate 99% industrial grade purity.

Waste water chromium content was reduced in this leather industry chemical process in 99,9%, from initial average concentrations of 2.475 mg/L to lower levels of 1,0 mg/L (value registered as the low permissible amount according to Resolution 1074 of 1997 for the Capital District), using 4 M sodium hydroxide, and allowing water re-use for the washing process salted entering the leather production plant, after conventional treatment with aluminum poly chloride and chloride in elemental form, diminishing significantly its consumption from 12 m³ to 9 m³ per batch of 100 skins, representing a 25% reduction of consumption of water in the washing step.

Chromium concentrations were determined by spectrophotometry in the laboratory of Chemistry of the University of Santo Tomas and to have greater confidence in the results analyzes were requested chromium analysis by atomic absorption in laboratories accredited by the IDEAM (CIAN and Quimia).

It was found that recovered chromium from the current process can be mixed with the commercial variant in a relation of 40:60 respectively, in order to successfully taint leather used for school shoes and confecting processes. Leather quality was evaluated through shrinkage test and flexural strength.

The cost of basic chromium sulfate is \$ 4.640/Kg commercial and cost for recovering the basic chromium sulfate wastewater is \$ 4.237/Kg, used 80 Kg of chromium salt in each batch; plus you get an additional water savings of 3 m³ for each batch of 100 treated skins

representing \$ 9.600 and stop paying \$ 869,4 for vengeful rate. The labor cost is \$ 10.218 for 2 hours per batch.

Therefore, implementing the process would save \$ 11.163,9 per lot of 100 skins treated, with a relatively low investment in equipment of \$ 4'802.409, that can be recovered in a period of approximately two years with an 15 to 20 month in small batches tanning industries, which makes it sustainable; after recovery of the initial investment will continue with reduced production costs \$ 11.163.9 per batch.

Key words: Waste water, leather industries, chromium, precipitation, retrieval, re-use

CONTEXTO DEL PROBLEMA

En el sector de San Benito localidad de Usme, (Bogotá) se encuentran registradas 265 curtiembres que representan más del 50% de las industrias curtidores que hay en el país (Secretaría Distrital de Ambiente, 2008). La mayoría son pequeñas fábricas de origen familiar, con poca tecnificación y personal con conocimiento empírico (Vásquez, 2012).

El proceso de curtido consiste en transformar la piel de ganado vacuno u otros animales, en cuero, que es una valiosa materia prima, incorruptible, flexible e inmune al ataque bacteriano. Este proceso se puede realizar mediante la aplicación de taninos, que son sustancias de origen vegetal, o también de cromo. Estas sustancias reaccionan con las proteínas del colágeno de la piel evitando su posterior degradación por acción de microorganismos y aportando flexibilidad y mayor insolubilidad del cuero en el agua.

El curtido vegetal es el realizado con taninos que aportan polifenoles, que son agentes astringentes; el proceso es lento, pues requiere entre una y dos semanas.

El curtido químico con cromo es mucho más rápido y se realiza en un período de 6 a 8 horas (Azdet, 2000).

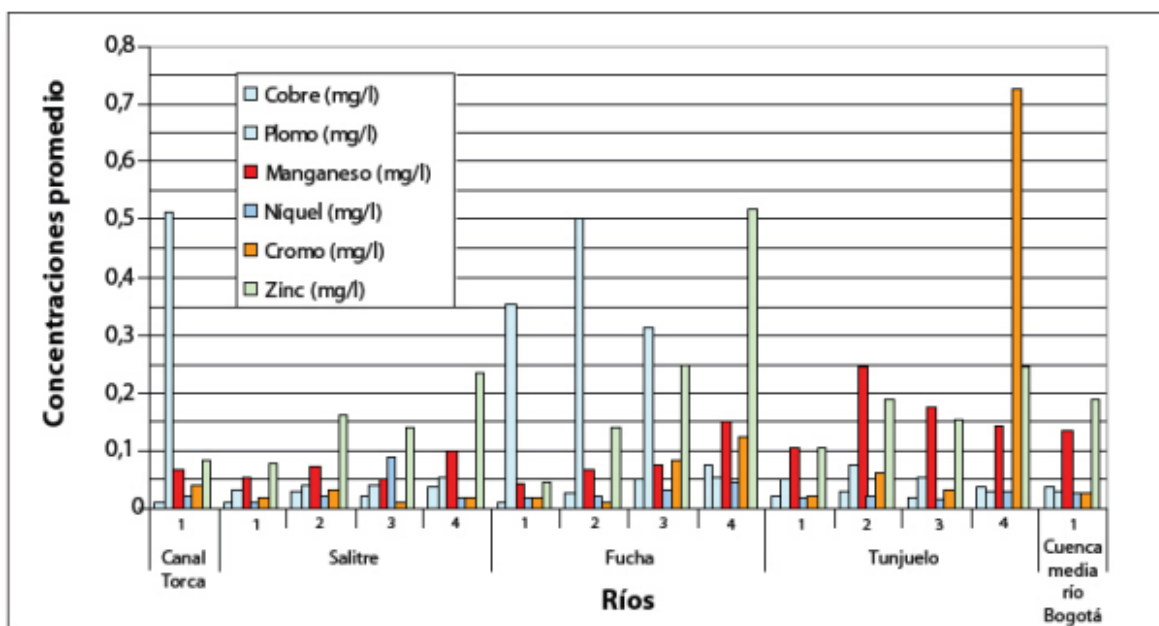
La calidad del cuero depende principalmente de la cantidad y homogeneidad del cromo fijado en el colágeno de la piel. El proceso de curtido utiliza exceso de cromo para garantizar la fijación de éste en las proteínas de la piel y evitar la descomposición del cuero.

El cromo es un contaminante cuya concentración máxima permisible como cromo total en vertimientos industriales es de 1 mg/L (República de Colombia, Ministerio de Salud, 1984. DAMA, Resolución 1074 del 28 de octubre de 1997, para el Distrito capital, por la cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos; publicado en el Registro Distrital 1528 de octubre 30 de 1997, Bogotá”). El Decreto 3930 aún no ha publicado los parámetros básicos permisibles para vertimientos a nivel nacional.

La mayoría de las aguas residuales de las industrias curtidoras del Barrio San Benito no cuentan con suficiente tratamiento y por lo tanto salen con concentraciones de cromo trivalente de 2.000 a 8.000 mg/L, determinado por pre-experimentación (Ver capítulos de

Metodología y Resultados), contaminando las aguas y afectando la vida acuática del río Tunjuelito, que recibe cada día aproximadamente unos 200 Kg de cromo proveniente de esas industrias. En la Figura 1 se observa que el cromo es el metal pesado con mayor concentración en el sistema hídrico de Bogotá, siendo más afectado el río Tunjuelito por la actividad de las curtiembres las cuales se ubican en el tramo 4, donde descarga el interceptor Tunjuelo medio que recoge las aguas residuales de San Benito (CAR, 2009).

Figura 1. Concentraciones de metales pesados en el sistema hídrico de Bogotá



Fuente: Convenio 005/2006 SDA-EAAB-ESP

En la Figura 1 se observa que el nivel de cromo alcanza concentraciones superiores a 0,1 mg/L que es nivel máximo admisible del agua para uso agrícola (República de Colombia, Ministerio de Salud, 1984).

El DAMA, el Ministerio del Medio Ambiente y la Secretaría Distrital de Ambiente han llevado a cabo programas de carácter social, basado más en presiones con base en la legislación ambiental que en un sentido de concientización, capacitación y educación ambiental. Falta capacitación al gremio de curtidores por entidades gubernamentales y por grupos de investigación afines al tema de tratamientos de aguas; hasta ahora los empresarios no han implementado los sistemas requeridos para realizar el tratamiento de

aguas necesario para reducir las concentraciones de cromo de los vertimientos a los niveles permisibles.

Actualmente la Secretaría Distrital de Ambiente trabaja en el diseño de una planta de tratamiento que abarque los vertimientos de las curtiembres de San Benito, proceso que inició en el año 2009 (CAR, 2009), sin presentar aún resultados específicos al respecto. Algunas de las industrias curtidoras de la zona han implementado algunos tratamientos basados principalmente en el uso de floculantes; el alumbre, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, cubre valores de pH en el rango de 5,0 a 7,5; el cloruro férrico entre 4,8 y 11 (Castillo, 2011). El hidroxiclорuro de aluminio, $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, es una sal inorgánica de aluminio multinuclear capaz de formar con mayor rapidez y perfección flóculos con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante logrando remociones más altas de turbiedad respecto a otras sales de aluminio mononuclear como el sulfato de aluminio y el cloruro de aluminio; el pH óptimo de funcionamiento está entre 5.0 y 9.0 (Cogollo, 2010). Las aguas del proceso de curtido tienen pH ácido, entre 2 y 4; en este rango de pH el cromo trivalente es muy soluble y los floculantes prácticamente no alcanzan a precipitarlo y la cantidad que puede ser retenida por material adsorbente como carbón activado genera lodos residuales sin reutilización del cromo por quedar contaminado con otras sustancias retenidas por el carbón, además de la rápida saturación de este último por la elevada concentración del cromo. Otras industrias utilizan como agente precipitante la cal, que si bien disminuye la concentración de cromo en las aguas residuales, incrementa la producción de lodos. Estos sistemas de tratamiento no producen los resultados ambientales que se requieren, pues el índice de remoción está muy por debajo de lo requerido, y como no ofrecen la posibilidad de recuperar el cromo para su reutilización, se convierten en un sobre costo para las industrias (DAMA, 2006).

El Río Bogotá, que recibe entre otros afluentes, las aguas del Río Tunjuelito, es uno de los más contaminados del mundo, es inviable para una inmensa gama de posibles usos del agua, y el riesgo ambiental que ofrece es elevado. Vierte sus aguas al Río Magdalena, impactando negativamente la vida acuática y su utilización como fuente de riqueza alimentaria (pesca), como abastecimiento de agua para uso humano y de riego. Los efectos negativos de la contaminación del río Bogotá son de dimensión global.

La población afectada por la contaminación de los cuerpos de agua receptores de los vertimientos de las aguas residuales de curtiembres de San Benito incluyen flora, fauna y población humana.

Las aguas del Río Bogotá a su paso por el Departamento de Cundinamarca, después de recibir las aguas del Río Tunjuelito, son utilizadas para riego de cultivos que absorben cromo, afectando a la población que los consume. Otros cultivos son afectados por recibir estas aguas contaminadas por lixiviación.

El cromo es altamente carcinogénico (Franco *et al.*, 2000).

Las aguas del Río Magdalena que recibe las aguas del Río Bogotá, presentan la misma situación por contaminación de peces, afectando a la población que los consume.

La disminución significativa de la calidad de estos cuerpos de agua afecta sus posibilidades de potabilización para abastecer de agua para consumo a poblaciones que sin estas condiciones ambientales se podrían beneficiar de estas aguas (Vásquez, 2012).

Se presentan, además, problemas de desempleo por cierre de curtiembres, debido a carencia de la licencia ambiental. En diciembre de 2008 fueron cerradas 26 curtiembres del sector de San Benito, debido a que la Secretaría Distrital de Ambiente comprobó que vertían sus aguas residuales sin tratamiento previo produciendo elevada afectación ambiental en el río Tunjuelito; además fueron sancionadas con multas que superaban los cuatro millones de pesos (Caracol Radio, 2008).

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En los siguientes trabajos de investigación se plantea la necesidad de aplicar tecnologías limpias para contra-restar el elevado nivel de contaminación producido por las curtiembres:

“Centro Nacional de Producción más Limpia en convenio con el Instituto para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología, Colciencias y El SENA. Diagnóstico Ambiental del sector Curtiembre en Colombia” (2004) presenta los resultados de un amplio estudio acerca del elevado impacto ambiental producido por las industrias curtidoras en Colombia, donde resaltan el carácter artesanal con baja tecnificación de las curtiembres y el escaso interés por organizarse para implementar un tratamiento de aguas residuales común.

Akitiengeselleschat y Ludwigshafan, 2000, presentan de manera estadística y analítica el impacto ambiental producido por las curtiembres en las aguas residuales, en el que presentan los índices de contaminación de las aguas residuales más relevantes para cromo mayores a 2.400 mg/L en el proceso de curtido, para materia orgánica valores de DQO que superan 10.000 mg/L de O₂ en los vertimientos provenientes del lavado de las pieles que ingresan a todo el proceso y de sulfuros generados en el proceso de pelambre niveles mayores a 2.000 mg/L.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en su Manual de BPA, plantea diversas alternativas de tecnologías limpias aplicables a cada una de las etapas de los procesos en la producción de cuero, incluyendo la precipitación y recuperación del cromo de las aguas residuales del proceso del curtido con agentes alcalinos, dando una descripción breve y general del proceso, considerando necesario el calentamiento del precipitado de cromo básico obtenido para la regeneración de la sal de cromo para curtir.

Díaz *et. al.*, Jiménez, Pérez y Narváez (2006) evaluaron la recuperación del cromo a partir de las virutas del cuero producidas en el rebajado del mismo, por acción del carbonato de sodio como agente precipitante. Posteriormente, se obtiene sulfato básico de cromo por tratamiento con ácido sulfúrico y es reutilizado en el proceso de curtido mezclándolo con reactivo grado comercial, obteniendo cuero con parámetros de calidad comparables con los

del cuero obtenido con sal de cromo comercial. En el proceso se requiere lavado del precipitado que contiene al cromo, con agua caliente para extraer los carbonatos.

Cano *et. al.*, 2002 evaluaron la capacidad de la biomasa de desecho agroindustrial de sorgo para retener cromo de agua con concentraciones de 5 a 30 ppm y posteriormente se recupera el cromo por lixiviado de la biomasa con ácido clorhídrico. Encontraron que por esta metodología es posible descontaminar aguas con las concentraciones de cromo mencionadas, hasta niveles de 0,5 mg/L.

Yagüe (2001) evalúa la oxidación de los colorantes del agua residual del proceso de teñido de cuero en bombo, comparando la efectividad de los oxidantes hipoclorito de sodio al 5 % p/v alcanzando una reducción máxima del color del 70 %; con peróxido de hidrógeno del 69 %; con mezcla de hierro(II) y peróxido de hidrógeno de 71 %; con ozono de 70,8 %; de 89 % para mezcla de ozono y peróxido de hidrógeno; de 66,2 % con radiación UV; 93,8 % con UV y peróxido de hidrógeno.

A nivel Nacional es elevada la problemática ambiental producida por los procesos de curtido, reflejada en el cierre de curtiembres en las zonas de San Benito, Villapinzón y Chocontá cuyos vertimientos contaminan las aguas del Río Bogotá. En otros Departamentos ganaderos del país la problemática es similar, aunque a menor escala, debido a que la mayoría de las curtiembres están ubicadas en Cundinamarca (DAMA, 2006).

A nivel internacional se encuentran aspectos tecnológicos rudimentarios y escasa implementación de tecnologías más limpias en las curtiembres (Blackman, 2005). En países como Venezuela, Perú, Chile, Argentina, Paraguay, México y Bolivia, también las protestas son frecuentes por la contaminación ambiental. Las industrias curtidoras son generalmente de carácter familiar, con escasa tecnificación y baja educación ambiental (Germillac, 2007).

En Santa Cruz, Bolivia, se ha implementado un sistema de tratamiento por medio de lagunas de oxidación para tratar parcialmente las aguas residuales de diversos tipos de industrias, incluyendo las curtiembres ubicadas en un parque industrial; las aguas residuales

son previamente tratadas en cada curtiembre para retirar sólidos en suspensión y grasas, sin embargo la oxidación posterior es insuficiente para producir agua residual con parámetros de calidad exigidos por la normatividad ambiental (Germillac, 2007). En Argentina se tienen noticias de presiones por parte de compradores a gran escala, para adquirir cuero o sus productos, solamente en curtiembres que tengan licencia ambiental; más de 80 curtiembres han sido declarandas como agente contaminante por la autoridad ambiental ACUMAR (Autoridad Cuenca Matanza-Riachuelo), a finales de 2011, comprobando que estos establecimientos contaminan con efluentes líquidos, emisiones gaseosas y/o residuos sólidos (Greenpeace, 2012)

En Europa es mayor el control ambiental, lo que no implica que sea suficiente para evitar la contaminación ambiental que también allí produce el sector de las curtiembres. Sin embargo generalmente sus tratamientos utilizan cal para precipitar el cromo de las aguas residuales, sin reutilizarlo generando lodos, lo que implica que las tecnologías implementadas en general no son más avanzadas, pero se ejerce mayor control ambiental por las entidades reguladoras (Schleenstein, 2002). Los mayores índices de contaminación industrial por vertimientos en Europa, lo presenta el sector de las curtiembres (Bosnic, 2000).

En Estados Unidos los lodos producidos por precipitación del cromo con cal en las industrias de curtiembres, generan problemas de contaminación, necesitando destinar recursos para su disposición (IFC, 2006). Debido a los contaminantes presentes en los vertimientos de las industrias curtidoras, se pueden implementar tecnologías para su recuperación para uso en la misma industria o en otros procesos (Hageman, 2002).

En general, se aplican tratamientos tradicionales con coagulantes y floculantes, que producen baja eficiencia en la remoción de cromo por su elevada solubilidad en agua al pH ácido de los vertimientos (Yagüe, 2001).

Estado general del sector curtiembre en Colombia (CPML *et. al.*, 2004):

Se tienen datos de industrias de curtiembres establecidas en los departamentos de Nariño, Quindío, Risaralda, Cundinamarca, Antioquia, Atlántico, Valle del Cauca, Tolima, Bolívar,

Santander y Huila. En la Tabla 1 se muestra información sobre número de curtiembres, tamaño y producción por región.

Tabla 1. Número y tamaño de las curtiembres registradas en Colombia

Ubicación	Número de curtiembres	Producción promedio (Piel/mes)	Producción máxima (Piel/mes)
Bogotá (San Benito y San Carlos)	350	33.000	140.000
Cundinamarca (Villapinzón, Chocontá y Cogua)	190	70.000	120.000
Antioquia (Medellín, Guarne y Sonsón)	7	62.000	74.000
Valle del Cauca	22	41.000	92.000
Atlántico	2	21.000	Sin información
Nariño	64	19.000	38.000
Quindío	27	12.000	50.000
Bolívar	1	10.000	Sin información
Risaralda	1	9.000	12.000
Santander	4	Sin información	Sin información
Huila	1	Sin información	Sin información

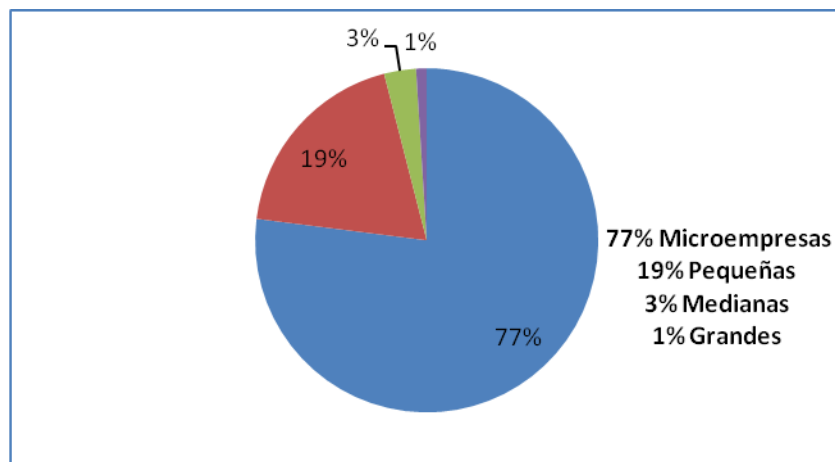
Tolima	8	Sin información	Sin información
TOTAL	677	277.000	Sin información

Fuente: CPML *et. al.*, (2004).

En la Figura 2 se presenta el porcentaje de las empresas curtidoras de acuerdo a su tamaño.

En Colombia, y mientras se reglamenta el artículo 43 de la Ley 1450 de 2011, los parámetros vigentes para clasificar las empresas por su tamaño exige el cumplimiento de las siguientes dos condiciones de cada uno de los tipos de empresa (Artículo 2° de la Ley 590 de 2000, modificado por el artículo 2° de la Ley 905 de 2004): La microempresa tiene menos de 10 trabajadores y activos totales, excluido el valor de la vivienda, inferior a 500 SMMV; la pequeña empresa tiene una planta de personal entre 11 y 50 trabajadores y activos totales entre 501 y 5.000 SMMV; la mediana empresa tiene entre 51 y 200 trabajadores y activos totales entre 5.001 y 30.000 SMMV (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2011).

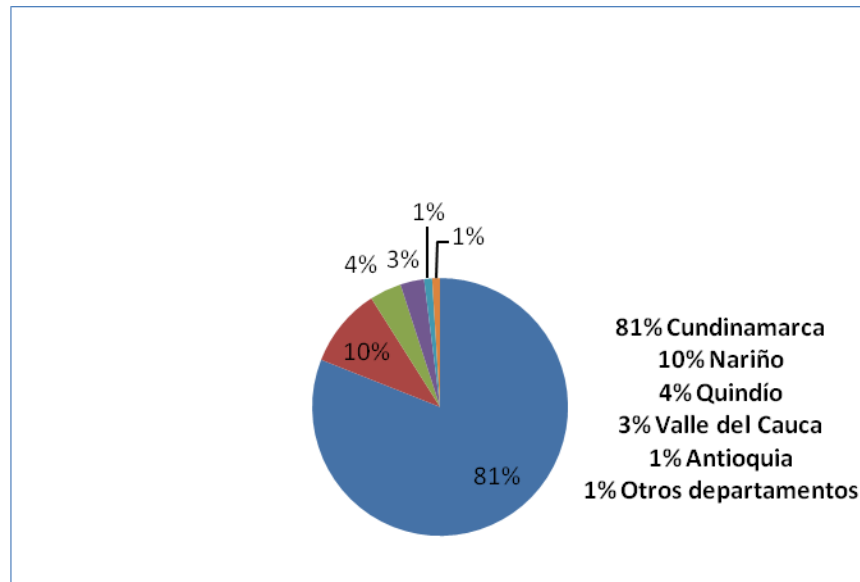
Figura 2. Porcentaje de las empresas curtidoras en Colombia con base en su tamaño



Fuente: CPML *et. al.*, (2004)

En la Figura 3 se muestran los porcentajes de curtiembres por ubicación en el país, donde se observa que la mayor concentración de curtiembres se encuentra en el departamento de Cundinamarca.

Figura 3. Porcentaje de las empresas curtidoras en Colombia con base en su ubicación por departamentos



Fuente: CPML *et. al.*, (2004)

Análisis regional:

En Nariño la industria curtiembre se caracteriza por producción artesanal y escasa tecnificación. Las curtiembres de los municipios de Pasto y Belén firmaron el Convenio Regional de Competitividad Exportadora de la Cadena del Cuero, Productos de Cuero y Calzado con el gobierno nacional, entidades financieras, instituciones y gremio, para el fortalecimiento del sector y búsqueda de nuevos mercados. A pesar de que en estos municipios se han desarrollado trabajos de sensibilización y capacitación en tecnologías más limpias, la mayoría de curtiembres vierten sus aguas residuales sin tratamiento directamente a la quebrada Mocondino y al río Pasto. Algunas curtiembres han instalado trampas de grasas, rejillas, canales y desarenadores. La carga contaminante de DBO aportada diariamente es de 9.000 Kg y los sólidos totales de 32.000 Kg. La concentración de cromo en los cuerpos de agua receptores de los vertimientos superan los 50 mg/L afectando la fauna acuática. Se han detectado que las principales causas de morbilidad asociada a las curtiembres son: infección respiratoria aguda, parasitismo intestinal,

enfermedad diarreica aguda, afectación hepática y a los riñones, enfermedad ácido péptica y enfermedades dermatológicas (CPML *et. al.*, 2004).

Los mejores resultados en cuanto a implementación de tecnologías más limpias se tienen en Quindío y Risaralda, donde los empresarios de las curtiembres firmaron un convenio con la Corporación Regional del Quindío, entregando un Plan de manejo Ambiental que han cumplido, al menos parcialmente, disminuyendo significativamente la descarga a los cuerpos de agua de sólidos totales, DBO, DQO y cromo, aunque estos niveles en algunas curtiembres aún se encuentra por encima de los valores permisibles. Todas las empresas se encuentran conectadas al colector principal de aguas residuales, permitiendo tener un mayor control por las entidades reguladoras (CPML *et. al.*, 2004).

En Cundinamarca y Bogotá se encuentran las curtiembres con mayores porcentajes de exportación de cuero del país. Sin embargo en la mayoría de estas sus procesos son artesanales, con escasa tecnificación, siendo empresas familiares con personal con poca capacitación y conocimiento para mejorar sus procesos e implementar tecnologías más limpias. La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la Secretaría Distrital de Ambiente han realizado jornadas de capacitación sobre tecnologías más limpias para el sector, y han planeado programas para la implementación de un parque industrial con el tratamiento de efluentes; sin embargo, aún no hay resultados sobre estos planes (CPML *et. al.*, 2004). Aunque algunas curtiembres tienen licencia ambiental, sus plantas de tratamiento de aguas residuales son utilizadas solamente cuando las entidades ambientales realizan auditorías en el sector, lo que muestra su enfoque en la producción, dejando de lado el respeto por el medio ambiente y manifestando su desconocimiento del concepto de sostenibilidad (Fuente: Autora).

En Antioquia la mayoría de las industrias curtidoras ubicadas en la periferia de Medellín vierten sus aguas residuales sin tratamiento previo, directamente al río Medellín; otras de estas industrias cuentan con colectores que descargan sus vertimientos a la planta de tratamiento biológica municipal de Medellín y pagan por este tratamiento según el caudal descargado a la entidad Empresas Públicas de Medellín, para lo cual deben cumplir o tener planes de cumplimiento a corto y mediano plazo para parámetros como pH, sólidos suspendidos totales, DBO y DQO (CPML *et. al.*, 2004).

En el departamento del Atlántico la Corporación Autónoma del Atlántico ha detectado como los mayores impactos de las industrias curtidoras, la inadecuada disposición de las aguas residuales y de residuos, lo que genera elevada carga de DBO, aunque se encuentra allí una de las industrias curtidoras más grande del país (CPML *et. al.*, 2004).

En el Valle del Cauca el Centro Regional de Producción Más Limpia del Valle del Cauca con apoyo de la Corporación Autónoma del Valle del Cauca, han desarrollado programas de capacitación, diagnóstico, acompañamiento y asesoría para implementar tecnologías más limpias. Algunas curtiembres han mejorado la calidad de los vertimientos (CPML *et. al.*, 2004).

El aporte significativo de este Proyecto radica en hacer accesible para el sector de las curtiembres una tecnología con principios químicos de relativa sencillez para reducir el impacto ambiental causado por el cromo del proceso de curtido y además reducir costos de producción.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN


¿Cuál es el porcentaje de recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito (Bogotá), mediante la implementación de un proceso sostenible y viable tecnológicamente, que permita reducir la contaminación con cromo del río Tunjuelito que actualmente es afectado por vertimientos de curtiembres?

OBJETIVOS

General:

Evaluar el porcentaje de recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito (Bogotá), mediante un proceso sostenible y viable tecnológicamente.

Específicos:

- Determinar el porcentaje de cromo recuperado y regenerado con sulfato de sodio que puede mezclarse con cromo nuevo para obtener cuero de calidad requerida.
- Determinar el tipo de ácido más adecuado mezclado con sulfato de sodio para la regeneración del cromo recuperado por precipitación con hidróxido de sodio.
-  Determinar los parámetros de calidad del cuero (flexibilidad y prueba de encogimiento) obtenido por utilización en el proceso de curtido de cromo recuperado y regenerado con sulfato de sodio.
- Analizar la sostenibilidad económica y ambiental de la implementación y aplicación del proceso de recuperación de cromo de las aguas residuales de curtiembres de San Benito y su regeneración con sulfato de sodio en reemplazo de ácido sulfúrico, para ser utilizado en el mismo proceso de curtido.

JUSTIFICACIÓN

El Río Bogotá, uno de los más contaminados del mundo, es inviable para una inmensa gama de posibles usos del agua, y el riesgo ambiental que ofrece es elevado. Vierte sus aguas al Río Magdalena, impactando negativamente la vida acuática y su utilización como fuente de riqueza alimentaria (pesca), como abastecimiento de agua para uso humano y de riego. Los efectos negativos de la contaminación del río Bogotá son de dimensión global (DAMA, 2006). El caudal medio del Río Tunjuelito es de $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$, del Río Bogotá es $16,45 \text{ m}^3/\text{s}$ (EAAB, 2010) y del Río Magdalena es $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Álvarez, 2006).

El control de los efluentes contaminantes que deterioran la calidad de las aguas del río Bogotá debe ser un propósito de las instituciones de carácter ambiental, y la disminución de los indicadores de contaminación, al ingreso de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales que han de construirse, es una estrategia que aumentará la eficiencia y efectividad de dichas plantas, disminuyendo sus costos de operación.

La disminución drástica de los niveles de contaminación en los efluentes de las curtiembres del sector de San Benito, localidad de Usme, Bogotá, desde concentraciones promedio de 2.500 mg/L hasta concentraciones inferiores a 1 mg/L , podría producir un impacto positivo en las aguas del río Bogotá, y por lo tanto un efecto favorable en el escenario del tratamiento de las aguas residuales del mismo, teniendo en cuenta que en dicho sector se agrupa más del 50% de las curtiembres de todo el país (Secretaría Distrital de Ambiente, 2008).

Los conocimientos generados por el proyecto son de importancia para la disminución de la contaminación con cromo de los cuerpos de aguas. Con base en la pre-experimentación realizada por la autora de este trabajo, se ha encontrado que puede reducirse la concentración de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido desde niveles promedios de 2.500 mg/L , hasta cumplir los parámetros para vertimientos con concentraciones menores a 1 mg/L .

Hasta ahora, la mayoría de tratamientos de aguas se realizan por métodos convencionales de floculación y sedimentación, sin permitir la reutilización de los lodos generados en estos

procesos, generando residuos sólidos. La propuesta planteada en este trabajo de investigación, aborda la implementación de tecnologías más limpias reemplazando el uso de floculantes por un agente precipitante que no contamina al cromo y permite su reutilización.

Un aporte significativo del proyecto radica en hacer accesible para el sector de las curtiembres una tecnología con principios químicos de relativa sencillez para reducir el impacto ambiental causado por el cromo del proceso de curtido y además reducir costos de producción, por una parte, por la recuperación del cromo de los vertimientos y, por otra, por el reemplazo del ácido sulfúrico para la regeneración del cromo por sulfato de sodio. El estudio de sostenibilidad es muy importante para evaluar la factibilidad económica de la tecnología y posibilitar su implementación.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Contaminación hídrica por industrias de curtiembres:

Los procesos de curtido de las pieles para su transformación en cuero produce diversos tipos de contaminación en el agua, siendo los más significativos materia orgánica, cal, sal, sulfuros, cromo, colorantes y sólidos en suspensión (Alzate *et al.*, 2004).

Inicialmente las pieles son lavadas para retirar la sal adicionada para su conservación y material orgánico como sangre y grasa; este proceso contamina las aguas residuales con sal y materia orgánica. Después las pieles son tratadas con cal y sulfuro de sodio en el proceso de pelambre para retirar el pelo en medio básico. Sin embargo, estas aguas residuales desechadas después de un proceso de lavado denominado desencalado, generalmente se mezclan con las aguas de los siguientes procesos que corresponden al piquelado y el curtido, que son ácidas, produciendo ácido sulfhídrico altamente tóxico y muy volátil, afectando la atmósfera y la salud del personal dentro y entorno a las curtiembres. El pelo y los trozos de piel producen gran cantidad de sólidos en suspensión vertidos en las aguas residuales (Alzate *et al.*, 2004).

El proceso de piquelado se realiza con ácido fórmico para dar suavidad al cuero. En el proceso de curtido se utiliza cromo para evitar la degradación de las pieles, transformándolas en cuero que es un material incorruptible; el cromo es adicionado en exceso para asegurar la suficiente absorción por las pieles, contaminando los vertimientos y afectando cultivos y peces, siendo un agente carcinogénico (Blackman, 2005).

Finalmente, el cuero es tratado en los procesos de teñido y acabados para darle las propiedades deseadas, produciendo elevada contaminación por exceso de colorantes y grasas en las aguas residuales (Comunidad del cuero, 2003).

Sustentabilidad del recurso hídrico:

La contaminación de los cuerpos de aguas por vertimientos industriales afecta significativamente el ciclo hidrológico, reduciendo las posibilidades de su potabilización para abastecimiento de poblaciones, su uso para riego, calidad para vida acuática,

afectación por lixiviación y escorrentía de aguas subterráneas. La presión de vapor de las aguas contaminadas se reduce respecto a la presión de vapor de las aguas limpias, factor que incide en los procesos de evo-transpiración alterando el ciclo hidrológico (Metcalf, 2000).

La implementación de tecnologías limpias puede facilitar la reutilización de las aguas residuales, además del aprovechamiento de los agentes considerados como contaminantes, que pueden ser reintegrados a los procesos productivos, produciendo importantes ahorros de costos en los procesos que permiten la recuperación de la inversión inicial en equipos por la implementación de estas tecnologías.

Así, la prevención o minimización de la contaminación de los cuerpos de aguas por vertimientos industriales, también incide en costos estatales para tratamientos de estos, ampliando las posibilidades de sus usos y conservando o recuperando los ecosistemas afectados durante décadas por estos vertimientos.

Para que la sustentabilidad del agua sea una realidad, es importante la integración de los agentes sociales, científicos y políticos, siendo la educación un aspecto fundamental para concientizar, adquirir fundamentación científica y conocer posibilidades tecnológicas y sostenibles para la implementación de tecnologías más limpias.

Precipitación del cromo (Petrucci, 2003):

A partir de la química analítica se conoce que el cromo precipita en medio básico y a valores de pH básicos y neutros la solubilidad en agua del hidróxido de cromo III, $\text{Cr}(\text{OH})_3$, es prácticamente nula, como se muestra a continuación:

Solubilidad del cromo en agua:



$$K_{ps} = 6 * 10^{-31} \text{ Kps (Petrucci, 2003)}$$

La Ec. (1) muestra la relación entre la concentración de cromo, X, y su constante de producto de solubilidad, K_{ps} :

$$K_{ps} = [Cr^{+3}][OH^{-}]^3 = X * (3X)^3 = 27X^4 = 6 * 10^{-31} \quad (1)$$

De donde se obtiene la solubilidad de cromo en agua, que puede observarse en la Ec. (2):

$$[Cr^{+3}] = 1,22 * 10^{-8} \frac{mol}{L} * \frac{52 g}{mol} = 6,3 * 10^{-7} \frac{g}{L} = 6,3 * 10^{-4} \frac{mg}{L} \quad (2)$$

Ésta es una concentración muy baja en agua, donde el pH se calcula a partir de la Ec. (3):

$$[OH^{-}] = 3X = 3 * 1,22 * 10^{-8} \frac{mol}{L} = 3,7 * 10^{-8} \frac{mol}{L} \quad (3)$$

De donde se obtiene $pOH = 7,4$ y $pH = 6,6$

Solubilidad del cromo a $pH = 4$

$pOH = 10$

Del valor de pOH se obtiene la concentración de iones hidroxilo que se presenta en la Ec. (4):

$$[OH^{-}] = 1 * 10^{-10} \frac{mol}{L} \quad (4)$$

Esta concentración se reemplaza en la Ec. (5) para calcular la concentración de iones cromo:

$$[Cr^{+3}] = \frac{K_{ps}}{[OH^{-}]^3} = \frac{6 * 10^{-31}}{(1 * 10^{-10})^3} = 0,6 \frac{mol}{L} * \frac{52 g}{mol} = 31,2 \frac{g}{L} = 31.200 \frac{mg}{L} \quad (5)$$

Lo que muestra que la solubilidad de cromo III a pH ácido es extremadamente elevada.

Solubilidad del cromo a $pH = 8$

$pOH = 6$

Por consiguiente la concentración de iones hidroxilo, que se muestra en la Ec. (6) es:

$$[OH^-] = 1 * 10^{-6} \frac{mol}{L} \quad (6)$$

A partir de esta concentración, en la Ec. (7) se calcula la concentración de iones cromo:

$$[Cr^{+3}] = \frac{Kps}{[OH^-]^3} = \frac{6 * 10^{-31}}{(1 * 10^{-6})^3} = 6 * 10^{-13} \frac{mol}{L} * \frac{52 g}{mol} = 3.12 * 10^{-11} \frac{g}{L} = 3.12 * 10^{-8} \frac{mg}{L} \quad (7)$$

Lo que muestra que la solubilidad de cromo III a pH básico es extremadamente baja, prácticamente nula.

Agentes precipitantes del cromo y normatividad:

Los cuatro agentes precipitantes más adecuados para precipitar el cromo son: el óxido de magnesio (MgO), la cal (CaO), el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y la soda cáustica o hidróxido de sodio (NaOH) (EPA *et. al.*, 2006).

Los óxidos de magnesio y de calcio contaminarían con magnesio y calcio las aguas residuales proporcionando elevada dureza, además el primero de éstos es el de mayor costo y la cal de grado industrial presenta baja pureza; el bicarbonato de sodio ofrece menor eficiencia como agente precipitante por formar dióxido de carbono (CO₂) que con el agua produce ácido carbónico (H₂CO₃), disminuyendo el aporte de iones hidroxilo (OH⁻) para precipitar al cromo como hidróxido (Cr(OH)₃).

Algunas de las industrias curtidoras de la zona han implementado algunos tratamientos basados principalmente en el uso de floculantes. Las aguas del proceso de curtido tienen pH ácido, entre 3 y 4; en este rango de pH el cromo trivalente es muy soluble y los floculantes prácticamente no alcanzan a precipitarlo. Otras industrias utilizan como agente precipitante la cal, que si bien disminuye la concentración de cromo en las aguas residuales, incrementa la producción de lodos. Estos sistemas de tratamiento no producen los resultados ambientales que se requieren, pues el índice de remoción está muy por debajo de lo requerido, y como no ofrecen la posibilidad de recuperar el cromo para su reutilización, se convierten en un sobre costo para las industrias.

El hidróxido de sodio es una base fuerte que favorece la reacción con el ion cromo III para formar el hidróxido de cromo; en calidad de grado industrial tiene un costo relativamente bajo y es de mayor pureza que la cal; además el ion sodio es más tolerante en las aguas residuales que los demás iones metálicos. La resolución 1074 de 1997 por la cual se establecen las concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua o a la red de alcantarillado público no establece un valor límite para el ion sodio (Autora).

La normatividad acerca de la concentración máxima permisible de cromo en vertimientos se presenta a continuación:

Tabla 2. Límite permisible de cromo en vertimientos

LUGAR	NORMATIVA	LÍMITE PERMISIBLE DE CROMO (mg/L)
Colombia, Distrito Capital	DAMA, Resolución 1074 de 1997	1,0
Perú	MINAM, Decreto Supremo 023 de 2009	1,0
Chile	Ministerio de Obras Públicas, Decreto 609 de 1998	1,0
España	Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Real Decreto 849/1986	2,2

Regeneración y reutilización del cromo recuperado:

El hidróxido de cromo obtenido por precipitación del cromo con soda cáustica, debe ser transformado en la sal de cromo utilizada para curtir el cuero. Entonces, se adiciona ácido sulfúrico para obtener sulfato básico de cromo o hidroxisulfato de cromo, Cr(OH)SO_4 utilizado para curtir el cuero, según la siguiente reacción:



La sal de cromo obtenida se utiliza para curtir pieles.

Los iones sulfato, SO_4^- , pueden ser aportados por la sal neutra sulfato de sodio anhidro, Na_2SO_4 , que es un electrolito fuerte y por consiguiente muy soluble en agua, de bajo costo, correspondiente a 240 dólares más IVA la tonelada que equivalen a \$533/kg incluido el IVA tomando el precio del dólar de \$1.914,65 (Manufacturas Silíceas S.A.S., septiembre de 2013). Al ser una sal neutra, carece de iones hidrogeniones, H^+ , para obtener el pH ácido necesario para disolver al precipitado de hidróxido de cromo y producir la sal de cromo o sulfato básico de cromo necesario para curtir. Entonces, se pueden obtener los iones hidrogeniones, H^+ , a partir de otro ácido como el fórmico, HCOOH , que es ampliamente utilizado en los procesos de curtido y no es regulado por estupefacientes; además posee una constante de ionización relativamente alta comparado con los ácidos carboxílicos de la misma serie, de mayor peso molecular que éste, lo que implica mayor ionización. También podría ensayarse con ácido los ácidos acético y láctico que poseen constante de ionización comparables a la del ácido fórmico.

Por consiguiente, el ácido sulfúrico se podría reemplazar por sulfato de sodio para aportar los iones sulfato y por un ácido que proporcione la acidez necesaria.

Proceso de curtido y calidad del cuero:

El proceso de curtido consiste en transformar la piel de ganado vacuno u otros animales, en cuero, que es una valiosa materia prima, incorruptible, flexible e inmune al ataque bacteriano. Éste proceso se puede realizar mediante la aplicación de taninos, que son sustancias de origen vegetal, o también de cromo. Estas sustancias reaccionan con las

proteínas del colágeno de la piel evitando su posterior degradación por acción de microorganismos y aportando flexibilidad y mayor insolubilidad del cuero en el agua (Azdet, 2000).

El curtido vegetal es el realizado con taninos que aportan polifenoles, que son agentes astringentes; el proceso es lento, pues requiere entre una y dos semanas.

El curtido químico con cromo es mucho más rápido y se cumple en un período de 6 a 8 horas (Azdet, 2000).

El cromo es un contaminante cuya concentración máxima permisible como cromo total en vertimientos industriales es de 1 mg/L (DAMA, 1997).

La calidad del cuero depende principalmente de la cantidad y homogeneidad del cromo fijado en el colágeno de la piel. El colágeno está constituido por tres cadenas peptídicas helicoidales; el sulfato básico de cromo se combina químicamente con el colágeno por una interacción que envuelve el grupo hidrogenión (H^+) del colágeno y el grupo hidroxilo (OH^-) de la sal básica de cromo combinándose con grupos funcionales del colágeno que pertenezcan por lo menos a dos de las tres cadenas peptídicas de éste. Estos enlaces transversales entre las cadenas peptídicas dan lugar a una reticulación de la estructura en la que se han roto los puentes de hidrógeno desplazando las moléculas de agua, que lo hace resistente al ataque bacteriano y reduce su capacidad de hinchamiento y encogimiento por poseer una estructura fija (Azdet, 2000).

La calidad del cuero se determina por las características: porcentaje de encogimiento en la prueba de ebullición y flexibilidad.

Prueba de encogimiento del cuero:

El porcentaje de encogimiento del cuero en la prueba de ebullición es proporcional al porcentaje de cromo fijado en el colágeno y se determina (Norma IUP 16) (IUP; 2012) dibujando el contorno de una pieza de cuero rectangular de 10 cm x 2 cm sobre papel. Luego se sumerge el trozo de cuero en agua manteniendo la temperatura de ebullición

durante dos (2) minutos, se retira el cuero del agua, se deja enfriar y se compara el área del contorno con la que tenía antes de la prueba. Para cuero bien curtido el porcentaje de encogimiento debe ser nulo, indicando un contenido de 5 a 7 % de cromo necesario para cuero destinado a calzado, que puede ser sometido a temperaturas de vulcanización de 130°C. Es aceptable máximo el 5% de porcentaje de encogimiento para cuero destinado a guantes o confección, porque no serán sometidos a elevadas temperaturas.

Resistencia a la flexión del cuero:

Es la otra prueba de calidad que comúnmente se realiza al cuero para comprobar que al flexionarlo repetidamente no se romperá ni se pelará en las arrugas originadas por el uso en calzado, carteras o confección. Se determina según la Norma IUP 20 (IUP; 2012) con el flexómetro Bally, en el que la muestra de cuero se fija en un extremo y en el otro se somete a un movimiento de vaivén que produce una arruga en la superficie del cuero, el cual permanece en continuo movimiento de flexión. Después de 500, 1000, 5000 y cada 5000 flexiones más se examina si el acabado se ha deteriorado. Los parámetros de calidad aceptables se encuentran entre 40000 y 50000 flexiones en seco y 20000 flexiones en húmedo, siendo esta última más significativa (IUP, 2012).

Parámetros fisicoquímicos de calidad del agua (Rigola, 2001):

Los parámetros químicos más utilizados para caracterizar la calidad del agua residual son:

pH: es la concentración de iones hidrogeniones en el agua. Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal sustancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO₂ formando un sistema tampón carbonato/bicarbonato.

Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales pueden tener pH muy ácido. El pH tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, etc.

Oxígeno disuelto OD: Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales.

Mide la capacidad de consumo de un oxidante químico por el total de materias oxidables orgánicas e inorgánicas. La unidad de medida es ppm de O₂.

Las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 ppm. Las aguas residuales domésticas están entre 260 y 600 ppm.

Hay un índice que indicará el tipo de vertido, aguas arriba que hay en el agua que se está analizando y es la relación (DBO / DQO) si es menor de 0,2 el vertido será de tipo inorgánico y si es mayor de 0,6 se interpretará que aguas arriba se tiene un vertido orgánico.

Materia orgánica biodegradable o Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): DBO₅ es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta.

Mide la cantidad de oxígeno consumido en la eliminación de la materia orgánica del agua mediante procesos biológicos aerobios, se suele referir al consumo en 5 días (DBO_5), también suele emplearse, pero menos el (DBO_{21}) de 21 días. Se mide en ppm de O_2 que se consume.

Las aguas subterráneas suelen contener menos de 1 ppm, un contenido superior es sinónimo de contaminación por infiltración freática. En las aguas superficiales es muy variable y dependerá de las fuentes contaminantes aguas arriba. En las aguas residuales domésticas se sitúa entre 100 y 350 ppm. En las aguas industriales puede alcanzar varios miles de ppm, como por ejemplo: fabricación de aceites, alcoholes, industria de alimentos, etc.

Carbón Orgánico Total (COT): es una medida del contenido de materia orgánica del agua. Es especialmente utilizable en pequeñas concentraciones. En presencia de un catalizador, el carbón orgánico se oxida a CO_2 ; últimamente se está popularizando por la rapidez en la realización del análisis.

Sabor y Olor: estos parámetros son determinaciones organolépticas y de determinación subjetiva, para dichas observaciones no existen instrumentos de observación, ni registro, ni unidades de medida. Tienen un interés muy evidente en las aguas potables dedicadas al consumo humano y se pueden establecer ciertas "reglas":

Las aguas adquieren un sabor salado a partir de 300 ppm de Cl^- , y un gusto salado y amargo con más de 450 ppm de SO_4^{2-} . El CO_2 libre en el agua le da un gusto "picante". Trazas de fenoles u otros compuestos orgánicos le confieren un olor y sabor desagradables.

Color: es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. Existen muchas causas y por ello no podemos atribuirlo a un constituyente en exclusiva, aunque algunos colores específicos dan una idea de la causa que los provoca, sobre todo en las aguas naturales. El agua pura es bastante incolora sólo aparece como azulada en grandes espesores.

En general presenta colores inducidos por materiales orgánicos de los suelos vegetales:

- Color amarillento debido a los ácidos húmicos.

- Color rojizo, suele significar la presencia de hierro.
- Color negro indica la presencia de manganeso.

El color, por sí mismo, no descalifica a un agua como potable pero la puede hacer rechazable por estética, en aguas de proceso puede colorear el producto y en circuito cerrado algunas de las sustancias colorantes hacen que se produzcan espumas. Las medidas de color se hacen en laboratorio por comparación, y se suelen medir en ppm de Pt-Co, las aguas subterráneas no suelen sobrepasar las 5 ppm de Pt pero las superficiales pueden alcanzar varios cientos de ppm de Pt. La eliminación suele hacerse por coagulación-floculación con posterior filtración o la absorción en carbón activo.

Turbidez: es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos y que se presentan principalmente en aguas superficiales, en general son muy difíciles de filtrar y pueden dar lugar a depósitos en las conducciones. La medición se hace por comparación con la turbidez inducida por diversas sustancias, la medición en ppm de SiO₂ ha sido muy utilizada pero se aprecian variaciones según la sílice y la técnica empleadas. Otra forma es mediante célula fotoeléctrica, existen numerosos tipos de turbidímetros.

Se elimina por procesos de coagulación, decantación y filtración.

Conductividad y resistividad: la conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad y la resistividad es la medida recíproca. Son indicativas de la materia ionizable presente en el agua. El agua pura prácticamente no conduce la electricidad; por lo tanto la conductividad que podamos medir será consecuencia de las impurezas presentes en el agua. Es por lo tanto un parámetro físico bastante bueno para medir la calidad de un agua, pero deben darse tres condiciones fundamentales para que sea representativa:

- No se trate de contaminación orgánica por sustancias no ionizables.
- Las mediciones se realicen a la misma temperatura.
- La composición del agua se mantenga relativamente constante.

El aparato para las mediciones se llama conductidímetro, y básicamente lo que hace es medir la resistencia al paso de la corriente entre dos electrodos que se introducen en el agua, y se compara para su calibrado con una solución tampón de cloruro de potasio, KCl, a la misma temperatura y 20°C.

La unidad para la resistividad es el Ohm, pero se emplea el MegaOhm por cm, la de la conductividad es el Siemens, pero como es muy grande se suele emplear el micro siemens por cm.

La Tabla 3 relaciona la conductividad con el tipo de agua

Tabla 3. Conductividad de diversos tipos de agua y soluciones a 25 °C

Tipo de agua o solución	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Agua Ultrapura	0,05
Agua alimentación calderas	1 a 5
Agua Potable	50 a 100
Agua de Mar	53.000
5% de NaOH	223.000
10% HCl	700.000
32% HCl	700.000
31% HNO ₃	865.000

Fuente: Rigola, 2001

Dureza: es debida a la presencia de sales de calcio y magnesio y mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones. Afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales y desde el punto de vista de la ósmosis inversa es uno de los principales parámetros que se deben controlar.

La eliminación de la dureza se hace, principalmente, por descalcificación o ablandamiento por intercambio iónico con resinas.

Alcalinidad: la alcalinidad es una medida de neutralizar ácidos. Contribuyen, principalmente, a la alcalinidad de una solución acuosa, los iones bicarbonato (CO_3H^-), carbonato (CO_3^{2-}), y oxidrilo (OH^-), pero también los fosfatos, ácido silícico u otros ácidos de carácter débil. Su presencia en el agua puede producir CO_2 en el vapor de calderas que es muy corrosivo y también puede producir espumas, arrastre de sólidos con el vapor de calderas, etc. Se mide en las mismas unidades que la dureza (mg/L de CaCO_3). Se corrige por descarbonatación con cal, tratamiento ácido o desmineralización por intercambio iónico.

Acidez mineral: la acidez es la capacidad para neutralizar bases. No es frecuente que las aguas naturales presenten acidez, no así las superficiales. Es responsable de corrosión se mide en las mismas unidades que la alcalinidad (mg/L de CaCO_3) y se corrige por neutralización con álcalis.

Sólidos Disueltos: los sólidos disueltos o salinidad total, es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua.

El origen puede ser múltiple tanto en las aguas subterráneas como en las superficiales.

El proceso de tratamiento, entre otros, es la ósmosis inversa.

Sólidos en Suspensión: se suelen separar por filtración y decantación. Son sólidos sedimentables, no disueltos, que pueden ser retenidos por filtración. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1 ppm, las superficiales pueden tener mucho más dependiendo del origen y forma de captación.

Sólidos Totales: es la suma de los dos anteriores disueltos y en suspensión.

Residuo Seco: se llama así al peso de los materiales que quedan después de evaporar un litro del agua en cuestión. Si previamente se realiza una buena filtración corresponderá al peso total de sustancias disueltas, sean volátiles o no. La temperatura a que se hace la evaporación influye en los resultados, por las transformaciones que puede haber y las pérdidas, por ejemplo, de gas carbónico CO₂.

Cloruros: el ión cloruro Cl⁻, forma sales muy solubles, suele asociarse con el ión Na⁺ esto lógicamente ocurre en aguas muy salinas. Las aguas dulces contienen entre 10 y 250 ppm de cloruros, pero también se encuentran valores muy superiores fácilmente. Las aguas salobres contienen millares de ppm de cloruros, el agua de mar está alrededor de las 20.000 ppm de cloruros.

Sulfatos: el ión sulfato (SO₄⁻²), corresponde a sales de moderadamente solubles a muy solubles. Las aguas dulces contienen entre 2 y 250 ppm y el agua de mar alrededor de 3.000 ppm. El agua pura se satura de sulfatos a unas 1500 ppm, lo que ocurre es que la presencia de otras sales de calcio aumenta la solubilidad. En cantidades bajas no perjudica seriamente al agua pero algunos centenares de ppm pueden perjudicar seriamente la resistencia del hormigón.

Fosfatos: El ión fosfato, PO₄⁼, en general forma sales muy poco solubles y precipita fácilmente como fosfato cálcico. Al corresponder a un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas. En general no se encuentran en el agua más de 1 ppm, pero pueden llegar a algunas decenas debido al uso de fertilizantes. Puede ser crítico en la eutrofización de las aguas superficiales (Rigola, 2001).

Nitratos: El ión nitrato, NO₃⁻, forma sales muy solubles y bastante estables, aunque en medio reductor puede pasar a nitrito, nitrógeno, o amoníaco. Las aguas normales contienen menos de 10 ppm, y el agua de mar hasta 1 ppm, pero las aguas contaminadas, principalmente por fertilizantes, pueden llegar a varios centenares de ppm. Concentraciones elevadas en las aguas de bebida pueden ser la causa de cianosis infantil. Industrialmente no tiene efectos muy significativos, e incluso es útil para controlar la fragilidad del metal de

las calderas. Se elimina por intercambio iónico, pero no es un método económico para tratar grandes volúmenes de agua. Están en desarrollo procesos de eliminación biológicos. Su presencia en las aguas superficiales, conjuntamente con fosfatos, determina la eutrofización, que se caracteriza por un excesivo crecimiento de las algas.

Metales pesados: Generalmente son metales tóxicos. Los más comunes son arsénico, cadmio, plomo, cromo, bario y selenio. Todos ellos deben ser estrictamente controlados en el origen de la contaminación. Las mediciones analíticas se realizan en general por espectrofotometría de absorción atómica. Las afectaciones por la presencia de metales pesados en el agua son diversas. Mercurio: La exposición al nivel local ocasiona irritación de la piel, mucosa y es sensibilizante de la piel; la exposición generalizada al mercurio en casos de intoxicaciones agudas fuertes, produce una intensa irritación en las vías respiratorias, es productor de bronquitis, neumonías, bronqueolitis, etc.; en intoxicaciones crónicas y a dosis bajas produce debilidad, pérdida de peso, diarrea, inflamación de encías, fatiga, sabor metálico, insomnio, indigestión, etc.; en intoxicaciones crónicas y a dosis altas produce: irritabilidad, alucinaciones, llanto, excitabilidad, depresiones, tristeza, psicosis, crisis nerviosa; en casos de exposición a altas dosis en forma oral, colapsa el aparato digestivo, siendo mortal en unas horas. Cadmio: Las fuentes más comunes son las pilas, que también contienen mercurio, los pigmentos para pinturas, los barnices y las cañerías de PVC; este metal es sumamente tóxico, además de cancerígeno; en madres expuestas al cadmio produce serias afecciones con lesiones para el embarazo, presencia de proteína en la orina, etc. Plomo: Produce fatiga, dolores de cabeza, dolores óseos, dolores abdominales, trastornos del sueño, dolores musculares, impotencia, trastornos de conducta, etc.; sus síntomas avanzados son anemia, cólicos intestinales, náuseas y vómitos, enfermedad renal, impotencia sexual, delirio, esterilidad, daños al feto, hipertensión arterial, estreñimiento agudo, afectación de los nervios, enfermedad ósea, problemas de cáncer y muerte. Cromo: Afecciones locales sobre la piel causan dermatitis, sensibilización de la piel, es irritante de la piel y mucosas; produce afecciones generales como tos, bronquitis crónica, ulceraciones del tabique nasal y piel, dolores respiratorios y de cabeza, hemorragia nasal, dermatitis, etc. Zinc, manganeso, cobre, bismuto, plata y níquel son también sustancias tóxicas, que producen diversas alteraciones a la salud humana (Rigola, 2001).

Parámetros Bacteriológicos: La bacteria *Escherichia coli*, y el grupo coliforme en su conjunto, son los organismos más comunes utilizados como indicadores de la contaminación fecal. Las bacterias coliformes son microorganismos de forma cilíndrica, capaces de fermentar la glucosa y la lactosa. Otros organismos usados como indicadores de contaminación fecal son los estreptococos fecales y los clostridios. Estos últimos son los organismos anaerobios, formadores de esporas. Las esporas son formas resistentes de las bacterias capaces de sobrevivir largo tiempo, cuya presencia en ausencia de coliformes es indicativo de excesiva contaminación. Los análisis bacteriológicos de aguas se realizan por el método de filtración por membrana o por los tubos múltiples y se expresan en término del "número más probable" (índice NMP) en 100 ml de aguas. Las aguas con un NMP inferior a 1, son satisfactoriamente potables. La presencia de microorganismos no tiene importancia en muchos procesos industriales pero la industria alimentaria requiere agua de calidad potable. La destrucción de las bacterias da lugar a sustancias llamadas pirógenos, de especial importancia en el agua empleada para la producción de inyectables en la industria farmacéutica. Los microorganismos también pueden dar lugar a la formación de limos, especialmente en los circuitos cerrados de refrigeración. Según el destino del agua, la eliminación de bacterias se realiza por filtración, tratamiento biológico, o esterilización por luz ultravioleta, cloración u ozonización.

Tratamiento de aguas residuales:

Se puede definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales a los que pueden agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Rigola, 2001).

En la medida en que se vaya presentando acumulación y estancamiento del agua residual pueden generarse gases de mal olor debido a la descomposición orgánica que ésta posee; además es importante anotar que en el agua residual hay existencia de numerosos microorganismos patógenos y causantes de enfermedades que habitan en el aparato intestinal humano o que pueden estar en ciertos residuos industriales. Pero no todo es

negativo, las aguas residuales contienen nutrientes que en gran parte ayudan al crecimiento de plantas acuáticas (Rigola, 2001).

Tipos de tratamientos:

Aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos se conocen como operaciones unitarias, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza con base en procesos químicos o biológicos se conocen como procesos unitarios.

Al referirse a operaciones y procesos unitarios es porque se agrupan entre sí para constituir los tratamientos primario, secundario y terciario.

Se realiza un tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.

El tratamiento primario comprende procesos de sedimentación y tamizado.

El tratamiento secundario comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO.

El tratamiento terciario o avanzado está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

Tratamientos preliminares (Rigola, 2001):

Aunque no reflejan un proceso en sí, sirven para aumentar la efectividad de los tratamientos primarios, secundarios y terciarios. Las aguas residuales que fluyen desde los alcantarillados a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), son muy variables en su flujo y contienen gran cantidad de objetos, en muchos casos voluminosos y abrasivos, que por ningún motivo deben llegar a las diferentes unidades donde se realizan los tratamientos y deben ser removidos. Para esto son utilizados los tamices, las rejillas, los micro-filtros, etc.

Procesos de tratamiento de aguas residuales (Rigola, 2001):

Tamizado: los tamices auto-limpiantes están contruidos con mallas dispuestas en una inclinación particular que deja atravesar el agua y obliga a deslizarse a la materia sólida retenida hasta caer fuera de la malla por sí sola. La gran ventaja de este equipo es que es barato, no tiene partes móviles y el mantenimiento es mínimo, pero necesita un desnivel importante entre el punto de alimentación del agua y el de salida.

Rejas: se utilizan para separar objetos de tamaño más importante que el de simples partículas que son arrastrados por la corriente de agua. Se utilizan solamente en desbastes previos. El objetivo es proteger los equipos mecánicos e instalaciones posteriores que podrían ser dañados u obstruidos con perjuicio de los procesos que tuviesen lugar. Se construyen con barras metálicas de 6 o más mm de espesor, dispuestas paralelamente y espaciadas de 10 a 100 mm. Se limpian mediante rastrillos que pueden ser manejados manualmente o accionados automáticamente.

Para pequeñas alturas de la corriente de agua se emplean rejas curvas y para alturas mayores rejas longitudinales dispuestas casi verticalmente.

Micro-filtración: los micro-filtros trabajan a baja carga, con muy poco desnivel, y están basados en una pantalla giratoria de acero o material plástico a través de la cual circula el agua. Las partículas sólidas quedan retenidas en la superficie interior del micro-filtro que dispone de un sistema de lavado continuo para mantener las mallas limpias. Se han utilizado eficazmente para separar algas de aguas superficiales y como tratamiento terciario en la depuración de aguas residuales. Según la aplicación se selecciona el tamaño de malla indicado. Con mallas de acero pueden tener luces del orden de 30 micras y con mallas de poliéster se consiguen buenos rendimientos con tamaños de hasta 6 micras.

Tratamientos primarios (Metcalf, 2003):

El principal objetivo es el de remover aquellos contaminantes que pueden sedimentar, como por ejemplo los sólidos sedimentables y algunos suspendidos o aquellos que pueden flotar como las grasas.

El tratamiento primario presenta diferentes alternativas según la configuración general y el tipo de tratamiento que se haya adoptado. Se puede hablar de una sedimentación primaria como último tratamiento o precediendo un tratamiento biológico, de una coagulación cuando se opta por tratamientos de tipo físico-químico.

Sedimentación primaria (Metcalf, 2003):

Se realiza en tanques ya sean rectangulares o cilíndricos en donde se remueve de un 60 a 65% de los sólidos sedimentables y de 30 a 35% de los sólidos suspendidos en las aguas residuales. En la sedimentación primaria el proceso es de tipo floculento y los lodos producidos están conformados por partículas orgánicas.

Un tanque de sedimentación primaria tiene profundidades que oscilan entre 3 y 4m y tiempos de detención entre 2 y 3 horas. En estos tanques el agua residual es sometida a condiciones de reposo para facilitar la sedimentación de los sólidos sedimentables. El porcentaje de partículas sedimentadas puede aumentarse con tiempos de detención más altos, aunque se sacrifica eficiencia y economía en el proceso; las grasas y espumas que se forman sobre la superficie del sedimentador primario son removidas por medio de rastrillos que ejecutan un barrido superficial continuo.

Precipitación química – coagulación (Rigola, 2001):

La coagulación en el tratamiento de las aguas residuales es un proceso de precipitación química en donde se agregan compuestos químicos con el fin de remover los sólidos. El uso de la coagulación ha despertado interés como tratamiento terciario y con el fin de remover fósforo, color, turbiedad y otros compuestos orgánicos.

Tratamiento secundario (Rigola, 2001):

El objetivo de este tratamiento es remover la demanda biológica de oxígeno (DBO) soluble que escapa a un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos sedimentables.

El tratamiento secundario intenta reproducir los fenómenos naturales de estabilización de la materia orgánica, que ocurre en el cuerpo receptor. La ventaja es que en ese proceso el

fenómeno se realiza con más velocidad para facilitar la descomposición de los contaminantes orgánicos en períodos cortos de tiempo. Un tratamiento secundario remueve aproximadamente 85% de la DBO y los SS aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno, fósforo, metales pesados, demanda química de oxígeno (DQO) y bacterias patógenas.

Además de la materia orgánica se va a presentar gran cantidad de microorganismos como bacterias, hongos, protozoos, rotíferos, etc., que entran en estrecho contacto con la materia orgánica la cual es utilizada como su alimento. Los microorganismos convierten la materia orgánica biológicamente degradable en CO_2 y H_2O y nuevo material celular. Además de estos dos ingredientes básicos microorganismos – materia orgánica biodegradable, se necesita un buen contacto entre ellos, la presencia de un buen suministro de oxígeno, aparte de la temperatura, pH y un adecuado tiempo de contacto.

Para llevar a efecto el proceso anterior se usan varios mecanismos tales como: lodos activados, biodisco, lagunaje, filtro biológico.

Lodos activados (Metcalf, 2003):

Es un tratamiento de tipo biológico en el cual una mezcla de agua residual y lodos biológicos es agitada y aireada. Los lodos biológicos producidos son separados y un porcentaje de ellos devueltos al tanque de aireación en la cantidad que sea necesaria. En este sistema las bacterias utilizan el oxígeno suministrado artificialmente para desdoblar los compuestos orgánicos que a su vez son utilizados para su crecimiento.

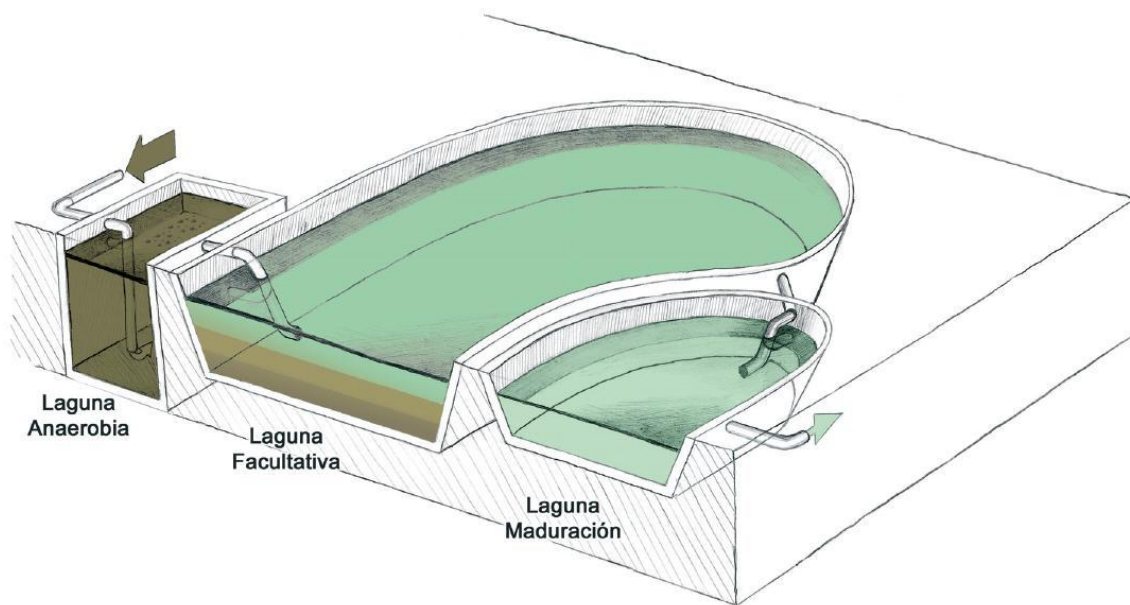
A medida que los microorganismos van creciendo se aglutinan formando los lodos activados; éstos más el agua residual fluyen a un tanque de sedimentación secundaria en donde sedimentan los lodos. Los efluentes del sedimentador pueden ser descargados a una corriente receptora; parte de los lodos son devueltos al tanque con el fin de mantener una alta población bacteriana para permitir una oxidación rápida de la materia orgánica.

Biodisco (Metcalf, 2003):

Es tan eficaz como los lodos activados, requiere un espacio mucho menor, es fácil de operar y tiene un consumo energético inferior. Está formado por una estructura plástica de diseño especial, dispuesto alrededor de un eje horizontal. Según la aplicación puede estar sumergido de un 40 a un 90% en el agua a tratar, sobre el material plástico se desarrolla una película de microorganismos, cuyo espesor se autorregula por el rozamiento con el agua, en la parte menos sumergida, el contacto periódico con el aire exterior es suficiente para aportar el oxígeno necesario para la actividad celular.

Lagunaje (Metcalf, 2003): El tratamiento se puede realizar en grandes lagunas con largos tiempos de retención (1 a 3 semanas) que les hace prácticamente insensibles a las variaciones de carga, pero que requieren terrenos muy extensos. La agitación debe ser suficiente para mantener los lodos en suspensión excepto en la zona más inmediata a la salida del efluente.

Figura 4. Esquema general de un proceso de lagunaje



Fuente: Fuentes, 2004

Relleno biológico (Metcalf, 2003): Está formado por un reactor, en el cual se ha situado un material de relleno sobre el cual crece una película de microorganismos aeróbicos con aspecto de limos.

La altura del filtro puede alcanzar hasta 12m. El agua residual se descarga en la parte superior mediante un distribuidor rotativo cuando se trata de un tanque circular. A medida que el líquido desciende a través del relleno entra en contacto con la corriente de aire ascendente y los microorganismos. La materia orgánica se descompone lo mismo que con los lodos activados, dando más material y CO₂.

Tratamiento terciario (Metcalf, 2003): Tiene el objetivo de remover contaminantes específicos, usualmente tóxicos o compuestos no biodegradables o aún la remoción complementaria de contaminantes no suficientemente removidos en el tratamiento secundario.

Como medio de filtración se puede emplear arena, grava antracita o una combinación de ellas. El pulido de efluentes de tratamiento biológico se suele hacer con capas de granulometría creciente, duales o multimedia, filtrando en arena fina trabajando en superficie. Los filtros de arena fina son preferibles cuando hay que filtrar flóculos formados químicamente y aunque su ciclo sea más corto pueden limpiarse con menos agua.

La adsorción con carbón activo se utiliza para eliminar la materia orgánica residual que ha pasado el tratamiento biológico (Metcalf, 2003).

COMENTARIO

Sostenibilidad Económica y Financiera de Procesos: Desarrollo sostenible es un término acuñado, en 1713, por Hanns Carl von Carlowitz, jefe de la guardia forestal del electorado de Sajonia, Alemania. Difundió el conocido "Ejemplo del bosque" para explicar el concepto sostenibilidad: *"Si talamos un poco de madera de un bosque él sólo se regenera y sigue produciendo más madera todos los años, pero si cortamos todos los árboles del bosque desaparece y nunca más volverá a producir madera"*. Esta definición fue recuperada, en 1987, por Gro Harlem Brundtland, primer ministra de Noruega, para el informe socio-económico de la ONU: "Nuestro Futuro Común / *Our Common Future*". Este informe se redactó como respuesta a las crisis energéticas del petróleo de los años 70.

El objetivo del desarrollo sostenible es definir proyectos viables y reconciliar los

aspectos económico, social y ambiental de las actividades humanas; "tres pilares" que deben tenerse en cuenta por parte de las comunidades, tanto empresas como personas.

La sostenibilidad económica se da cuando la actividad que se mueve hacia la sostenibilidad ambiental y social es financieramente posible y rentable. La sostenibilidad social se basa en el mantenimiento de la cohesión social y de su habilidad para trabajar en conseguir objetivos comunes.

La sostenibilidad ambiental busca la compatibilidad entre la actividad considerada y la preservación de la biodiversidad y de los ecosistemas, evitando la degradación de las funciones fuente y sumidero.

Una sociedad del bienestar se logra bajo un contexto de sostenibilidad económica, que asegure un crecimiento económico equitativo, que beneficie a todos y que brinde a la población las oportunidades para su bienestar. Además, es importante tener presente que el crecimiento económico es una condición necesaria para generar bienestar pero no suficiente por sí mismo.

El crecimiento económico se logra a través de una economía donde se generen condiciones para posibilitar la productividad y la competitividad. La economía generalmente debe ser abierta al mundo a través de acuerdos comerciales negociados justamente y protegiendo el interés nacional. El entorno debe permitir que el individuo pueda tomar sus propias decisiones, donde se faciliten las condiciones para crear, mantener y concretar negocios. En este sentido, el Estado debe promover el desarrollo de empresas, cadenas productivas eficientes, investigación y desarrollo y asegurar derechos de propiedad para promover la inversión y otorgar estabilidad jurídica. Bajo este contexto se generan condiciones que posibilitan un crecimiento económico sostenido y esto permite la creación de puestos de trabajo caracterizados por su dignidad y productividad.

Para que el contexto de libertad económica sea sostenible, si bien el Estado debe promover un entorno empresarial saludable también debe cumplir un rol regulador. Regular significa buscar un equilibrio de oferta y demanda; sin embargo, la regulación de la economía también consiste en preservar el medio ambiente para esta y las futuras generaciones.

Una economía sostenible supone también que el Estado distribuya de manera eficiente los recursos públicos. Esto implica que debe asegurar el acceso a servicios básicos, garantizando las oportunidades vitales que permiten la sostenibilidad social a favor del bienestar. Finalmente, es importante resaltar que para poder cumplir estas tareas no importa el tamaño del Estado sino su capacidad, eficiencia, eficacia y fortaleza (CEDUM, 2000).

METODOLOGÍA

Enfoque metodológico:

Enfoque de tipo cuantitativo que pretende determinar, inicialmente, el porcentaje de cromo precipitado del agua residual, con hidróxido de sodio como agente precipitante.

Después se determinó el tipo de ácido más adecuado para ser mezclado con sulfato de sodio para regenerar el cromo.

Posteriormente se determinó la proporción de sal de cromo recuperada y regenerada que podía mezclarse con sal de cromo comercial para curtir pieles y obtener cuero con calidad requerida determinada por prueba de encogimiento y resistencia a la flexión en húmedo, para cuero para calzado colegial y para confección.

Población y muestra:

Los ensayos se realizaron en la curtiembre Pielés del Sur, ubicada en el sector de San Benito (Bogotá). La experimentación se realizó en una planta piloto y para cada ensayo se curtió una piel de ganado vacuno. Se realizaron ensayos paralelamente tratando pieles para producir cuero para calzado colegial y para confección.

Desarrollo metodológico:

Pre-experimentación:

- **Determinación de concentración de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido:** Inicialmente se realizó una pre-experimentación con el fin de establecer los niveles de contaminación por cromo de las aguas del proceso de curtido de las curtiembres del sector de San Benito en Bogotá. Se tomaron muestras de aguas de los vertimientos del proceso de curtido de cinco curtiembres de San Benito. Se analizaron tres muestras de agua de cada curtiembre tomando una muestra semanalmente. Las determinaciones de cromo se

realizaron por espectrofotometría en el laboratorio de Química de la Universidad Santo Tomás.

- **Filtración del agua residual del proceso de curtido:** Inicialmente se ensayó en filtros de lechos filtrantes conformados por grava, arena sílice y malla geotextil utilizada en tratamientos de aguas. Sin embargo, el elevado contenido de sólidos en suspensión del agua residual del proceso de curtido al ser filtrados a través de arena sílice, forman una placa fibrosa que taponan en poco tiempo el filtro y no alcanza a ser retirada por retrolavado; por esta razón se ensayó con filtros de malla 100 y malla 200 (código Mesh) en acero inoxidable, para evaluar el porcentaje de retención de material particulado del agua residual. Cada filtro contiene 100 y 200 orificios respectivamente por pulgada lineal. Se analizaron 3 muestras de agua residual para determinar el porcentaje de disminución de sólidos en suspensión, después de pasar por cada filtro de malla 100 y malla 200. Por consiguiente, el total de ensayos fue de 6 muestras de agua residual de 100 mL cada una.

El Mesh se define como el número de orificios por pulgada lineal a partir del centro de un hilo. Corresponde al número utilizado en la norma norteamericana ASTM E 11-81.

Las especificaciones del filtro en acero inoxidable malla 100 (Mesh) son: abertura 0,14 mm y espesor del alambre 0,11 mm. Se distribuye en tamaño de 1,1 m de ancho; la longitud se elige en múltiplos de 25 cm.

- **Precipitación de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido, variando la concentración de hidróxido de sodio:** Se ensayó a nivel laboratorio el proceso de recuperación de cromo con hidróxido de sodio como agente precipitante, de las aguas residuales del proceso de curtido de la industria curtidora Pieles del Sur. Se realizó un diseño experimental mono-variable para evaluar el efecto de la variable independiente concentración de hidróxido de sodio (4 M, 5 M y soda sin disolver) para obtener pH inicial de 9, sobre las variables dependientes concentración final de cromo en el agua residual y porcentaje en volumen de hidróxido de cromo precipitado.

Cada ensayo se realizó por triplicado, para un total de 9 ensayos.

El pH se ajustó a 9 para todos los ensayos, debido a que a partir de pre-experimentación se encontró que a pH inicial menor de 9 se obtiene pH final, después de precipitar el cromo, menor a 7, lo que indica que al obtenerse pH ácido, falta mayor cantidad de hidróxido de sodio para precipitar todo el cromo. Los niveles de pH mayores a 10 no son adecuados, porque el cromo forma iones complejos muy solubles en agua, impidiendo su precipitación como hidróxido. El tiempo de precipitación para todos los ensayos fue de 24 horas.

- **Regeneración de sulfato básico de cromo con ácido sulfúrico:** La siguiente etapa de la pre-experimentación consistió en la regeneración del sulfato básico de cromo con ácido sulfúrico y su reutilización en el mismo proceso de curtido mezclándolo con sulfato básico de cromo comercial en proporción 30:70 respectivamente. Se adicionó ácido sulfúrico concentrado grado industrial al precipitado de hidróxido de cromo obtenido hasta obtener pH entre 3,3 y 3,5 que es el requerido en los baños de curtido. Los ensayos se realizaron por duplicado en dos tipos de cuero: para confección (calibre 2) y para calzado colegial (calibre 12) para un total de 4 ensayos. Se determinó la calidad del cuero obtenido, mediante la prueba de encogimiento que se realizó al cuero recién curtido (Norma IUP 16) y resistencia a la flexión en húmedo para el cuero terminado después de los procesos de recurtido, teñido y acabados en los laboratorios de análisis de Tauroquímica, según la Norma IUP 20 con flexómetro Bally.

Los resultados de esta pre-experimentación mostraron la viabilidad técnica del proceso, obteniendo parámetros de calidad dentro de las exigencias de calidad del cuero.

Después de la anterior pre-experimentación el trabajo constó de las siguientes etapas:

- **Primera etapa:** Determinación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del proceso de curtido. Se determinó concentración de cromo, materia orgánica o demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), pH, conductividad, color verdadero, turbiedad, dureza total, sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos en suspensión, con base en los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales.

El análisis de cromo se realizó por espectrofotometría visible en el laboratorio de Química

de la Universidad Santo Tomás, con potenciómetro Hach. Allí también se determinó pH con potenciómetro Hanna, DQO mediante reflujo abierto (5220 B, SM) y DBO₅ por el método de incubación y electrodo de membrana (5210 B, SM). Se realizó un muestreo simple semanal, porque el curtido es un proceso por lotes, no continuo, para los análisis de cada muestra de agua; en total se tomaron 3 muestras para los análisis realizados en la Universidad Santo Tomás.

Para tener mayor confiabilidad en los análisis, se envió el agua residual del proceso de curtido sin tratar para análisis, a los laboratorios QUIMIA y CIAN, acreditados por el IDEAM. Las determinaciones fueron: cromo total, materia orgánica o demanda química de oxígeno (DQO), conductividad, color verdadero, turbiedad, dureza, sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos en suspensión. A cada laboratorio se envió una muestra para análisis. Por consiguiente, el número total de muestras de agua residual analizadas fue de 5.

Segunda etapa: precipitación de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido por medio de soda cáustica o hidróxido de sodio grado industrial; esta fase no tiene variables.

Se adicionó solución 4 M de hidróxido de sodio (concentración determinada por pre-experimentación) a cada una de las muestras de agua residual del proceso de curtido hasta obtener un pH inicial de 9. Al agua sobrenadante de cada ensayo obtenido después de 24 horas de sedimentación se le determinaron nuevamente los mismos parámetros fisicoquímicos de calidad, determinados al agua residual del proceso de curtido con el fin de evaluar el contenido final de cromo en el agua y las posibilidades para su reutilización; por diferencia se calculó el cromo obtenido en la “torta” de sedimentación.

Esta agua residual descontaminada de cromo, fue sometida a un tratamiento convencional con floculantes (alumbre y policloruro de aluminio) mediante prueba de jarras, y con hipoclorito de sodio para oxidar materia orgánica y microorganismos, para evaluar su calidad y la posibilidad de su reutilización industrial. El alumbre no presentó floculación, mientras que el policloruro de aluminio formó flóculos en corto tiempo, obteniéndose los mejores resultados para una concentración de éste en el agua a tratar de 30 mg/L. Se adicionó a cada muestra de un litro de agua residual descontaminada de cromo 15, 20, 25, 30, 35 y 40 mg de floculante para la prueba de jarras. Cada ensayo se realizó por

duplicado. Se colocó en agitación a 100 rpm durante un minuto y posteriormente se redujo la agitación a 10 rpm durante 10 minutos. Después de sedimentar en reposo durante 20 minutos, se filtró y se determinó la turbiedad para cada ensayo.

Se realizó análisis para determinación de cromo en el agua residual del proceso de curtido antes y después de la precipitación de cromo con hidróxido de sodio por espectrofotometría visible en el laboratorio de Química de la Universidad y por absorción atómica de llama y por absorción atómica en horno de grafito en laboratorios acreditados por el IDEAM, para tener mayor confiabilidad en los resultados.

Se envió el agua residual del proceso de curtido sin tratar para análisis, a los laboratorios QUIMIA y CIAN, acreditados por el IDEAM. Las determinaciones fueron: Cromo total, materia orgánica o demanda química de oxígeno (DQO), conductividad, color, turbiedad, dureza, sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos en suspensión (APHA, AWWA, WPCF).

Paralelamente se determinaron los mismos parámetros fisicoquímicos anteriores en los laboratorios de la Universidad, además de la demanda bioquímica de oxígeno o DBO₅. El pH se determinó en los laboratorios de la Universidad con potenciómetro Hanna.

- **Tercera etapa:** regeneración del cromo como sulfato básico de cromo para reutilización en el proceso de curtido. Se realizó un diseño experimental mono-variable para determinar el efecto del tipo de ácido que proporciona los iones hidrogeniones, H⁺, mezclado con sulfato de sodio que aporta los iones sulfato, SO₄⁼, para regenerar el cromo y obtener la sal sulfato básico de cromo, CrOHSO₄, sobre la calidad del cuero obtenido, determinada mediante la prueba de encogimiento que se realizó al cuero recién curtido. Se determinó el efecto de la variable independiente, tipo de ácido para regenerar la sal de cromo, sobre la variable dependiente porcentaje de encogimiento del cuero. Para cada ensayo se adicionó el tipo de ácido ensayado hasta ajustar el pH de 3,3 a 3,5 en la sal regenerada, que es el requerido en los baños de curtido. Para curtir cada piel se requieren 800 g de sal de cromo; se utilizó una mezcla de 70 % de sal de cromo comercial que corresponde a 560 g y el excedente necesario se suministró con la sal de cromo regenerada.

Los ácidos seleccionados fueron: acético, cítrico y fórmico. El ácido fórmico tiene sólo un carbono y el acético tiene dos, lo que implica que sus constantes de ionización son relativamente altas y por consiguiente pueden aportar más iones hidrogeniones que los ácidos débiles de cadena más larga cuyas constantes de ionización son menores; el ácido cítrico tiene tres carbonos. Estos ácidos son de fácil consecución en el mercado y el ácido fórmico es ampliamente utilizado en los procesos de curtición. La constante de ionización del ácido fórmico es $1,8 \cdot 10^{-4}$, la del ácido acético es $1,8 \cdot 10^{-5}$ y el ácido cítrico tiene tres constantes de ionización, siendo la primera $7,4 \cdot 10^{-4}$, la segunda $1,7 \cdot 10^{-5}$ y la tercera $4,0 \cdot 10^{-7}$ (Petrucci, 2003).

Cada ensayo se realizó por duplicado para un total de seis (6) ensayos.

- **Cuarta etapa:** Se realizó un diseño experimental mono-variable, para evaluar el efecto de la variable independiente porcentaje de sulfato básico de cromo regenerado con ácido fórmico y sulfato de sodio, y porcentaje de sulfato básico de cromo comercial (30:70, 35:65 y 40:60) sobre la calidad del cuero obtenido, determinada mediante la prueba de encogimiento que se realizó al cuero recién curtido (norma IUP 16) y resistencia a la flexión realizada al cuero terminado después de los procesos de recurtido, teñido y acabados (norma IUP 20). Cada ensayo se realizó por duplicado y, además, se realizó un ensayo donde se utilizó la sal de cromo regenerada, reutilizada y vuelta a regenerar varias veces, en proporción de 40% mezclada con 60% de sal de cromo comercial, para un total de 7 ensayos en dos tipos de cuero: para confección (calibre 2) y para calzado colegial (calibre 12). Por consiguiente, el total de ensayos fue de 14.

No es conveniente utilizar, con esta metodología, un porcentaje mayor de 40% de sal de cromo regenerada porque esta se obtiene mezclada con agua. Porcentajes mayores de esta sal producen baños de curtido más diluidos debido a que la sal de cromo comercial se adiciona en polvo, sin disolver previamente, sobre el agua utilizada en el proceso previo al curtido, que es el proceso de piquelado, utilizado para dar suavidad a la piel y proporcionarle el pH ácido requerido para realizar en la siguiente etapa el curtido.

- **Quinta etapa:** estudio de sostenibilidad económica a partir del costo de la inversión inicial requerida en equipos para la implementación de la tecnología y el número de lotes de 100

pieles cada uno que deben procesarse con ahorro por recuperación de cromo, para recuperar la inversión en equipos.

Se evaluó la sostenibilidad económica del proceso de recuperación del cromo de las aguas residuales del proceso de curtido, su regeneración con ácido fórmico y sulfato de sodio y la reutilización en el mismo proceso de curtido, con base en la inversión inicial requerida de equipos y elementos adicionales de seguridad, y el número de lotes de cuero que deben producirse para recuperar esta inversión por reducción de costos en el proceso de curtido y de pago de tasas retributivas por vertimientos.

Diseño del proceso y dimensionamiento de la planta piloto para la realización de los diseños experimentales

Para el dimensionamiento de la planta piloto se tomó como base la capacidad del bombo de curtición disponible en el comercio a escala piloto, que tiene un diámetro de 1 m y una longitud de 1,3 m, que corresponden a un volumen de $1,02 \text{ m}^3$.

El bombo puede llenarse hasta un nivel inferior a su parte media, para evitar el escape de su contenido líquido, lo que equivale en este caso aproximadamente a 500 L, que corresponden a la mitad del volumen de $1,02 \text{ m}^3$.

El motor del bombo es de 3 hp de potencia y se ajustó la polea para una velocidad constante de giro de 11 rpm, parámetros utilizados para los bombos a escala piloto.

El proceso para recuperar y reutilizar el cromo de las aguas residuales del proceso de curtido requiere las siguientes etapas y equipos:

A. Bombeo desde el bombo de curtición

Para trasladar el agua residual del proceso de curtido desde el bombo hasta el filtro, se necesita una bomba para lodos que tiene capacidad suficiente para transportar el agua con elevado contenido de sólidos en suspensión, sin taponarse.

La ecuación para el cálculo de la potencia de la bomba es:

$$W = \frac{\rho q g z}{\eta}$$

donde:

ρ es densidad en kg/L

q es caudal en L/s

g es la aceleración debida a la gravedad en m/s^2

z es la altura a la que la bomba alcanza a elevar el fluido, en m

η es la eficiencia de la bomba en fracción

La densidad del agua residual es aproximadamente de 1.02 kg/L.

Técnicas e instrumentos:

- Determinación de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales del proceso de curtido: se realizó con base en los métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales, presentado en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros Fisicoquímicos a analizar en el agua residual de curtido

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO	MÉTODO CÓDIGO SM	MÁXIMO PERMISIBLE (DAMA, Resolución 1074 de 1997)
Cromo Total (mg/L)	3500 C (Absorción Atómica con llama)	1
Cromo Total (mg/L)	3500 B (Espectrofotometría)	1

DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L O ₂)	5220 C (Reflujo cerrado)	2000
DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L O ₂)	5220 B (Reflujo abierto)	2000
DBO ₅ : Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L O ₂)	5210 B (Incubación y electrodo de membrana)	1000
DBO ₅ : Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L O ₂)	5210 B (Incubación y electrodo de membrana)	1000
pH	Potenciometría – 4500 B	5 – 9
Conductividad (μS/cm)	Conductimetría – 2510 B	-
Color Verdadero (Unidades Pt-Co)	Colorimetría - 2120 B	75
Turbiedad (UNT)	Turbidimetría – 2130 B	50
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	2340 C (Titulación con EDTA)	500
Sólidos Totales (mg/L)	Gravimetría – 2540 B	-
Sólidos Disueltos (mg/L)	Filtración Membrana / Gravimetría – 2540 C	-
Sólidos Suspendidos (mg/L)	Cálculo	800

- Calidad del cuero obtenido: prueba de encogimiento del cuero determinada según Norma IUP 16 y prueba de flexibilidad del cuero obtenido determinada según la Norma IUP 20 con el flexómetro Bally.

RESULTADOS

Pre-experimentación:

Filtración del agua residual del proceso de curtido: Se encontró que el porcentaje de sólidos en suspensión desciende en 97 % utilizando el filtro malla 100 y 98,3 % con el filtro malla 200, pero éste último tiende a taparse más rápidamente, por lo que se eligió el primero de estos.

Una ventaja desde el punto de vista ambiental de la utilización de los filtros de malla de acero inoxidable, en lugar de los filtros de arena, es que se evita la generación adicional de residuos sólidos, porque la arena debe cambiarse periódicamente. Desde el punto de vista operativo, también es más fácil hacer el mantenimiento a un filtro de malla, siempre que se utilice solamente una capa de malla, porque entre capas también se formaría la placa fibrosa que taponan el filtro. Por otra parte, se puede ver directamente el estado del filtro, para retirar el material retenido por éste, ventaja que no presentan los filtros de arena.

- **Determinación de concentración de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido:** Los resultados de la concentración de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido de cinco curtiembres de San Benito, se muestra a continuación:

Tabla 5. Concentración de cromo III (mg/L) en aguas residuales del proceso de curtido de curtiembres de San Benito

MUESTRA	INDUSTRIA CURTIDORA				
	I	II	III	IV	V
1	2520	3140	1960	8115	5430
2	2770	3790	2380	7540	3980
3	2340	4020	2260	8250	4390
PROMEDIOS	2543	3650	2200	7968	4600
Máx permisible	1.0 (DAMA, Resolución 1074 de 1997)				

De los resultados obtenidos de la determinación de cromo se observa variabilidad en los resultados entre curtiembres y dentro de cada una; además se puede deducir que algunas curtiembres utilizan gran exceso de cromo por no tener el proceso de curtido estandarizado, consecuencia de sus prácticas empíricas con bajo nivel de tecnificación; la mayoría de éstas no tiene un laboratorio de análisis químico.

- **Precipitación de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido, variando la concentración de hidróxido de sodio:** Los resultados obtenidos del diseño experimental para evaluar el efecto de la variable independiente concentración de hidróxido de sodio (4 M, 5 M y soda sin disolver) sobre las variables dependientes concentración final de cromo en el agua residual y porcentaje en volumen de hidróxido de cromo precipitado, se muestran en las Tablas 6 y 7 y en las Figuras:

Tabla 6. Concentración de cromo (mg/L) en el agua residual, después de la precipitación con hidróxido de sodio

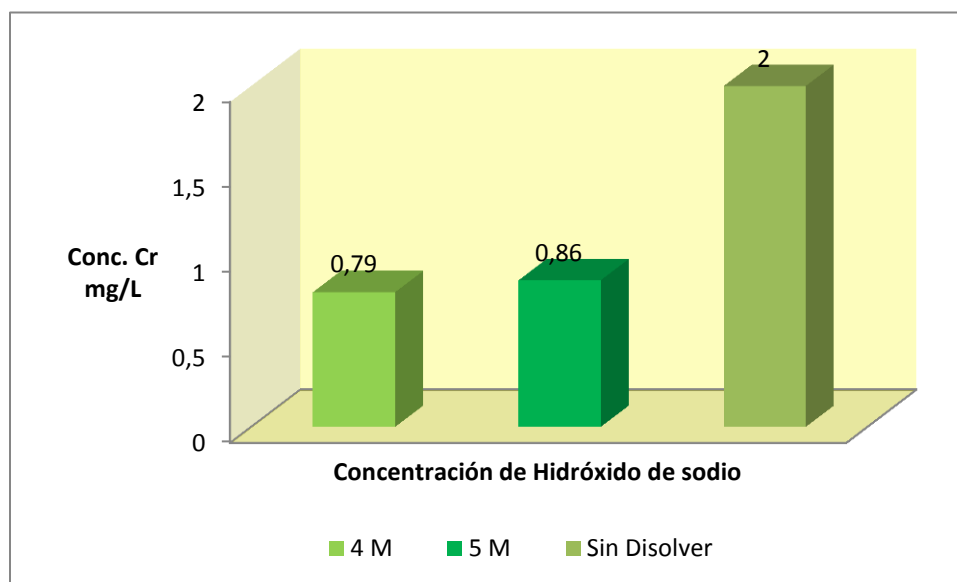
Concentración de hidróxido de sodio		
4 M	5 M	Sin Disolver
0,79	0,86	2,20
0,77	0,89	2,00
0,80	0,82	1,90
PROMEDIO 0,79	0,86	2,00

Se observa que a medida que la concentración de soda aumenta, es posible que el cromo alcance a formar iones complejos en los pequeños volúmenes donde ingresa inicialmente a la solución el hidróxido de sodio produciendo mayor concentración de cromo. Sin embargo, para todos los ensayos se obtienen reducciones significativas de cromo, desde concentraciones en promedio iniciales de 2.475 mg/L hasta niveles menores a 2,3 mg/L.

Las menores concentraciones de cromo en el agua residual corresponden a la precipitación con hidróxido de sodio 4 M, alcanzando una reducción de una concentración promedio de 2.475 mg/L de cromo inicial hasta 0,79 mg/L en promedio final, lo que equivale a una reducción del 99,97 % de cromo en el agua residual, alcanzando un nivel por debajo del

máximo permisible de 1 mg/L según la Resolución 1074 de 1997 del DAMA.

Figura 5. Concentración de cromo (mg/L) en el agua residual, después de la precipitación con hidróxido de sodio



Para el análisis de varianza o anova se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: No existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de concentración de cromo en el agua residual después de precipitar el hidróxido de cromo, para las diferentes concentraciones de hidróxido de sodio utilizadas.

Hipótesis Alternativa: Esta diferencia sí es estadísticamente significativa.

El análisis de varianza para confirmar cuál hipótesis se cumple se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Análisis de Varianza para evaluar el efecto de la concentración de hidróxido de sodio sobre la concentración de cromo total en el agua residual, después de la precipitación de hidróxido de cromo

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F calculado
Entre Grupos (entre cada concentración de NaOH)	3,025	2	1,512	

Dentro Grupos (dentro de cada concentración de NaOH)	0,045	6	0,007	201,2
TOTAL	3,070	8		

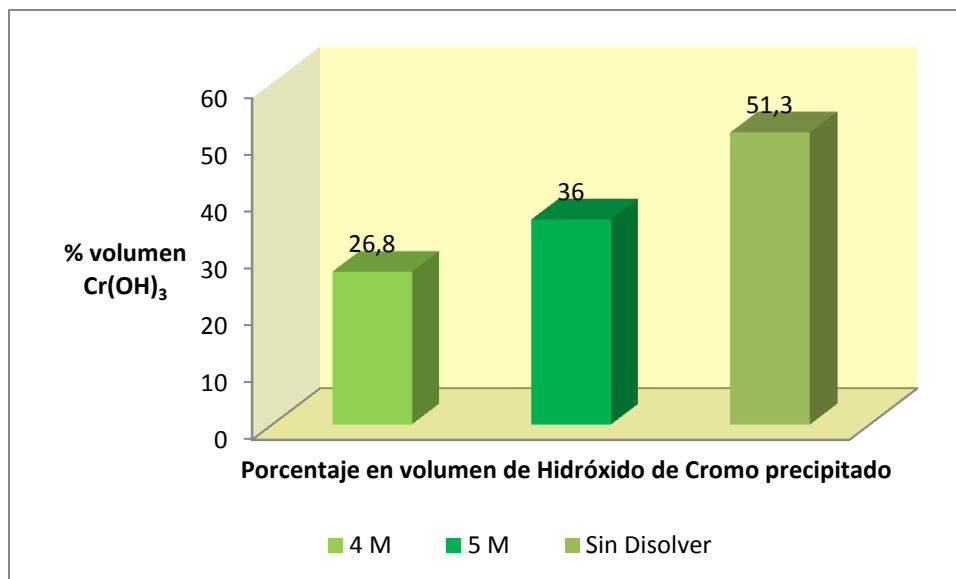
De la Tabla de estadística de Fischer o Tabla F, se lee el valor de F, para un grado de confiabilidad del 95 % o incertidumbre de 0,05. El valor es de 5,14 para F (Montgomery, 2005).

Se obtuvo un valor de F calculada de 201,2, muy superior al valor de F tabulado de 5,14. Por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, encontrándose una efecto elevadamente significativo de la concentración de hidróxido de sodio (4M, 5M y sin disolver) sobre la concentración de cromo total en el agua residual, después de la precipitación del hidróxido de cromo.

Tabla 8. Porcentaje en volumen de hidróxido de cromo húmedo precipitado

Porcentaje en volumen de hidróxido de cromo precipitado		
4 M	5 M	Sin Disolver
26,7	35,8	51,6
26,4	36,3	49,9
27,3	36,0	52,3
PROMEDIO 26,8	36,0	51,3

Figura 6. Porcentaje en volumen de hidróxido de cromo húmedo precipitado



De los resultados se observa que a menor concentración de hidróxido de sodio, se obtiene mayor compactación del precipitado de hidróxido de cromo. Los menores porcentajes en volumen de precipitado son más convenientes porque liberan mayor cantidad de agua para su posterior reutilización y proporcionan la sal de cromo que será regenerada a partir del precipitado con menor proporción de agua. La sal de cromo comercial para el proceso de curtido, se adiciona en polvo a los baños de curtido, sobre el agua del proceso previo al curtido, que corresponde al proceso de piquelado, utilizado para dar suavidad al cuero y proporcionar el pH ácido requerido en las pieles para el proceso de curtido. Por consiguiente, la concentración de soda cáustica 4 M es la más adecuada para obtener el precipitado más compacto de hidróxido de cromo, correspondiente a 26,8 % de precipitado y 73,2 % de agua.

Para el análisis de varianza o anova se plantean las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: No existe diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de porcentaje en volumen de hidróxido de cromo húmedo obtenido, para las diferentes concentraciones de hidróxido de sodio utilizadas.

Hipótesis Alternativa: Esta diferencia sí es estadísticamente significativa.

El análisis de varianza para confirmar cuál hipótesis se cumple se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Análisis de Varianza para evaluar el efecto de la concentración de hidróxido de sodio sobre el porcentaje de hidróxido de cromo húmedo obtenido

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	F calculado
Entre Grupos (entre cada concentración de NaOH)	915,927	2	457,964	764,750
Dentro Grupos (dentro de cada concentración de NaOH)	3,593	6	0,599	
TOTAL	919,520	8		

Nuevamente, de la Tabla de estadística de Fischer o Tabla F, se lee el valor de F, para un grado de confiabilidad del 95 % o incertidumbre de 0.05. El valor es de 5,14 para F (Montgomery, 2005).

Se obtuvo un valor de F calculada de 764,75, muy superior al valor de F tabulado de 5,14. Por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, encontrándose una efecto elevadamente significativo de la concentración de hidróxido de sodio (4M, 5M y sin disolver) sobre el porcentaje de hidróxido de cromo húmedo obtenido del agua residual.

- **Regeneración de sulfato básico de cromo con ácido sulfúrico:** Los resultados obtenidos de los parámetros de calidad del cuero, utilizando la sal de cromo regenerada con ácido sulfúrico, mezclada con sal de cromo comercial en proporción 30:70, se muestran en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10. Porcentaje de encogimiento de la piel después del proceso de curtido con sal regenerada con ácido sulfúrico

Tipo de cuero	Réplicas	
Calzado colegial	0,0	0,0
Confección	0,0	0,0

Tabla 11. Resistencia a la flexión en húmedo del cuero terminado en la pre-experimentación

Tipo de cuero	Réplicas	
Calzado colegial	>20.000	>20.000
Confección	>20.000	>20.000

En la Tabla 10 se observa que las pieles curtidas no presentaron encogimiento, lo que significa que la absorción de cromo fue suficiente para evitar la degradación de éstas.

Los resultados de resistencia a la flexión que se muestran en la Tabla 11, indican que la calidad del cuero obtenido es la requerida, superando los 20.000 ciclos en húmedo, según la Norma IUP 20.

Resultados de las etapas de Experimentación, posteriores a la pre-experimentación

Primera etapa: Análisis del agua residual del proceso de curtido.

En la Tabla 12 se presentan los resultados de los promedios de los análisis de los parámetros físico-químicos del agua residual del proceso de curtido de la curtiembre Pieles del Sur.

Tabla 12. Parámetros Físicoquímicos del agua residual de curtido

PARÁMETRO FÍSICOQUÍMICO	MÉTODO CÓDIGO SM	RESULTADO	MÁXIMO PERMISIBLE (DAMA, Resolución 1074 de 1997)

Cromo Total (mg/L) Quimia y Cian	3500 C (Absorción Atómica con llama)	2.475	1
Cromo Total (mg/L) Universidad Sto. Tomás	3500 B (Espectrofotometría)	2.465	1
DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L O ₂) Quimia y Cian	5220 C (Reflujo cerrado)	2.992	2.000
DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L O ₂) Universidad Sto. Tomás	5220 B (Reflujo abierto)	2.984	2.000
DBO ₅ : Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L O ₂) Universidad Sto. Tomás	5210 B (Incubación y electrodo de membrana)	1.740	1.000
pH Quimia y Cian	4500 B (Potenciometría)	4,0	5 – 9
pH Universidad Sto. Tomás	4500 B (Potenciometría)	4,0	5 – 9
Conductividad (µS/cm) Quimia y Cian	2510 B (Conductimetría)	47.500	-
Color Verdadero (Unidades Pt-Co) Quimia y Cian	2120 B (Colorimetría)	>500	75
Turbiedad (UNT) Quimia y Cian	2130 B (Turbidimetría)	553	50

Dureza Total (mg/L CaCO ₃) Quimia y Cian	2340 C (Titulación con EDTA)	1.764	500
Sólidos Totales (mg/L) Quimia y Cian	2540 B (Gravimetría)	69.103	-
Sólidos Disueltos (mg/L) Quimia y Cian	2540 C (Filtración Membrana / Gravimetría)	68.303	-
Sólidos Suspendedos (mg/L) Quimia y Cian	Cálculo	800	800

Fuente: Laboratorios Quimia y Cian y Laboratorio de Química Universidad Santo Tomás

Se puede observar, a partir de los resultados presentados en la Tabla 12, que el agua residual del proceso de curtido presenta elevada contaminación. El cromo se encuentra en un nivel promedio de 2.475 mg/L, muy superior al máximo permisible de 1 mg/L; de manera similar sucede con la materia orgánica o DQO con un valor de 2.992 mg/L, mayor a 2.000 mg/L y DBO de 1.740 mg/L, por encima de 1.000 mg/L. También se observa que el agua es muy ácida con pH 4.0 comparando con el rango permisible de 5 a 9. El color lo produce principalmente el elevado contenido de cromo disuelto en el agua.

Segunda etapa: Precipitación de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido con hidróxido de sodio

En la Tabla 13 se presenta la comparación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual antes y después de precipitar el cromo, y posteriormente tratada mediante floculación con policloruro o hidroxiclورو de aluminio y con hipoclorito de sodio para eliminar microorganismos y oxidar materia orgánica.

Tabla 13. Parámetros Fisicoquímicos del agua residual de curtido, descontaminada de cromo o agua sobrenadante y del agua tratada mediante proceso convencional

PARÁMETRO FISICOQUÍMICO	AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE CURTIDO	AGUA RESIDUAL DESCONTAMINADA DE CROMO SIN TRATAR	AGUA RESIDUAL DESCONTAMINADA DE CROMO Y TRATADA	MÁXIMO PERMISIBLE
Cromo Total (mg/L) Quimia y Cian	2.475	0,791	0,081	1
Cromo Total (mg/L) Universidad Sto.Tomás	2.465	0,720	0,076	1
DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L O ₂) Quimia y Cian	2.992	672	192	2.000
DQO: Demanda Química de Oxígeno (mg/L O ₂) Universidad Sto.Tomás	2.984	650	180	2.000
DBO ₅ : Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L O ₂) Universidad Sto.Tomás	1.740	460	91	1.000
pH Quimia y Cian	4,0	7,1	7,0	5 – 9
pH				

Universidad Sto.Tomás	4,0	7,1	7,0	5 – 9
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Quimia y Cian	47.500	35.600	15.798	-
Color Verdadero (Unidades Pt-Co) Quimia y Cian	>500	50	5	75
Turbiedad (UNT) Quimia y Cian	553	7,2	13	50
Dureza Total (mg/L CaCO_3) Quimia y Cian	1.764	8,4	8,4	500
Sólidos Totales (mg/L) Quimia y Cian	69.103	47.536	14.469	-
Sólidos Disueltos (mg/L) Quimia y Cian	68.303	47.536	14.469	-
Sólidos Suspendidos (mg/L) Quimia y Cian	800	0.00	0.00	800

A partir de los resultados presentados en la Tabla 13, se pueden comparar los parámetros físico-químicos del agua residual con los del agua sobrenadante y con los de esta última tratada con floculante y cloro.

Se observa la elevada contaminación de las aguas residuales del proceso de curtido y la disminución significativa de cromo por precipitación con hidróxido de sodio 4 M, reduciendo su concentración por debajo del límite máximo permisible de 1 mg/L en el agua sobrenadante y por consiguiente en esta misma tratada con floculante y cloro. Se necesitó en promedio 4,1 mL de soda cáustica 4 M para alcanzar pH de 9 en 100 mL de agua residual.

El pH inicial de 9 en el agua residual, proporciona exceso de iones hidroxilo, OH^- , que reaccionan con los iones Cr^{+3} produciendo el precipitado de hidróxido de cromo, mediante la reacción:



Después de 24 horas, se obtiene la sedimentación del hidróxido de cromo y los iones OH^- que estaban en exceso han sido agotados en la reacción con el cromo.

La filtración inicial del agua residual con filtro de Malla 100 (código Mesh) de acero inoxidable, reduce significativamente el contenido de sólidos en suspensión, en un 96% determinado por pre-experimentación, y la precipitación de cromo con soda cáustica produce a su vez la precipitación total de sólidos en suspensión. La reducción de materia orgánica, DQO, de la DBO_5 , color verdadero, turbiedad y dureza se reducen por debajo de los límites máximos permisibles para vertimientos. La conductividad y los sólidos disueltos también se reducen en proporción significativa y el pH se encuentra entre el rango permisible de 5 a 9.

Además el agua residual, después de precipitar el cromo, puede ser reutilizada después de un tratamiento convencional con policloruro de aluminio como floculante y con hipoclorito de sodio que oxida materia orgánica y microorganismos, reduciendo significativamente el elevado consumo de agua en las curtiembres en el proceso de lavado de las pieles saladas que ingresan al proceso, debido a que tienen elevado contenido de materia orgánica conformada por sangre, excrementos y grasa principalmente, produciendo en esta parte agua residual con contenido de DBO mayor a 10.000 mg/L de O_2 , reduciendo el consumo de 12 m^3 aproximadamente a 9 m^3 , por reutilización de 3 m^3 de agua, lo que representa una disminución de 25 % en el consumo de agua en esta parte del proceso. El alumbre como floculante no presentó resultados favorables; el policloruro de aluminio presentó resultados de floculación en corto tiempo y con elevada eficiencia en concentración de 30 ppm. La turbiedad se redujo de 7 UNT a 2 UNT; además este fue el ensayo donde se observó mayor formación de flóculos. Esto se debe, posiblemente a la naturaleza orgánica de la contaminación que aún está presente después de precipitar el cromo, donde el alumbre es más apto para flocular componentes más polares y el policloruro al presentar en su

molécula una parte no polar, tiene mayor capacidad para flocular componentes orgánicos que en general son poco polares. El hipoclorito de sodio presentó buena eficiencia para oxidar materia orgánica, lo cual se refleja en la reducción de DQO, y además elimina microorganismos, dosificado al 13% peso/volumen ajustando su concentración inicial a 50 ppm en el agua a tratar. Esto se determinó por pre-experimentación, mediante el análisis de demanda de cloro. La principal función del hipoclorito de sodio es reducir o eliminar microorganismos; sin embargo, también es utilizado como oxidante. En algunas aplicaciones se utiliza el hipoclorito de sodio como oxidante para tratamiento de aguas. Uno de los mecanismo mediante el cual actúa el hipoclorito de sodio para eliminar microorganismos, es por oxidación de la pared celular de éstos (Yagûe, 2007).

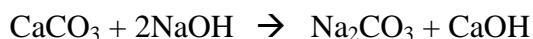
El hidróxido de sodio es un compuesto polar y por consiguiente no puede reaccionar con la materia orgánica para precipitarla, debido a que ésta es no polar. Sin embargo, la reducción de DQO de 2.992 a 672 mg/L de O₂ por acción del hidróxido de sodio, se debe a la capacidad oxidante del ion hidroxilo, que aparece en los intermedios de reacción de muchos procesos de oxidación (Yagûe, 2007).

Los procesos de oxidación avanzada utilizan combinaciones de oxidantes u oxidantes con luz ultravioleta. Algunos autores definen los procesos de oxidación avanzada como aquellos procesos que implican la formación de radicales hidroxilo, OH[•], de elevado potencial de oxidación (2,6 Voltios). La gran reactividad del radical hidroxilo hace que esta especie sea extremadamente inestable y reactiva. En estos procesos la velocidad de reacción es lo suficientemente rápida como para que con instalaciones no excesivamente grandes, se obtengan buenos rendimientos de oxidación (Yagûe, 2007).

Son muchos y diversos los compuestos orgánicos susceptibles de ser eliminados o degradados por oxidación con radicales hidroxilo generados en procesos de oxidación avanzada. El potencial de reducción del ion hidroxilo es muy cercano al del flúor (3,06 Voltios) y está por encima del resto de los oxidantes empleados en tratamientos químicos convencionales: ozono (2,08 Voltios), peróxido de hidrógeno (1,78 Voltios), ácido hipocloroso (1,49 Voltios) y cloro (1,36 Voltios) (Yagûe, 2007).

El radical hidroxilo reacciona rápidamente y de forma no selectiva con muchos compuestos orgánicos por la hidrogeno-abstracción y adición a los enlaces C-C insaturados (Yagüe, 2007).

La dureza se redujo en promedio de 1.764 hasta 8,3 mg/L de CaCO₃ por acción del hidróxido de sodio. La acción de la soda cáustica produce un precipitado de cal o hidróxido de sodio, que reduce la dureza del agua, según la siguiente reacción:



Tercera etapa: Regeneración de la sal de cromo utilizando tres tipos de ácido.

La matriz experimental y los resultados obtenidos, se muestran a en la Tabla 14.

Tabla 14. Porcentaje de encogimiento de la piel después del proceso de curtido

Tipo de ácido					
Fórmico		Acético		Cítrico	
0.0	0.0	10.5	11.0	10.0	10.5

Como se observa en la Tabla 14, solamente el ácido fórmico presentó buenos resultados, mostrando combinación del cromo con las cadenas peptídicas del colágeno de la piel, lo que se manifiesta en el nulo encogimiento del cuero. Los ácidos acético y cítrico presentan elevado porcentaje de encogimiento, siendo cero el requerido para cuero destinado a calzado colegial o para confección.

Estos resultados muestran que el ácido fórmico, por ser el de cadena más corta de los tres ácidos, es el que presenta mayor ionización y por consiguiente alcanza a proporcionar los iones hidrogeniones necesarios para reaccionar con el precipitado de hidróxido de cromo y

formar la sal sulfato básico de cromo. Los ácidos acético y cítrico de cadena más larga y por consiguiente con menor capacidad de ionización, no alcanzan a suministrar los iones hidrogeniones requeridos para la formación de la sal de cromo, presentando elevado porcentaje de encogimiento del cuero.

Cuarta etapa: Diseño experimental para determinar la calidad del cuero obtenido, mezclando sal de cromo regenerada con ácido fórmico y sal de cromo comercial.

Las pieles correspondientes a todos los ensayos pasaron la prueba de encogimiento según la Norma IUP 16 y fueron sometidas a los procesos de recurtido, acabado y teñido, después de los cuales se les realizó la prueba de resistencia a la flexión en húmedo en los laboratorios de análisis de Tauroquímica, según la Norma IUP 20 con flexómetro Bally.

La matriz experimental y los resultados obtenidos, se muestran en la Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 15. Porcentaje de encogimiento de la piel después del proceso de curtido

Tipo de cuero	Porcentaje sulfato básico de cromo regenerado/ Porcentaje sulfato básico de cromo comercial utilizado en el proceso de curtido						
	30/70		35/65		40/60		Cromo Re-reutilizado 40/60
Calzado colegial	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Confección	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 16. Resistencia a la flexión en húmedo del cuero terminado

Tipo de cuero	Porcentaje sulfato básico de cromo regenerado/ Porcentaje sulfato básico de cromo comercial utilizado en el proceso de curtido					
	30/70	35/65		40/60		Cromo Re-reutilizado 40/60
Calzado colegial	>20000	>20000	>20000	>20000	>20000	>20000
Confección	>20000	>20000	>20000	>20000	>20000	>20000

En la Tabla 15 se observa que las pieles curtidas utilizando todas las mezclas ensayadas de sulfato básico de cromo regenerado con sulfato básico de cromo comercial no presentaron encogimiento, lo que significa que la absorción de cromo fue suficiente para evitar la degradación de éstas.

Los resultados de resistencia a la flexión que se muestran en la Tabla 14, indican que la calidad del cuero obtenido mezclando las sales de cromo regenerado y comercial, es la requerida, superando los 20.000 ciclos en húmedo.

Quinta etapa:

ESTUDIO DE SOSTENIBILIDAD

Diseño del proceso y dimensionamiento de la planta piloto para la realización de los diseños experimentales

A. Bombeo desde el bombo de curtición

Para trasladar el agua residual del proceso de curtido desde el bombo hasta el filtro, se necesita una bomba para lodos que tiene capacidad suficiente para trasportar el agua con elevado contenido de sólidos en suspensión, sin taponarse.

La ecuación para el cálculo de la potencia de la bomba es:

$$W = \frac{\rho q g z}{\eta} \quad 8)$$

donde:

ρ es densidad en kg/L

q es caudal en L/s

g es la aceleración debida a la gravedad en m/s^2

z es la altura a la que la bomba alcanza a elevar el fluido, en m

η es la eficiencia de la bomba en fracción

La densidad del agua residual es aproximadamente de 1.02 kg/L.

El caudal, q , se calcula para un volumen de agua residual de 500 L que debe pasar por el filtro en 2 minutos, como se muestra en la Ecuación siguiente:

$$q = \frac{500 \text{ L}}{2 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 4.17 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

La altura a la que se elevará el agua residual es de 1.5 m.

La eficiencia de la bomba es de 40 % aproximadamente, según información de los fabricantes suministrada en catálogos, que equivale a un coeficiente de la bomba, $CB = 1/0.40 = 2.5$

La potencia de la bomba requerida se calcula en la Ecuación siguiente:

$$W = \frac{1.02 \frac{\text{kg}}{\text{L}} * 4.17 \frac{\text{L}}{\text{s}} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1.5 \text{ m}}{0.4} = 156.35 \text{ Watt}$$

Convirtiendo a hp, en la siguiente Ecuación se obtiene:

$$W = 156.35 \text{ Watt} * \frac{1 \text{ hp}}{746 \text{ Watt}} = 0.21 \text{ hp}$$

Se elige la bomba para lodos más cercana y con mayor potencia que 0.21 hp, disponible en el mercado, que es de ¼ de hp, plástica o de acero inoxidable por el pH ácido del agua. Las especificaciones son: diámetro de la tubería de descarga de 1.5 pulgadas, altura máxima 7 m, 1500 rpm, 110 V.

B. Precipitación de hidróxido de cromo del agua residual del proceso de curtido

Para el tratamiento de 500 L de agua residual, se requiere de un tanque de mayor capacidad para la adición del hidróxido de sodio y es recomendable dejar espacio libre encima del nivel superior del agua para el mezclado en el proceso de homogenización. Por estas razones se seleccionó un tanque de 1000 L de capacidad, de polietileno de alta densidad, resistente al ataque por ácidos y bases, ya que el agua residual del proceso de curtido tiene pH aproximadamente de 4 y la adición de hidróxido de sodio cambia inicialmente el pH hasta 9. Las especificaciones del tanque de 1000 L son: diámetro inferior 91 cm, diámetro superior 119 cm, altura sin tapa 131 cm.

C. Separación y tratamiento del agua sobrenadante después de la precipitación del hidróxido de cromo

Se requiere una bomba de extracción del agua sobrenadante, no sumergible, para evitar que nuevamente se mezclen el precipitado de hidróxido de cromo y el agua sobrenadante. El cálculo de su potencia es similar al cálculo de la bomba para lodos. Si se mantiene el mismo caudal, al tener menor cantidad de agua, se requiere menos tiempo para su traslado hasta el tanque de tratamiento. Entonces se puede seleccionar una bomba de extracción, no sumergible, de ¼ de hp, plástica o de acero inoxidable, por el entorno corrosivo. Las especificaciones son: diámetro de la tubería de descarga de 3/4 pulgadas, altura máxima 16 m, caudal máximo 60 L/min, 3500 rpm, 110 V.

El volumen obtenido de agua sobrenadante varía según la concentración de hidróxido de sodio adicionado, sin embargo siempre es inferior al volumen de agua residual tratada de 500 L. Por este motivo se escogió un tanque de polietileno de alta densidad de 500 L de

capacidad, para disponer de volumen adicional para la adición de floculante y la agitación requerida. Las especificaciones del tanque de 500 L son: diámetro inferior 78 cm, diámetro superior 98 cm, altura sin tapa 92 cm.

D. Regeneración de cromo para su reutilización en el proceso de curtido

El proceso se realiza en el mismo tanque de 1000 L que contiene el hidróxido de cromo precipitado.

E. Contenedores de soda cáustica y de ácido fórmico

Para un volumen de agua residual de 500 L con un contenido aproximado de 2500 mg/L de cromo, se requiere la siguiente cantidad de hidróxido de sodio y de ácido fórmico:



Con base en la reacción anterior, el hidróxido de sodio, NaOH, del 98 % de pureza, necesario solamente para reaccionar con el cromo, se calcula en la Ec. (12):

$$\text{NaOH} = 2.500 \frac{\text{mg Cr}}{\text{L agua}} * 500 \text{ L agua} * \frac{3 * 40 \text{ g NaOH}}{52.000 \text{ mg Cr}} * \frac{100}{98} = 2.943,5 \text{ g} \quad (12)$$

Más el NaOH necesario para neutralizar el pH del agua residual que es de aproximadamente 4, calculado en la Ec. (13):

$$\text{NaOH} = 1 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 500 \text{ L} * \frac{40 \text{ g}}{\text{mol}} * \frac{100}{98} = 2,0 \text{ g} \quad (13)$$

$$\text{NaOH Total para precipitar el cromo y neutralizar los iones } H^+ = 2.945,5 \text{ g}$$

Debido a la presencia de dureza y materia orgánica en el agua residual, la cantidad de solución de hidróxido de sodio requerida fue mayor a la calculada. El volumen de soda cáustica 4 M requerido experimentalmente se determinó solamente en laboratorio en laboratorio; para los ensayos en la planta se tomó como base la proporción hallada experimentalmente a nivel laboratorio.

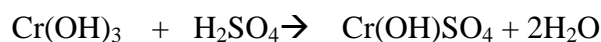
En promedio se necesitó experimentalmente 4,1 mL de NaOH para precipitar el cromo de 100 mL de agua residual. Por consiguiente, la masa de NaOH del 98 %, requerida para tratar 500 L de agua residual, se presenta en la Ec. (14):

$$NaOH_{experimental} = \frac{4,1 \text{ mL}}{0,1 \text{ L agua}} * 500 \text{ L agua} * \frac{4*40 \text{ g NaOH}}{1000 \text{ mL}} * \frac{100}{98} = 3.346,9 \text{ g} \quad (14)$$

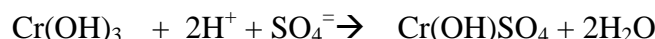
El cálculo del volumen que ocupará la solución de hidróxido de sodio de concentración 4 M, se muestra en la Ec. (15):

$$Volumen \text{ de NaOH } 4 \text{ M requerido} = 3.346,9 \text{ g} * \frac{1 \text{ L}}{4*40 \text{ g}} * \frac{98}{100} = 20,5 \text{ L} \quad (15)$$

El ácido fórmico teórico que se requiere, del 85 % en peso, se calcula en la Ec. (16) con base en la siguiente reacción (Blackman, 2005):



En este caso el ácido sulfúrico se reemplaza por ácido fórmico que suministra los iones hidrogeniones H^+ y sulfato de sodio que proporciona los iones sulfato SO_4^- , mediante la siguiente reacción:



Por consiguiente el ácido fórmico teórico del 85 % en peso, densidad 1.22 g/L y peso molecular 46 g/mol requerido es:

$$\text{Masa de HCOOH teórico} = 2.500 \frac{\text{mg Cr}}{\text{L agua}} * 500 \text{ L agua} * \frac{46*2 \text{ g HCOOH}}{52.000 \text{ mg Cr}} * \frac{100}{85} = 2.601,8 \text{ g} \quad (16)$$

A partir de la Ec. (17) se obtiene el volumen necesario de ácido fórmico teórico, HCOOH, concentrado de densidad 1.22 kg/L:

$$\text{Volumen HCOOH teórico} = 2.601,8 \text{ g} * \frac{1 \text{ L}}{1,22 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} = 2,13 \text{ L} \quad (17)$$

El volumen de ácido fórmico requerido se determinó experimentalmente a nivel planta piloto, debido a que a partir de este diseño experimental se regeneró la sal de cromo para curtir una piel, requiriendo 800 g de sal de cromo total para cada ensayo.

En promedio fue necesario utilizar 2,25 L para regenerar el precipitado de hidróxido de cromo obtenido a partir de 500 L de agua residual. La diferencia se debe al contenido de materia orgánica que es oxidada por los iones hidrogeniones del ácido. El porcentaje en exceso de ácido requerido se calcula en la Ec. (18).

$$\% \text{HCOOH requerido en exceso respecto al teórico} = \frac{2,25-2,13}{2,13} * 100 = 5,6 \% \quad (18)$$

La masa de ácido fórmico requerida experimentalmente para regenerar el hidróxido de cromo obtenido a partir de 500 L de agua residual, se calcula en la Ec. (19) a partir del porcentaje en exceso de ácido requerido.

$$\text{Masa de HCOOH requerido experimentalmente} = 2.601,8 * 1,056 = 2.747,5 \text{ g} \quad (19)$$

Por consiguiente, para preparar las soluciones de hidróxido de sodio se seleccionó un tanque de 30 L de polipropileno de alta densidad y el ácido fórmico se dosificó al 85 %, sin diluir, por lo que no se requiere un tanque adicional, siendo suficiente el recipiente de polipropileno de alta densidad de un galón de capacidad, donde se adquiere el ácido envasado directamente en el comercio.

La masa de sulfato de sodio teórico de peso molecular 142 requerida se muestra en la Ec. (20):

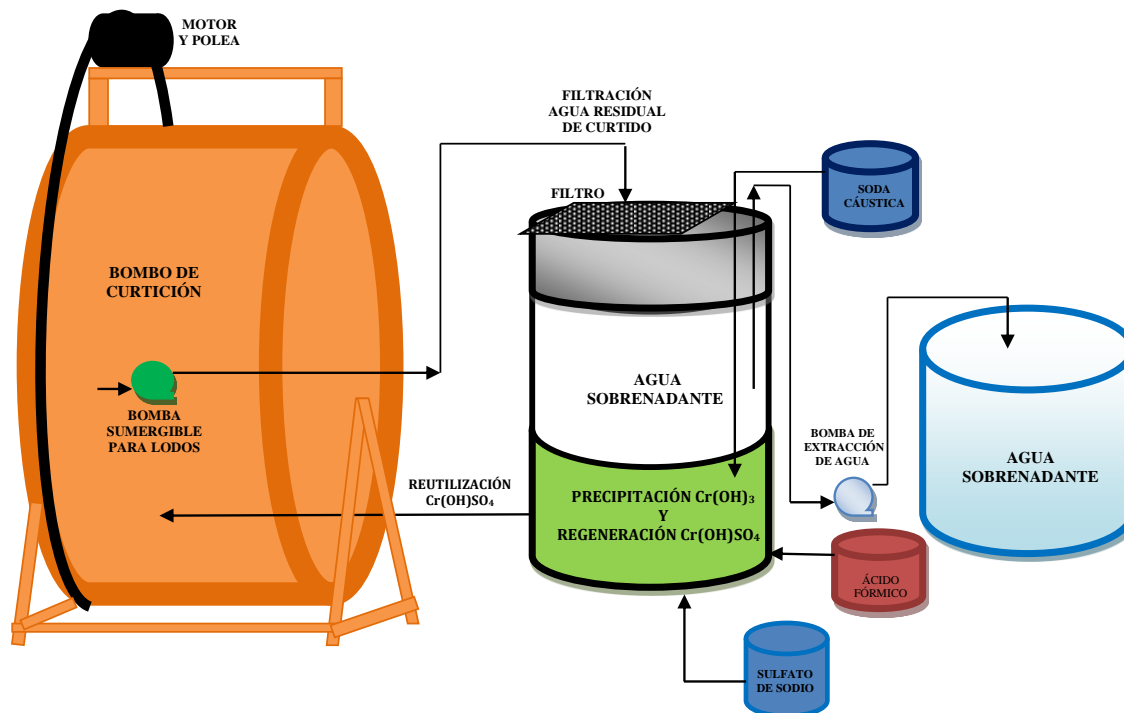
$$\text{Na}_2\text{SO}_4 = 2.500 \frac{\text{mg Cr}}{\text{L agua}} * 500 \text{ L agua} * \frac{142 \text{ g Na}_2\text{SO}_4}{52.000 \text{ mg Cr}} = 3.413,46 \text{ g} \quad (20)$$

La masa de sulfato de sodio experimental, se calculó a partir del ácido fórmico experimental, debido a que no se tenía otro parámetro base como el pH, que sí era el indicador del punto final al adicionar la soda al agua residual hasta obtener pH 9 y el ácido fórmico hasta pH 3,5 al precipitado de hidróxido de cromo. El cálculo se muestra en la Ec. 21:

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ requerido experimentalmente} = 3.413,46 \text{ g} * 1,056 = 3.604,6 \text{ g} \quad (21)$$

La planta necesaria para el proceso de recuperación y reutilización del cromo de las aguas residuales del proceso de curtido se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Planta requerida para el proceso de recuperación de cromo de las aguas residuales del proceso de curtido, regeneración y reutilización en el mismo proceso



Fuente: Autora

Estudio Económico para recuperar cromo de 500 L de agua residual del proceso de curtido, regenerarlo y reutilizarlo nuevamente para curtir pieles:

El estudio económico se realizó inicialmente, tomando como base de cálculo 500 L de agua residual del proceso de curtido, que fue la misma base tomada para el dimensionamiento de la planta piloto. Posteriormente se realizó el estudio económico del cromo recuperado por cada lote de 100 pieles curtidas, relacionando el volumen de agua residual generada en el proceso de curtido de cada lote de 100 pieles, con los cálculos realizados por cada 500 L de agua residual.

Soda cáustica del 98% para precipitar cromo de 500 L de agua residual = 3.346,9 g

*Ácido Fórmico del 85% para regenerar el cromo obtenido de 500 L de agua residual
= 2.747,5 g*

*Sulfato de sodio para regenerar el cromo obtenido de 500 L de agua residual
= 3.604,6 g*

La cantidad de sulfato básico de cromo obtenido del agua residual, se calcula como se muestra a continuación, tomando como base un valor promedio de 2475 mg/L de cromo en el agua residual menos 1 mg/L que puede retener el agua sobrenadante:

$$Cr(OH)SO_4 = 2.474 \frac{mg Cr}{L} * 500 L agua * \frac{165 g Cr(OH)SO_4}{52.000 mg Cr} = 3.925,1 g$$

Por consiguiente,

*Sulfato básico de cromo regenerado obtenido de 500 L de agua residual de curtido
= 3.925,1 g*

Costos de estas materias primas:

$$Soda cáustica grado industrial del 98\% = \frac{\$2.714,4}{kg}$$

Produquímica S. A.

$$\text{Ácido fórmico grado industrial del 85\% en peso} = \frac{\$2.000}{kg}$$

Suminter, S. L.

$$Sulfato de sodio anhidro grado industrial del 99\% = \frac{\$533}{kg}$$

Manufacturas Silíceas S. A. S.

$$\text{Sulfato básico de cromo grado industrial} = \frac{\$4.640}{kg}$$

Químicos y Acabados

Costo de las cantidades necesarias de materias primas para recuperar cromo de 500 L de agua residual de curtido:

$$\text{Soda cáustica} = 3,35 \text{ kg} * \frac{\$2.714,4}{kg} = \$9.093,2$$

$$\text{Ácido fórmico} = 2,75 \text{ kg} * \frac{\$2.000}{kg} = \$5.500$$

$$\text{Sulfato de sodio anhidro} = 3,6 \text{ kg} * \frac{\$533}{kg} = \$1.918,8$$

$$\text{Ahorro por sulfato básico de cromo obtenido} = 3,9 \text{ kg} * \frac{\$4.640}{kg} = \$18.096$$

$$\text{Ahorro por 500 L de agua tratada} = \$18.096 - \$9.093,2 - \$5.500 - \$1.918,8 = \$1.584$$

Ahorro en materias primas por cada lote de 100 pieles curtidas:

Para curtir una piel sin pelo, se utilizan aproximadamente entre 700 g y 900 g de sal de cromo, dependiendo del proceso adaptado por cada curtidor.

Por consiguiente, para 100 pieles, que es una cantidad utilizada habitualmente en los bombos de curtido a nivel industrial, con base en 800 g de sal de cromo por piel, se requieren las siguientes cantidades de estas materias primas:

$$\text{Sal de cromo Total} = 0,8 \frac{kg}{piel} * 100 \text{ pieles} = 80 \text{ kg}$$

$$\text{Sal de cromo comercial} = 60\% \text{ de sal de cromo Total} = 0,6 * 80 \text{ kg} = 48 \text{ kg}$$

$$\text{Sal de cromo regenerada} = 40\% \text{ de sal de cromo Total} = 0,4 * 80 \text{ kg} = 32 \text{ kg}$$

$$\text{Soda cáustica necesaria} = 32 \text{ kg sal de cromo} * \frac{3,35 \text{ kg soda}}{3,9 \text{ kg de sal de cromo}} = 27,5 \text{ kg}$$

$$\text{Ácido fórmico requerido} = 32 \text{ kg sal de cromo} * \frac{2,75 \text{ kg soda}}{3,9 \text{ kg de sal de cromo}} = 22,6 \text{ kg}$$

$$\text{Sulfato de sodio anhidro} = 32 \text{ kg sal de cromo} * \frac{3,60 \text{ kg soda}}{3,9 \text{ kg de sal de cromo}} = 29,5 \text{ kg}$$

Costos de estas materias primas para curtir 100 pieles:

$$\text{Soda cáustica} = 27,5 \text{ kg} * \frac{\$2.714,4}{\text{kg}} = \$74.646$$

$$\text{Ácido fórmico} = 22,6 \text{ kg} * \frac{\$2.000}{\text{kg}} = \$45.200$$

$$\text{Sulfato de sodio anhidro} = 29,5 \text{ kg} * \frac{\$533}{\text{kg}} = \$15.723,5$$

$$\text{Ahorro de sal sulfato básico de cromo obtenido} = 32 \text{ kg} * \frac{\$4.640}{\text{kg}} = \$148.480$$

Ahorro en materias primas por curtición de 100 pieles

$$= \$148.480 - \$74.646 - \$45.200 - \$15.723,5 = \$12.910,5$$

Costo sulfato básico de cromo comercial para 100 pieles, sin recuperar el cromo

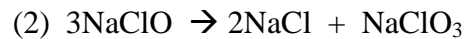
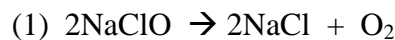
$$= 80 \text{ kg sal de cromo} * \frac{\$4.640}{\text{kg sal de cromo}} = \$371.200$$

Ahorro de agua en cada lote de 100 pieles:

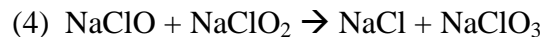
El agua sobrenadante puede ser reutilizada, después de un tratamiento convencional con policloruro de aluminio como floculante y con hipoclorito de sodio para oxidar materia orgánica y eliminar microorganismos. El agua se puede reutilizar en el proceso de lavado de las pieles saladas que ingresan al proceso, debido a que en esta etapa la materia orgánica de las pieles es elevada por contener sangre, excrementos, grasas; por consiguiente el contenido de DBO del agua residual sin cromo y tratada de 91 mg/L de O₂ es relativamente bajo respecto a la del agua residual de lavado que puede superar los 10.000 mg/L de O₂ de

DBO. Además un nivel de 91 mg/L de DBO está por debajo del límite máximo permisible de 1.000 ppm según la Resolución 1074 del DAMA.

Para el hipoclorito de sodio, NaClO, el término “contenido de cloro disponible”, también denominado cloro activo, compara el poder oxidante del agente con aquel de la cantidad equivalente de cloro elemental empleado para hacer la solución. Las soluciones de Hipoclorito de Sodio se descomponen de dos maneras: formando cloruro de sodio, NaCl, y oxígeno, O₂, (reacción 1), o por desproporcionamiento produciendo cloruro de sodio y clorato de sodio, NaClO₃ (reacción 2):



La última de estas dos reacciones ocurre en dos pasos: un paso lento inicial en que se forma el clorito de Sodio (NaClO₂) (reacción 3), y un paso rápido de desproporcionamiento entre el Hipoclorito y el clorito (reacción 4):



El oxígeno, O₂, y el clorato de sodio, NaClO₃, son oxidantes, razón por la cual el hipoclorito de sodio puede utilizarse como agente oxidante (<http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia18.pdf>).

(Yagüe, 2007) En el mecanismo más simple de oxidación del hipoclorito de sodio, se produce hidróxido de sodio que ejerce una importante acción oxidante, mediante la siguiente reacción:



El agua recuperada, de acuerdo con los resultados experimentales, es en promedio del 73.2% en volumen del agua residual tratada. Así, el volumen de agua recuperada a partir del agua residual del proceso de **curtido de 100 pieles**, es:

$$\text{Volumen agua recuperada} = 0,732 * \frac{500 L}{3,9 kg sal} * 32 kg sal = 3.003,1 L = 3 m^3$$

Este volumen de agua es recuperado, partiendo de un volumen de agua residual de:

$$\text{Volumen agua residual tratada} = \frac{500 L}{3,9 kg sal} * 32 kg sal = 4,102.6 L = 4,1 m^3$$

$$\text{Costo aproximado consumo agua sector industrial} = \frac{\$3.200}{m^3}$$

$$\text{Ahorro agua} = 3 m^3 * \frac{\$3.200}{m^3} = \$9.600$$

Costo floculante para tratar 3 m³ de agua recuperada (dosificación de 30 ppm)

$$= 3 m^3 * \frac{\$7.200}{kg} * \frac{30 g floculante}{m^3 agua} * \frac{1 kg}{1.000 g} = \$648$$

Costo hipoclorito de sodio para tratar 3 m³ de agua recuperada (dosificación de 50 ppm)

$$= 3 m^3 * \frac{\$9.000}{kg} * \frac{50 g floculante}{m^3 agua} * \frac{1 kg}{1.000 g} = \$1.350$$

$$\text{Ahorro por recuperar y reutilizar agua} = \$9.600 - \$648 - \$1.350 = \$7.602$$

Ahorro por materias primas y por recuperar y reutilizar agua por cada lote de 100 pieles

$$= \$12.910,5 + \$7.602 = \$20.512,5$$

Ahorro por tasa retributiva en cada lote de 100 pieles:

A partir de la Resolución 372 de mayo de 1998 y el Decreto 3440 de octubre 21 de 2004, se actualizan las tarifas mínimas de las tasas retributivas por vertimientos líquidos para DBO y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Con base en las tarifas para el año 2013 (DBO=\$116.29/Kg y SST=\$49.74/Kg), se calculan los pagos por tasa retributiva por lote de 100 pieles curtidas, tomando como base para el cálculo el volumen y el contenido de DBO del agua residual vertida sin implementación de la recuperación del cromo; implementando el proceso de recuperación de cromo, el agua sería reutilizada en un proceso en el cual la materia orgánica residual es del orden de 10.000 mg/L o aún mayor, que corresponde al agua de lavado inicial de las pieles con sal, sangre, excrementos, grasa.

$$DBO = \frac{1.740 \text{ g}}{\text{m}^3 \text{ agua}} * 4,1 \text{ m}^3 \text{ agua} = 7.134 \text{ g}$$

$$\text{Costo DBO} = \frac{\$116,29}{\text{kg}} * \frac{1.740 \text{ g}}{\text{m}^3 \text{ agua}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} * 4,1 \text{ m}^3 \text{ agua} = \$829,6$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales} = \frac{800 \text{ g sólidos}}{\text{m}^3 \text{ agua}} * 4,1 \text{ m}^3 \text{ agua} = 3.280 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo Sólidos Suspendidos Totales} &= \frac{\$49,74}{\text{kg}} * \frac{800 \text{ g sólidos}}{\text{m}^3 \text{ agua}} * \frac{1 \text{ kg}}{1.000 \text{ g}} * 4,1 \text{ m}^3 \text{ agua} \\ &= \$39,8 \end{aligned}$$

Costo mano de obra por cada lote de 100 pieles: Se requieren aproximadamente 2 horas de trabajo de un operario para recuperar y reutilizar cromo para un lote de 100 pieles. Partiendo del salario mínimo mensual de \$589.500 más el auxilio de transporte de \$70.500, para un total de \$660.000 mensuales, la prima de servicios semestral que equivale a 8,33 % del salario mensual, las cesantías que representan también 8,33 % del salario mensual incluyendo el auxilio de transporte para el cálculo, 12 % de intereses sobre las cesantías que equivalen a 1 % del salario, vacaciones que representan el 4,17 % del salario sin incluir el auxilio de transporte para realizar el cálculo, aportes al sistema de seguridad social de 8,5 % del salario para salud y 12 % de éste para pensión, aproximadamente 1 % del salario para riesgos profesionales, los pagos parafiscales correspondientes a 4 % para caja de compensación familiar, 3 % para el Instituto de Bienestar Familiar y 2 % para el SENA (<http://www.finanzaspersonales.com.co/home>); considerando que un operario labora 48 horas a la semana y tomando 4 semanas aproximadamente por mes, se calcula el costo por mano de obra por cada lote:

$$\text{Costo salario básico 2 horas mano de obra} = \frac{\$660.000}{48 * 4 \text{ horas}} * 2 \text{ horas} = \$6.875$$

Más costo por prestaciones sociales:

$$\left(\frac{8,33 + 8,33 + 1}{100} * \$660.000\right) + \left(\frac{4,17 + 8,5 + 12 + 1 + 4 + 3 + 2}{100} * \$589.500\right)$$

$$= \frac{\$320.935,65}{48 * 4 \text{ horas}} * 2 \text{ horas} = \$3.343$$

$$\text{Costo Total 2 horas mano de obra} = \$6.875 + \$3.343 = \$10.218$$

Ahorro Total por lote de 100 pieles:

$$\text{Ahorro Total por cada lote de 100 pieles} = \$20.512,5 + \$829,6 + \$39,8 - \$10.218$$

$$= \$11.163,9$$

Costos Equipos requeridos a nivel industrial:

El filtro se coloca sobre el tanque donde se precipitará el cromo, que requiere una capacidad mayor a 4,1 m³. En el comercio se consigue de 5.000 L de capacidad con diámetro superior de 2,07 m.

El filtro se distribuye por metro de ancho y en longitud de un múltiplo de 25 cm, por lo que se necesita 2,25 m para ubicar el filtro sobre el tanque.

$$\text{Filtro de malla 100 (Mash) en acero inoxidable} = \frac{\$52200}{\text{m lineal}} * 2.25 \text{ m} = \$117450$$

$$\text{Tanque polietileno de alta densidad de 5000 L para precipitar y regenerar cromo} = \$2'043,500$$

$$\text{Tanque polietileno alta densidad de 4000 L para separar y tratar agua recuperada} = \$1'485,000$$

$$\text{Capacidad tanque polietileno alta densidad para soda cáustica 4 M} =$$

$$\frac{20,5 \text{ L soda}}{500 \text{ L agua}} * 4.100 \text{ L agua} = 168,1 \text{ L soda}$$

Entonces, se selecciona un tanque de 250 L, para la soda cáustica.

$$\text{Costo tanque polietileno alta densidad para soda cáustica 4 M} = \$73500$$

$$\text{Capacidad tanque polietileno alta densidad para ácido fórmico} =$$

$$\frac{2,25 \text{ L ácido}}{500 \text{ L agua}} * 4.100 \text{ L agua} = 18,45 \text{ L ácido}$$

El ácido fórmico se distribuye en garrafas de 100 L o en galones, por lo cual no se requiere un tanque adicional al del envase de distribución.

Bomba para lodos de $\frac{1}{2}$ hp plástica Pedrollo = \$590000

Bomba para extracción de agua recuperada (no sumergible) de $\frac{1}{2}$ hp plástica Pedrollo = \$360000

Elementos de seguridad, adicionales a los ya existentes en la planta, para manejo de Ácido Fórmico y de Soda Cáustica:

Ducha lavaojos = \$75900

Máscara con cartuchos para ácido = \$56899

COSTO TOTAL EQUIPOS Y ELEMENTOS ADICIONALES DE SEGURIDAD = \$4'802.249

En la Tabla 17 se presentan costos y ahorro por insumos, mano de obra, agua y tasa retributiva.

Tabla 17. Análisis Económico Costo/Beneficio por la implementación del proceso por cada lote de 100 pieles

FACTOR	CANTIDAD	COSTO UNITARIO(\$)	COSTO TOTAL (\$)	AHORRO (\$)
Soda Cáustica	27,5 Kg	2.714,4/Kg	74.646	-
Ácido Fórmico	22,6 Kg	2.000/Kg	45.200	-
Sulfato de sodio	29,5 Kg	533/Kg	15.723,5	
Floculante	90 g	7.200/Kg	648	-
Hipoclorito de sodio	150 g	9.000/Kg	1.350	-
Mano de obra	2 horas	3.385,5	10.218	-
Sal de Cromo Recuperada	32 Kg	4.640/Kg	-	148.480
Agua Recuperada	3 m ³	3.200/m ³	-	9.600
Tasa Retributiva	DBO ₅ 7.134 g	116,29/Kg	-	829,6
	SST 3.280 g	49,74/Kg	-	39,8
TOTALES			147.785,5	158.949,4
AHORRO NETO			-	11.163,9

En la Tabla 18 se presentan los costos por equipos y elementos adicionales de seguridad.

Tabla 18. Costo Equipos y Elementos Adicionales de Seguridad

EQUIPO O ELEMENTO DE SEGURIDAD	COSTO (\$)
Filtro Malla 100 (Mash)	117.450
Tanque polietileno alta densidad 5000 L	2'043.500
Tanque polietileno alta densidad 4000 L	1'485.000
Tanque polietileno alta densidad 250 L	73.500
Bomba sumergible ½ hp para lodos plástica	590.000
Bomba extractora agua (no sumergible) ½ hp plástica	360.000
Ducha Lavaojos	75.900
Máscara con cartuchos para ácido	56.899
TOTAL	4'802.249

COSTO TOTAL EQUIPOS Y ELEMENTOS ADICIONALES DE SEGURIDAD = \$4'802.249

Así, la inversión por equipos sería recuperada procesando el siguiente número de lotes de 100 pieles cada uno:

$$\$4'802.249 * \frac{1 \text{ lote de } 100 \text{ pieles}}{\$11.163,9} = 430,2 \text{ lotes de } 100 \text{ pieles cada uno}$$

En una curtiembre mediana se pueden realizar entre 15 y 20 lotes de 100 pieles mensualmente, lo que equivale aproximadamente a 200 lotes anuales. Esto indica que en un período aproximado de **dos años**, se podría recuperar la inversión inicial para implementar el proceso de recuperación y reutilización del cromo del agua residual de curtido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvo una reducción de la concentración de cromo mayor a 99,90 % desde niveles en promedio de 2.475 mg/L hasta niveles inferiores a 1,0 mg/L que corresponde a la concentración máxima permisible. La reducción de la concentración de cromo fue de 99,97 % correspondiente a una concentración de cromo de 0,791 mg/L en el agua descontaminada de cromo sin tratar y de 99,99 % correspondiente a 0,081 mg/L en esta misma agua tratada con floculante y cloro.

Tanto el agua descontaminada de cromo como esta misma tratada con policloruro de aluminio como floculante y cloro para oxidar materia orgánica y eliminar microorganismos, presentan parámetros físico-químicos por debajo de los límites máximos permisibles para vertimientos. Las reducciones obtenidas a partir del agua residual, en el agua descontaminada de cromo y en esta misma tratada, fueron respectivamente: materia orgánica, DQO, de 2.992 a 672 y 192 mg/L (máximo 2.000 mg/L), DBO₅ de 1.740 a 460 y 91 mg/L (máximo 1.000 mg/L), conductividad de 47.500 a 35.600 y 15.798 μ S/cm, color verdadero de más de 500 a 50 y 5 Unidades Pt/Co (máximo 75), turbiedad de 553 a 7.2 y 13 UNT (máximo 50 UNT), dureza de 1.764 a 8,4 mg/L CaCO₃ en ambos casos (máximo 500 mg/L), sólidos totales de 69103 a 47.536 y 14.496 mg/L, sólidos disueltos de 68.303 a 47.536 y 14.460 mg/L y sólidos en suspensión de 800 mg/L a cero en ambos casos. El pH cambió de 4,0 a 7,1 y 7,0; encontrándose en el rango permisible de 5 a 9 (Ver Tabla 5).

Puede utilizarse sal de cromo recuperada mezclada con sal de cromo comercial en todas las proporciones ensayadas, siendo la más conveniente la proporción 40% a 60% respectivamente, porque consume más cromo recuperado y menos sal de cromo comercial, obteniéndose cuero con parámetros de calidad requeridos para calzado colegial y confección con cero porcentaje de encogimiento en la prueba de ebullición y más de 20.000 ciclos sin rompimiento en la prueba de resistencia a la flexión en húmedo en flexómetro Bally. Porcentajes mayores de sal de cromo recuperada no son convenientes porque diluirían el baño de cromo, ya que no debe utilizarse exceso de agua en éstos donde son favorables las mayores concentraciones de cromo, y la sal de cromo regenerada no se obtiene seca.

El cromo se puede recuperar, regenerar y reutilizar en el mismo proceso de curtido, después de haber pasado previamente por estos mismos procesos de reutilización; o sea que puede re-reutilizarse repetidas veces, obteniéndose cuero de calidad requerida para calzado colegial y confección.

El filtro de malla 100 (código Mash) en acero inoxidable reduce significativamente el contenido de sólidos en suspensión del agua residual del proceso de curtido, en un 97%, siendo más adecuado que un filtro de grava y arena sílice ya que este último se obstruye en poco tiempo porque los lodos depositados forman una capa fibrosa difícil de retirar por retrolavado. En el filtro de malla es más fácil hacer mantenimiento periódico y desde el punto de vista ambiental es más recomendable porque no genera residuos sólidos, que causan un impacto negativo importante en los filtros de grava y arena.

Se recomienda utilizar ácido fórmico grado comercial del 85% en peso, sin diluir para regenerar el cromo, porque así se obtiene la sal más concentrada para reemplazar 40% de la sal de cromo comercial, que se dosifica en estado sólido en el proceso de curtido para obtener baños concentrados de cromo. Sin embargo, la sal comercial para curtir pieles, sulfato básico de cromo, contiene solamente entre 15% y 17% en peso de cromo, que indica una pureza relativamente baja, porque el porcentaje de cromo en el sulfato básico de cromo puro es de 31,5.

La cantidad de ácido fórmico se debe suministrar al precipitado húmedo de hidróxido de cromo hasta alcanzar el pH requerido en los baños de curtido, de 3,3 a 3,5.

El agua residual, después de precipitar el cromo, puede ser reutilizada después de un tratamiento convencional con policloruro de aluminio como floculante y con hipoclorito de sodio que oxida materia orgánica y elimina microorganismos, reduciendo significativamente el elevado consumo de agua en las curtiembres. El alumbre como floculante no presentó resultados favorables debido a que la contaminación remanente, después de retirar el cromo, es de naturaleza principalmente orgánica; por la misma razón el policloruro de aluminio presentó resultados de floculación en corto tiempo y con elevada eficiencia, en dosificación de 30 ppm.

Para implementar el proceso de recuperación y reutilización de cromo, la inversión en equipos y elementos adicionales de seguridad por manejo de soda cáustica y ácido sulfúrico, es de \$4'802.249, que pueden ser recuperados en un período aproximado de dos años, para una curtiembre pequeña que puede procesar unos 200 lotes anuales. En cada lote de 100 pieles se obtendría un ahorro de \$11.163,9.

Es necesario continuar trabajando en la minimización de contaminación de cuerpos de agua por vertimientos industriales, para la implementación de tecnologías limpias accesibles a pequeñas y medianas industrias, en un marco de sostenibilidad. En el caso específico de las curtiembres los procesos de pelambre, teñido y acabado del cuero producen elevadas cargas contaminantes en sus aguas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

- Akitiengeselleschat, D.; Ludwigshafan. La influencia de los modernos procedimientos de apelmbrado y curtición sobre los problemas de aguas residuales. BASF. Pág 5 – 36. 2000.

Álvarez Melo, Jorge Antonio. Análisis de la variación de caudales en la Cuenca Alta del Río Magdalena, Colombia, en fases extremas del ENSO. Revista de Investigación, ISSN 16576772. Vol. 6 (1): 29-40. Enero - junio 2006.

- Alzate Tejada, Adriana; Tobón Mejía, Olga. *Manual ambiental sectorial del Proyecto Gestión ambiental en la industria curtiembre en Colombia del Sistema interactivo de referenciación ambiental sectorial SIRAC*. Medellín, Colombia. Procesos industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica. 2004.
- Azdet, J. M. Química Técnica de Tenería. Editorial Alfaomega. México. 2000.
- Blackman, Allen. *Adoption of clean leather tanning technologies in Mexico*. Washington, United States. Procesos Industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica. 2005.
- Bosnic, M; Buljan J; Daniels R. *Pollutants in tannery effluents. United Nations Industrial Development Organization*. Viena, Austria. Procesos industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica. 2000.
- Cano, I.; Pérez, J.A., Gutiérrez, M.; Gardea, J. L. Remoción y Recuperación de Cromo (III) de Soluciones Acuósas por Biomasa de Sorgo., Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 1, pp. 97-103. 2002.

CAR. Adecuación hidráulica y recuperación ambiental Río Bogotá. 2009. Disponible en: http://www.car.gov.co/recursos_user/Proyectos%20Especiales/RIO%20BOGOTA/Evaluacion%20Ambiental%20Volumen%20I.pdf

Fecha de consulta agosto 31 de 2012.

- Caracol Radio, 2008. Disponible en <http://www.caracol.com.co/noticias/bogota/cerradas-veintiseis-curtiembres-en-bogota-por-contaminacion-ambiental/20081222/nota/735341.aspx>). Fecha de consulta agosto 2012.

Castillo, Juberzay. Procesos de Tratamientos de aguas. Universidad Nacional Experimental, Francisco Miranda. Venezuela.

Disponible en: <http://www.slideshare.net/guillermo150782/coagulacion-y-floculacion>

Fecha de consulta septiembre 03 de 2012.

CEDUM. Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Gestión Ambiental. Seminario Evaluación Socioeconómica y Ambiental de Proyectos. Universidad de Manizales.

- CIATEC: Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías competitivas. Dirección de Servicios Tecnológicos. Disponible en: www.ciatec.mx y http://www.ciatec.mx/precisa/pruebas_fisicas/CALZADO%20Y%20PROVEEDURIA_internet.pdf. Consultado el 25 de febrero de 2012.

- CPML-COLCIENCIAS-SENA. Diagnóstico Ambiental del sector Curtiembre en Colombia. Editorial Norma. pp. 11-56. 2004.

Cogollo Flórez, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Octubre de 2010.

Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/5419/1/juanmiguelcogollo.2011.pdf>

Fecha de consulta: septiembre 10 de 2013.

- Comunidad del Cuero. (2003), Disponible en: <http://www.cueronet.com>. Fecha de consulta: 02 de marzo de 2012.
- DAMA. Resolución 1074 del 28 de octubre de 1997, por la cual se establecen estándares ambientales en materia de vertimientos; publicado en el Registro Distrital 1528 de octubre 30 de 1997, Bogotá.
- DAMA – Universidad de la Sabana. Convenio 014 de 2006. Inventario de carácter ambiental en el sector de San Benito, 2006.
- Díaz, Andrea; Jiménez, Juliana; Pérez, M.; Narváez, Paulo César. (2006). Planteamiento y evaluación de las aplicaciones de los productos obtenidos en la hidrólisis alcalina de las virutas de cromo generadas durante el procesamiento del cuero. Ingeniería e Investigación. Vol 26. No. 3. ISSN 0120-5609. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

EAAB. Respuesta a Emergencias. Octubre de 2010. Disponible en: http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/FOPAE_V2/seminario/Mem/mem/Plan%20de%20reduccion%20de%20riesgos%20en%20servicios%20del%20Acueducto.pdf

Fecha de consulta: septiembre 05 de 2013.

- EPA - CIATEC. Manual de Buenas Prácticas Ambientales para la Curtiembre en Centroamérica. 2006. Disponible en: http://www.cgpl.org.gt/downloads/manual_de_buenas_practicas_curtiembre.pdf. Consultado el 27 de febrero de 2012.

- Franco, D; Fernández V; Torres E. (2000). *Evaluación de la actividad genotóxica de efluentes de curtiembres del departamento central de la región oriental, Paraguay. Ciencia y Tecnología*. Vol. 2 pp 37-48. Asunción, Paraguay. Procesos industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica.

Fuentes Beltrán, Rubén. Sistemas de depuración natural. Instituto Tecnológico de Canarias. pp. 23-30. 2004.

- Germillac, Mercedes. *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial en curtiembres*. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago de Chile. Procesos industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica, 2007.

Greenpeace. Cueros tóxicos. www.greenpeace.org.co.ar. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2012/contaminacion/Cueros-Toxicos-Riachuelo.pdf>. Fecha de consulta: marzo 19 de 2013

- Hagerman, Ann. Tannin Chemistry. Department of chemistry and biochemistry, Miami University. Oxford, United States. Procesos Industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica. The leather sector. *Environmental technology program for industry*. Environmental Report. Karachi, Pakistán, 2002.
- International Finance Corporation IFC. *Environmental health and safety guidelines for tanning and leather finishing*. Washington, United States. Procesos industriales Virtual Pro. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica, 2006.
- IUP (International Union Physical Test). Normas Oficiales de la Unión Internacional de Asociaciones de Químicos y Técnicos de la Industria del Cuero IULTCS. Comisión de Investigación Física. Norma IUP 16 Prueba de encogimiento del cuero y Norma IUP 20 Resistencia a la flexión del cuero. Disponible en: http://www.aaqtic.org.ar/e_50-revista.htm#2 y http://www.cueronet.com/normas/normas_iup.htm. Consultado el 03 de marzo de 2012.
- Metcalf – Eddy. Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. México. 3ª Edición. McGraw Hill. 2000.
- Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. APHA, AWWA, WPCF (1997). Madrid. 2ª Edición. Editorial Díaz de Santos.

Ministerio de Agricultura. Decreto 1594 del 26 de junio de 1984, nivel nacional; Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y/o red de alcantarillado público; publicado en Diario Oficial 36700 de julio 26 de 1984, Colombia.

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Ley 1450 de 2011. Publicado por Oficina Jurídica en Memorando 1568 del 25 de mayo de 2012.

- Montgomery, Douglas C. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. 2ª Edición. LimusaWiley.
- Petrucci, Ralph. *Química General*. 8ª Edición. Pearson. 2003.
- Rigola, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales*. Alfaomega. 2001.
- Secretaría Distrital de Ambiente. *Diagnóstico final de la cadena productiva del cuero en San Benito, Bogotá*. 2008.
- Secretaría Distrital de Ambiente: Empresa de Acueducto y alcantarillado de Bogotá, Alcaldía Mayor de Bogotá. *Calidad del sistema hídrico de Bogotá*. 1ª Ed. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- Schleenstein, Gerhard. *Treatment of tannery wastewater*. Eschbom, Alemania. *Procesos industriales Virtual Pro*. No. 62. ISSN 1900-6241. Iberoamérica. 2002.
- Vásquez Daza, Lucinio. *Las curtiembres en el barrio San Benito de Bogotá. Un análisis bioético en la perspectiva de Hans Jonas*. Trabajo de Grado para optar el título de Mágister en Bioética. Universidad Javeriana, Bogotá, 2012.
- Yagüe Sánchez, Cristina (2001). *Eliminación de color en aguas de industrias de acabado de piel mediante tecnologías de oxidación*. Tesis de Doctorado. Universidad de Alicante, España. Facultad de Ciencias.

REGISTRO FOTOGRÁFICO

Figura 8. Nacimiento del Río Bogotá.



Figura 9. Río Tunjuelito en el sector de San Benito (Bogotá)



Figura 10. Preparación de solución de soda cáustica



En Laboratorio

En Planta

Figura 11. Filtración en el laboratorio del agua residual del proceso de curtido

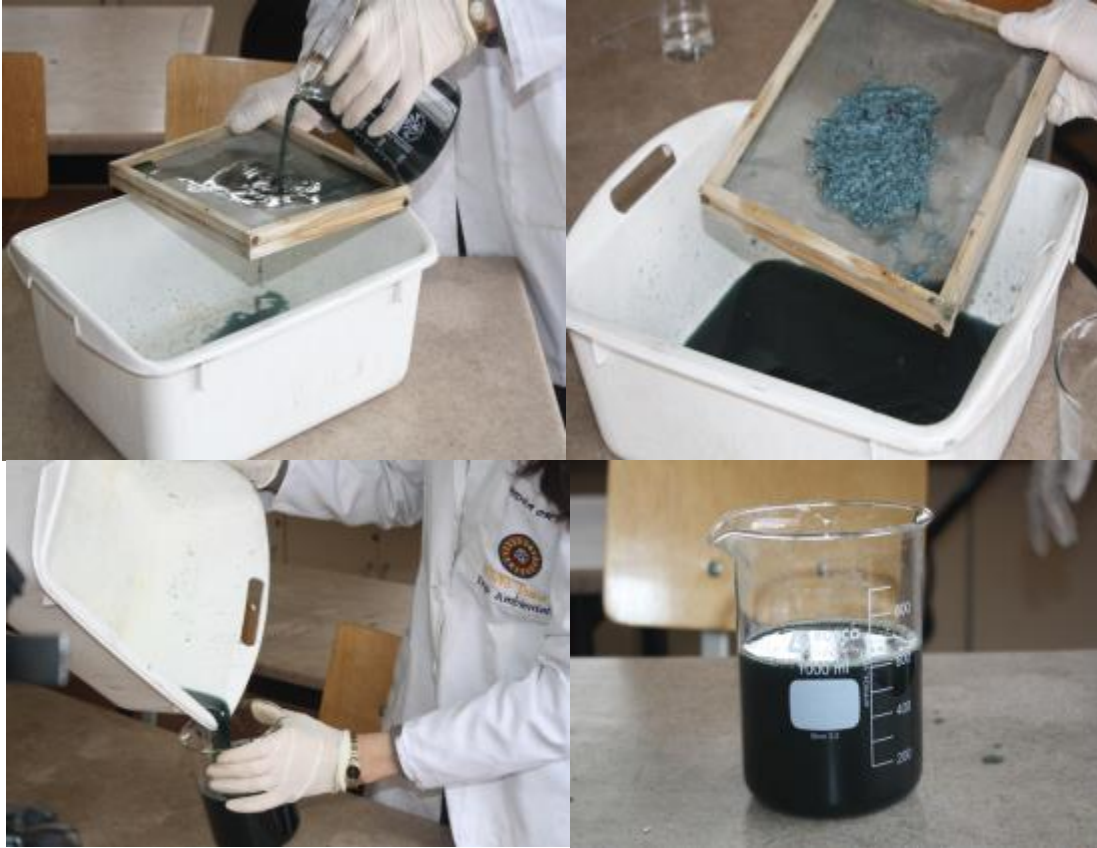


Figura 12. Filtración en la planta del agua residual del proceso de curtido



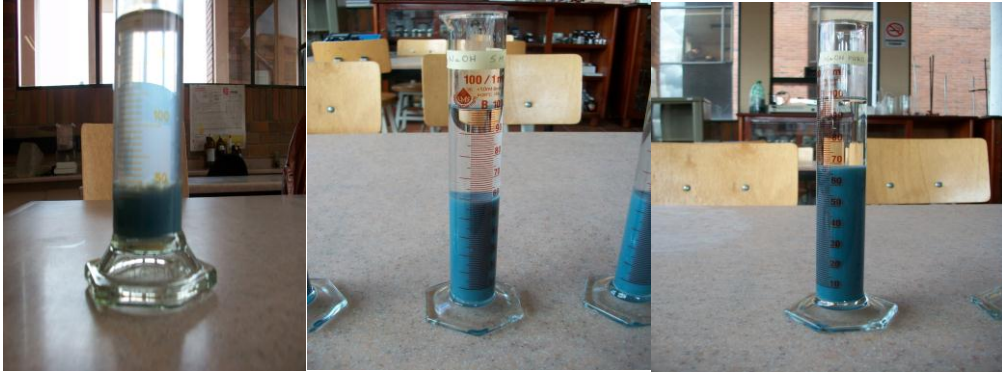
Figura 13. Adición de soda cáustica al agua residual de curtido filtrada hasta pH 9, en el laboratorio



Figura 14. Adición de soda cáustica al agua residual de curtido filtrada hasta pH 9, en la planta



Figura 15. Precipitado de hidróxido de cromo obtenido del agua residual del proceso de curtido variando la concentración de soda cáustica (NaOH) y pH 9 en laboratorio



NaOH 4 M

NaOH 5 M

NaOH SÓLIDO

Figura 16. Precipitado de hidróxido de cromo y agua sobrenadante del agua residual del proceso de curtido en planta



Figura 17. Separación del agua sobrenadante y tratamiento con policloruro de aluminio y cloro



Figura 18. Adición de ácido para obtener la sal para curtir: sulfato básico de cromo



Figura 19. Curtido de pieles con mezcla de sal de cromo regenerada y sal de cromo comercial



Figura 104. Prueba de encogimiento del cuero después de curtido con la mezcla sal regenerada y sal de cromo comercial



CRONOGRAMA

CRONOGRAMA (TRIMESTRES)								
Número	ACTIVIDAD	1	2	3	4	5	6	7
1	Recolección y revisión de información							
2	Determinación de parámetros físicoquímicos de la calidad del agua residual del proceso de curtido							
3	Dimensionamiento y montaje de la planta piloto							
4	Precipitación de cromo y determinación de su concentración final en las aguas residuales del proceso de curtido							
5	Primer diseño experimental: regeneración del cromo con sulfato de sodio y diversos ácidos							
6	Segundo diseño experimental: mezcla en diversas proporciones de sulfato básico de cromo regenerado con sulfato básico de cromo comercial y utilización de estas mezclas para curtir pieles para calzado colegial y para confección							
7	Determinación de la calidad del cuero obtenido por las pruebas de encogimiento y resistencia a la flexión							

8	Análisis de los resultados de los diseños experimentales									
9	Estudio de sostenibilidad									
10	Informe final de investigación									

PRESUPUESTO

Materiales o servicio	Justificación	Valor (\$)
Insumos químicos: hidróxido de sodio grado industrial, sulfato básico de cromo, ácido sulfúrico grado industrial.	Diseños experimentales en planta piloto, para precipitación y regeneración del cromo para su reutilización	500.000
Reactivos químicos grado analítico para análisis de cromo por espectrofotometría y de materia orgánica.	Análisis de cromo en el agua residual antes y después de la precipitación. Determinación de materia orgánica antes y después del tratamiento	1'500.000
Análisis de cromo por absorción atómica, determinación de flexibilidad del cuero por flexómetroBally y porcentaje de encogimiento del cuero	Determinación de cromo recuperado y de parámetros de calidad del cuero obtenido.	1'500.000
TOTAL		3'500.000

ANEXO: ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados de los análisis de laboratorios acreditados por el IDEAM, Química y Cian, de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua residual del proceso de curtido analizadas, antes de la precipitación del cromo, después de precipitar el cromo sin tratar y después de recuperar el cromo y tratada con floculante y cloro.



QUIMIA LTDA.
NIT 830.055.341-4

INFORME DE LABORATORIO		
Fecha: Bogotá, Octubre 02 de 2012	RQUJ No: 12-1492A	Página 1 de 1
Remiteste: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS		
Nombre: Dra. Nidia Ortiz		
Dirección: Carrera 9 No. 51 - 11		
Teléfono: 587 47 97	Fax:	Cel: 315 312 0602
Muestra por Cliente	Procedencia: Cliente	No. Muestras: 1

No. QUI-		12-2355	
Su Referencia		Agua Residual Curtido	
Descripción de la muestra		Líquido turbio envasado en frasco plástico ámbar tipo plástico	
Fecha recepción de muestra		14-09-2012	
PARÁMETRO	MÉTODO DE ANÁLISIS - CÓDIGO SNI	RESULTADOS	
Conductividad	uS/cm	Condúctimetro - 2710 B	4790
Cobre - Verdadero Totalidad	PPCo	Colorímetro - 2120B	<500
Turbiedad	NTU	Turbidímetro - 2130 B	553
Dureza Total en CaCO ₃	mg/L	(Ca-Mg) - 3040 B	1764
Sólidos Totales	mg/L	Gravímetro - 2840 B	69103
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	Filtración membrana / Gravímetro - 25401	68303
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	Cálculo	800
Cloruro Total en Cl ⁻	mg/L	Absorción: Aniónico con bario	2474

mg/L: Miligramos del elemento por litro de muestra, partes por millón (ppm) en solución.

*: Menor que, significa que el elemento no fue detectado por el método utilizado y el límite de detección es el valor que aparece a continuación de este signo.

Observaciones:

Los resultados aquí presentados se refieren a la muestra analizada, y no a otro material de la misma procedencia. QUIMIA LTDA., no se hace responsable de los resultados a consecuencia de la reproducción parcial del presente informe.


Qca. LUZ ANGELO VALENZUELA GARZON
MPQ-2410

Vo.Bu. 
Qca. ORLANDO VARGAS ZARATE
MPQ-0410
Director Técnico y de Calidad



QUIMIA LTDA.
NIT 830.055.841-4

INFORME DE LABORATORIO		
Fecha: Bogotá, Octubre 02 de 2012	RQU No: 12-1494-A	Página 1 de 1
Remitenza: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS		
Nombre: Dra. Nidia Ortiz		
Dirección: Carrera 9 No. 51 - 11		
Telefono: 587 87 91	Fax:	Cel: 313 312 6605
Muestra por Cliente:	Procedencia: Cliente	No. Muestras: 1

No. QUB:		12-2167	
No. Laboratorio:		Agua subterránea de precipitar Cromo en agua	
Descripción de la muestra:		Líquido transparente envasado en frasco de plástico ámbar tapa plástica	
Fecha recepción de muestra:		14-09-2012	
PARÁMETRO	METODO DE ANALISIS - CÓDIGO SM	RESULTADOS	
Conductividad	pScm	Condutivimetro - 2510 B	3500
Color Verdadero	Unidades PCo	Colorimetro - 2120B	50
Turbiedad	NTU	Turbidimetro - 2130 B	7.2
Dureza Total en CaCO ₃	mg/L	Calorímetro - Ca-Mg - 3040 B	8.4
Sólidos Totales	mg/L	Gravimetría - 2540 B	4756
Control Total en Cr		Asociación Americana como de grado	1.14


mg/L: Miligramos del elemento por litro de muestra, partes por millón (ppm) en solución.

Observaciones:

Los resultados aquí presentados se refieren a la muestra analizada y no a otro material de la misma procedencia. QUIMIA LTDA., no se hace responsable de los resultados a consecuencia de la reproducción parcial del presente informe.


Qca. LIC. ANGÉLA VALENZUELA GARZÓN
MPQ-3419

Vo.Bo.


Qco. ORLANDO VARGAS ZARATE
MPQ-6430
Director Técnico y de Calidad



QUIMIA LTDA.
NIT 830.055.941-4

INFORME DE LABORATORIO		
Fecha - Bogotá, Octubre 02 de 2012	RQUI No : 12-1493A	Página 1 de 1
Remitente : UNIVERSIDAD SANTO TOMAS		
Nombre : Dra. Nidia Ortiz		
Dirección : Carrera 9 No. 51 - 11		
Teléfono : 587 87 97	Fax:	Cel: 313 342 0605
Muestra por : Cliente	Procedencia : Cliente	Nº Muestras : 1

No. QUI-		12-2356
Su Referencia	Agua Sobresaturada Tratada	
Descripción de la muestra	Líquido transparente envasado en frasco de vidrio ámbar tipo plástica	
Fecha recepción de muestra	14-09-2012	
PARÁMETRO	METODO DE ANÁLISIS - CÓDIGO SM	RESULTADOS
Conductividad	uS/cm Conductivimetro - 2510 B	15798
Color Verdadero Unidades PtCo	Colorímetro - 2170B	7
Turbiedad NTU	Turbidímetro - 2130 B	13
Oxígeno Total en CaCO ₃	Cr-Mg - 3040 B	8.4
Sólidos Disueltos Totales	Filtración membrana / Gravimetría - 2540 C	14469
Cloro Total en Cl ₂	Absorción Ámrica con hincio de grado	0.061

mg/L: Miligramos del elemento por litro de muestra, partes por millón (ppm) en solución.

Observaciones:

Los resultados aquí presentados se refieren a la muestra analizada y no a otro material de la misma procedencia. QUIMIA LTDA., no se hace responsable de los resultados a consecuencia de la reproducción parcial del presente informe.


Geo. LUZ ANGELLA VALENZUELA GARZON
MPQ-3419

Va.Bo. 
Geo. ORENDO VARGAS ZARATE
MPQ-0410
Director Técnico y de Calidad



QUIMIA LTDA.
NIT 830.055.341-4

INFORME DE LABORATORIO

Fecha: Bogotá, Julio 06 de 2012	RQUI No.: 12-1014	Página 1 de 1
Remite: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS		
Nombre: Dra. Nidia Ortiz		
Dirección: Carrera 9 No. 51 - 11		
Teléfono: 587.87.07	Fax:	Cel: 313.312.0605
Muestra por: Cliente	Procedencia: Cliente	No. Muestras: 10

No. QUI-	Su Referencia	Fecha de recepción	Descripción de la muestra	Cromo total en Cr g/100mL
12-1641	Cromo Inicial 5 Bombo pequeño	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.76
12-1642	Cromo Inicial 6 Bombo pequeño	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.42
12-1643	Cromo final 5 Bombo pequeño	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	1.17
12-1644	Cromo final 6 Bombo pequeño	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.66
12-1645	Cromo sal recuperado	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.85
12-1646	Cromo Bombo grande 1	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.32
12-1647	Cromo Bombo grande 2	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.26
12-1648	Sal de cromo nueva	28-06-2012	Líquido transparente envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.017
12-1649	Sal regenerada antes del Bombo ensayo 2	28-06-2012	Líquido color azul oscuro envasado en frasco de vidrio ámbar tapa plástica	0.32
12-1650	Agua después de precipitar cromo ensayo 2	28-06-2012	Líquido transparente envasado en frasco plástico ámbar tapa plástica	0.0002

Método de Análisis:

Cr + Absorción atómica con llama

Observaciones:

Los resultados aquí presentados se refieren a la muestra analizada y no a otro material de la misma procedencia. QUIMIA LTDA. no se hace responsable de los resultados a consecuencia de la reproducción parcial del presente informe.

Vs. Bs.


QCA LUZ ANGÉLICA VALENZUELA GARZÓN
MPO-3419


QCA ORLANDO VARGAS ZARATE
MPO-0410
Director Técnico y de Calidad

10j

**RESULTADOS DE LABORATORIO**

Informe No. 000472

Pagina 2 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
EMPRESA: INGENIERA NIDIA ORTIZ
FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
ATENCIÓN:
DIRECCION: Cra. 9 No 51-11
TELEFONOS:
PLAN DE MUESTREO: N/A
PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIQUES



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7764	AGUA SOBRENADANTE SIN TRATAR		
Municipio: Bogotá D. C.	Fecha de Toma: 16/08/2012	Clase de Muestra: Agua	
Departamento: Cundinamarca	Hora de Toma:	Tipo de Muestra: Puntual	
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg C/L	S.M. 3030 E S.M. 3111 D	0.791
DQO	mg/L O2	S.M. 5220 C	672

Observación: Analisis de Cromo subcontratado con Laboratorio Chemlab

MARCELA MONDACA - POTEGUA
DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Muestra realizada por: El cliente
Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas.
Prohíbe la reproducción de este informe sin autorización de Cian Ltda.



CIAN LTDA. NIT. 830.502.674 - 8

Dirección: Cra. 72 A No 46-20, Bogotá, D.C.
Teléfono: (07) 1 - 256 11 09 / 416 04 82
www.cianltda.com



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 3 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
EMPRESA: INGENIERA NICIA ORTIZ
FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
ATENCIÓN:
DIRECCION: Cra. 9 No 51-11
TELEFONOS:
PLAN DE MUESTREO: N.A.
PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIDOS



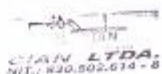
No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7765	AGUA DE RECUPERAR CROMO TRATADA SOBRENADANTE		
Municipio: Bogotá D.C.	Fecha de Toma: 16/08/2012	Cose de Muestra: Agua	
Departamento: Cundinamarca	Hora de Toma:	Tipo de Muestra:	Puntual
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CRDMO TOTAL	mg/L	S.M. 3030 E-S.M. 3111.0	0.150
DCO	mg/L	S.M. 5220 C	190

Observaciones: Analisis de Cromo subcontratado con laboratorio Chemlab

MARCELA MONDACA - P02028
DIRECTOR TECNICO Y DE LABORATORIO

Muestreo realizado por: El cliente
Resultados validos unicamente para las muestras P02028006
Para toda reproducción de este informe, sin aprobación de CIAN LTDA



CIAN LTDA
NIT. 830.802.614-8

16-10-1961-75762091

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
Teléfono: (57) 1 - 295 11 09 / 416 04 82
www.cianltda.com



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 4 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
EMPRESA: INGENIERA NIDIA ORTIZ
FECHA DE RECEPCIÓN: 08/17/2012
FECHA DE ANÁLISIS: 08/17/2012 AL 28/30/2012
ATENCIÓN:
DIRECCIÓN: Cra. 9 No 51-11
TELÉFONOS:
PLAN DE MUESTREO: N/A
PROYECTO: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE CURTIDOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7766	SAL		
Municipio: Bogotá D. C.	Fecha de Toma: 15/08/2012	Clase de Muestra: Agua	
Departamento: Cundinamarca	Hora de Toma:	Tipo de Muestra: Particula	
FÍSICOQUÍMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CIORNO TOTAL	mg O/L	S.M. 3050 E-S.M. 3111 D	167.00

Observaciones: Análisis por Cromatografía con Laboratorio Químico Preparatoria Sesi 1g de Sesi disuelto en 1L de Agua (Concentración: 1000 ppm) % Cromo en la Sal: 15.74%

MARCELA MUÑOZ
DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Muestra realizada por: El cliente
Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas
Para más la reproducción de este informe, sin aprobación de Con UGB

CIAN LTDA
NIT.: 920.592.674-9

CA 1-02 Rev. 2010/02/1

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
Teléfono: (57) 1 - 295 11 09 / 416 04 82
www.cianltda.com

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
 EMPRESA: INGENIERIA NIDIA CRTIZ
 FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
 FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
 ATENCION:
 DIRECCION: Cra. 9 No 51-11
 TELEFONOS:
 PLAN DE MUESTREO: N/A
 PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIDOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7768		SAL CR RECUPERADO CON ACIDO FORMICO	
Municipio	Bogota D. C.	Fecha de Toma	16/08/2012
Departamento	Cundinamarca	Hora de Toma	
		Cuase de Muestra	Agua
		Tipo de Muestra	Puntual
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CRÓMO TOTAL	mg Cr/L	5 & 320 E-S.M. 3111 D	8963

Observaciones: Análisis de Cromo solicitado con Laboratorio Chemlab



 MARCELA MONCAG - INGENIERA
 DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Muestras usadas por: El cliente
 Resultados válidos únicamente para las actividades mencionadas
 Prohibida la reproducción de este Informe sin autorización de CIAN LTDA

08/31/2012 10:00 AM



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 8 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
 EMPRESA: INGENIERA NIDA ORTIZ
 FECHA DE RECEPCIÓN: 08/17/2012
 FECHA DE ANÁLISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
 ATENCIÓN:
 DIRECCIÓN: Cra. 9 No 51-11
 TELEFONOS:
 PLAN DE MUESTREO: N/A
 PROYECTO: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE CURTIDOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7770	ENSAYO 4 FINAL BOMBITO		
Municipio: Bogotá D. C.	Fecha de Toma: 16/08/2012	Clase de Muestra: Agua	
Departamento: Cundinamarca	Hora de Toma:	Tipo de Muestra: Puntual	
FÍSICOQUÍMICO			
PARÁMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg Cr/L	S.M. 3032 E-S.M. 3111 D	21.17

Observaciones: Análisis de Cromo subcontratado con Laboratorio Cromo

MARCELA MUNGUÁ / PPT/008
 DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Muestras recibidas por: El cliente
 Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas
 Prohíbe la reproducción de este informe sin autorización de CIAN LTDA.



LA 1 de Nov. 2012/2011

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
 Teléfono: (57) 1 - 293 11 69 / 416 04 82
 www.cianltda.com

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
EMPRESA: INGENIERA NIVIA ORTIZ
FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012



ATENCIÓN:
DIRECCION: Cra. 9 No 51-11
TELEFONOS:
PLAN DE MUESTREO: N/A
PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIEDOS

No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7771				CR FINAL BOMBITO ENRAYO VI SLDL SAL RECUPERADA CON GR REUTILIZADA			
Municipio: Bogotá D. C.		Fecha de Toma: 16/08/2012		Clase de Muestra: Agua			
Departamento: Cundinamarca		Hora de Toma:		Tipo de Muestra: Puntual			
FISICOQUIMICO							
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO				
CROMO TOTAL	mg Cr/L	S.M. 3220 E-S.M. 3111 D	081				

Observaciones: Análisis de Cromo Sulfato realizado con Laboratorio ORELAB


 MARCELA MONCADA TPO 0026
 DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Muestra analizada por: El cliente
 Resultados válidos en caliente para las muestras analizadas
 Prohibida la reproducción de este informe sin autorización de CIAN LTDA.



LA 4.0 Rev. 2/03/2011



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 10 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
 EMPRESA: INGENIERA NIDIA ORTIZ
 FECHA DE RECEPCIÓN: 08/17/2012
 FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
 ATENCIÓN:
 DIRECCIÓN: Cra. 9 No 51-11
 TELEFONOS:
 PLAN DE MUESTREO: N/A
 PROYECTO: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE CURTIDOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7772	ENSAYO 5 ORIGINAL BOBITO		
Municipio	Bogotá D. C.	Fecha de Toma	19/08/2012
Departamento	Cundinamarca	Hora de Toma	
		Clase de Muestra	Agua
		Tipo de Muestra	Puntual
FÍSICOQUÍMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg Cr/L	S.M. 3000 E.S.M. 3111 G	1737

Observaciones: Análisis de Cromo subcontratado con Laboratorio Chemlab



MARCELA MUÑOZ
 DIRECTOR TÉCNICA Y DE LABORATORIO

Muestra recibida por: El cliente
 Resultados válidos en cuanto a los métodos analizados
 Precisión e Integridad de este informe: sin asociación de Datos

IA F. 0. Rev. 1 07/03/09

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
 Teléfono: (57) 1 - 295 11 00 / 416 04 82
 www.cianltda.com



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 11 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
EMPRESA: INGENIERA NIDA ORTIZ
FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
ATENCIÓN:
DIRECCION: Cra. 8 No 51-11
TELEFONOS:
PLAN DE MUESTREO: N.A.
PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIDOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7773 CR-RECENERADO CON ACIDO ACETICO			
Municipio: Bogotá D. C.	Fecha de Toma: 15/08/2012	Clase de Muestra: Agua	
Departamento: Cundinamarca	Hora de Toma:	Tipo de Muestra: Puntual	
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg/CvL	5 M 3200 E-S M 3111 B	5631

Observaciones: Análisis de Cromo solicitados con Laboratorio Oremad


MARCELA MONCAYO
DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Este informe es propiedad del cliente.
Reservados todos los derechos para las muestras analizadas.
Prohíbida la reproducción de este informe sin autorización de CIAN LTDA.



14 / 08 / 2012

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
Teléfono: (57) 1 - 295 11 00 / 416 04 82
www.cianltda.com



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 12 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
 EMPRESA: INGENIERA NIDIA ORTIZ
 FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
 FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
 ATENCION:
 DIRECCION: Cra. 9 No 51-11
 TELEFONOS:
 PLAN DE MUESTREO: N/A
 PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIÇOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7774		ENSAYO VIECR-FINAL BOWBITO AC FORMICO	
Municipio: Bogotá D. C.	Fecha de Toma: 16/08/2012	Clase de Muestra: Agua	
Departamento: Cundinamarca	Hora de Toma:	Tipo de Muestra: Puntual	
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg O/L	S.M. 3030 E-S.M. 3111 D	2694

Observaciones: Análisis de Cromo subcontratado con Laboratorio Chemias

MARCELA MUNGUÍA F40023
 DIRECTOR TÉCNICO Y DEL LABORATORIO

Muestro realizado por: El cliente
 Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas
 Prohíbida la reproducción de este informe, sin autorización de CIAN LTDA



14 / 08 / 2012 09:11

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
 Teléfono: (57) 1 - 295 11 00 / 436 04 82
 www.cianltda.com



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 13 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
 EMPRESA: INGENIERA NIDIA ORTIZ
 FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
 FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
 ATENCION:
 DIRECCION: Cra. 9 No 51-11
 TELEFONOS:
 PLAN DE MUESTREO: N/A
 PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIQUES



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7775 ENSAYO ULTIMO CR- FINAL BOMBITO AC FORMICO SAL CR RE RECUPERADA			
Municipio:	Bogotá D. C.	Fecha de Toma:	15/08/2012
Departamento:	Cundinamarca	Hora de Toma:	
		Clase de Muestra:	Aguá
		Tipo de Muestra:	Purlust
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg Cr/L	SM 3030 E-S M 3111 G	1438

Observaciones: Análisis de Cromo subcontratado con Laboratorio Chemias



[Signature]
 MARCELA MONJUA P.O. 0328
 DIRECTOR TECNICO Y DE LABORATO

Muestra realizada por: El cliente
 Resultados válidos únicamente para las muestras analizadas
 Prohíbase la reproducción de este informe sin autorización de Cian Ltda

08-11-2014 11:23:07



RESULTADOS DE LABORATORIO

Informe No. 000472

Página 14 de 14

FECHA DE REPORTE: 08/31/2012
 EMPRESA: INGENIERIA NORA ORTIZ
 FECHA DE RECEPCION: 08/17/2012
 FECHA DE ANALISIS: 08/17/2012 AL 08/30/2012
 ATENCION:
 DIRECCION: Cst. 9 No 91-11
 TELEFONOS:
 PLAN DE MUESTREO: N/A
 PROYECTO: CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE CURTIDOS



No. DE MUESTRAS: 14

MUESTRA No. 7776		CR: FINAL BOMBEO ENSAYO VIAC FORMICO	
Municipio:	Bogotá D. C.	Fecha de Toma:	16/08/2012
Departamento:	Cundinamarca	Hora de Toma:	
		Clase de Muestra:	Agua
		Tipo de Muestra:	Puntual
FISICOQUIMICO			
PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO
CROMO TOTAL	mg/lit	SM 3020 E S M 3111 G	1127

Fin de Informe

Observaciones: Análisis de Curva Subordinada del Laboratorio Chemias

Marcela Muñoz - FOLIOS
 DIRECTOR TÉCNICO Y DE LABORATORIO

Muestra enviada por: El cliente
 Resultado va con el cliente para sus fines administrativos
 Para más la reproducción de este informe, s.i. aprobación de CIAN LTDA



LA FOLIO No. 100002091

Dirección: Cra. 72 A No 48-20, Bogotá, D.C.
 Teléfono: (57) 1 - 295 11 09 / 416 04 82
 www.cianltda.com