

## IMPACTO DE LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL DEL BAÑO DE CROMO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CUERO CRUST DE OVINO

### IMPACT OF REUSING CHROME BATH WASTEWATER ON THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF SHEEP CRUST LEATHER

J.R. Candio<sup>1,2</sup>, J.C. Tolentino<sup>1</sup> y W.E. Trejo<sup>1</sup>

#### Resumen

En el contexto de una contingencia, la reutilización del agua en el curtido de pieles resulta una alternativa viable para disminuir la generación de residuos peligrosos que produce esta actividad. Con el objetivo de impulsar la adopción de tecnologías más limpias y prácticas más sostenibles, este estudio propuso aplicar un proceso de curtido innovador para la obtención de cuero crust de ovino, consistente en la recuperación del agua residual proveniente del baño de cromo para reincorporarla al ciclo productivo. Para dicho fin, antes de cada curtido se cuantificó el contenido de cromo en el agua (T1: primer baño, T2: segundo baño y T3: tercer baño), lo que permitió determinar el desgaste del cromo y evaluar la viabilidad de su reutilización. Finalmente, se llevó a cabo una evaluación físico-mecánica del cuero crust obtenido tras el rebajado, analizando la fuerza de grieta (T1: 55.5 N, T2: 66.3 N, T3: 62.3 N,  $P > 0.05$ ), la fuerza de ruptura de flor (T1: 51.6 N/mm, T2: 61.3 N/mm, T3: 57.3 N/mm,  $P > 0.05$ ), y resistencia de la ruptura de la flor (T1: 7.2 mm, T2: 9.2 mm, T3: 7.6 mm,  $P < 0.05$ ). Nuestros hallazgos revelaron que el agua residual del cromado podría reutilizarse hasta tres veces sin comprometer significativamente las propiedades del cuero, siendo el segundo baño el que mostró un mejor desempeño. Futuras investigaciones podrían explorar la reutilización de aguas residuales provenientes de otras fases del proceso de curtido, así como su impacto en el acabado del cuero.

**Palabras clave:** curtido, cromo, agua residual, cuero crust.

#### Abstract

In the context of a contingency, the reuse of water in the tanning of hides is a viable alternative to reduce the generation of hazardous waste generated by this activity. With the aim of promoting the adoption of cleaner technologies and more sustainable practices, this study proposed applying an innovative tanning process to obtain sheep crust leather, consisting of the recovery of waste water from chrome plating to reincorporate it into the production cycle. To this end, before each tanning cycle, the chromium content in the water was quantified (T1: first bath, T2: second bath and T3: third bath), which allowed determining the wear of the chrome and evaluating the viability of its reuse. Finally, a physical-mechanical evaluation of the crust leather obtained after chroming was carried out, analyzing the crack strength (T1: 55.5N, T2: 66.3N, T3: 62.3 N,  $P > 0.05$ ), grain breaking strength (T1: 51.6 N/mm, T2: 61.3 N/mm, T3: 57.3 N/mm,  $P > 0.05$ ), and grain breaking strength (T1: 7.2mm, T2: 9.2 mm, T3: 7.6 mm,  $P < 0.05$ ). Our findings revealed that the chrome plating wastewater could be reused up to three times without significantly compromising the leather properties, with the second cycle showing the best performance. Future research could explore the reuse of wastewater from other phases of the tanning process, as well as its impact on the leather finish.

**Key words:** tanning, chromium, waste water, crust leather.

#### Introducción

El cuero crust de ovino es el resultado del proceso de curtido de la piel de ovino, previo al pulido, aplicación de tintes y acabados finales. Este material versátil, caracterizado por su resistencia y elongación, ofrece un amplio abanico de posibilidades para la fabricación de una gran variedad de productos, desde prendas de vestir hasta accesorios de cuero (García, 2011). La industria del cuero, debido a la naturaleza altamente putrescible de las pieles crudas y al uso de químicos agresivos, como el cromo, genera una carga contaminante significativa (Prasad *et al.*, 2021).

El cromado es un proceso rápido y eficiente para transformar las pieles en cuero que se basa en el uso de sales de cromo para estabilizar las fibras de colágeno (Córdova *et al.*, 2014). A pesar de su amplia utilización en la industria, el cromo representa un riesgo significativo para el medio ambiente debido a la alta toxicidad de sus residuos (Kanagaraj *et al.*, 2015). Si bien existen alternativas como el curtido vegetal y mineral, estas aún no han logrado igualar la eficiencia y el acabado del cromado. Por ello, la búsqueda de procesos de curtido más sostenibles y eficientes sigue siendo un desafío para la industria (Chávez, 2010).

La reutilización del agua residual del cromado surge como una estrategia prometedora para mitigar este problema, al reducir la generación de efluentes y disminuir el consumo de agua y químicos (Kumar *et al.*, 2023). Sin embargo, la percepción de que la reutilización afecta negativamente el acabado final del cuero ha limitado su implementación a gran escala (Ortiz & Carmona, 2015; Ravello, 2017); por el contrario, evidencia reciente confirma que la reutilización de baños de curtido no compromete las propiedades mecánicas del cuero bovino, cumpliendo con los valores estándar de resistencia a la tracción, desgarramiento y ruptura de flor (Khan *et al.* 2018; Duque, 2019).

La calidad y durabilidad del cuero, así como las opciones de acabado disponibles, están determinadas por su capacidad para soportar fuerzas de tracción (Tolentino, 2021). La resistencia mecánica de un cuero puede variar según diversos factores: a) El proceso de curtido para estabilizar las fibras de colágeno en la piel, haciéndolas menos susceptibles al desgarramiento (Córdova *et al.*, 2014), b) Tratamientos químicos como los agentes de reticulación o agentes antioxidantes que pueden aplicarse para fortalecer las fibras y mejorar la cohesión del cuero (Téllez *et al.*, 2004), c) Tipo de piel del animal y espesor, donde en general cueros más gruesos tienen una mayor resistencia (Córdova *et al.*, 2013), d) Condiciones ambientales de almacenamiento que no promuevan el crecimiento de hongos o bacterias que podrían reducir la resistencia al desgarramiento (Alvarez, 2018), y e) Uso final y requisitos específicos del producto final, como cinturones, bolsos o calzado pueden requerir diferentes niveles de resistencia al desgarramiento (Gallego, 2011).

La **fuerza de grieta** es un parámetro clave que evalúa la resistencia del cuero a la propagación de un desgarramiento inicial, siendo fundamental para aplicaciones donde se requiere durabilidad y resistencia mecánica. En cueros de buena calidad la fuerza de la grieta (N) varía de 30 a 40 N, según el grosor de la piel; para tapicería automotriz o mobiliario se considera como mínimo 30 N, y en el cuero fino, entre 10 a 30 N (ISO, 2016).

La **fuerza de ruptura de flor** representa la resistencia de la capa superficial del cuero (flor) al romperse bajo tensión, y es un indicador clave de la calidad estructural y resistencia superficial del cuero curtido. Valores típicos en cuero bovino varían de 15 a 40 N/mm; en cuero ovino o caprino, entre 10 a 25 N/mm, siendo el valor óptimo superior a 30 N/mm (ISO, 2024).

La **resistencia a la ruptura de la flor**, medida en milímetros, indica la capacidad del cuero para deformarse antes de que se rompa la capa superficial (flor). Este parámetro es especialmente relevante para productos que requieren flexibilidad sin perder integridad superficial, como calzado o marroquinería. Valores típicos para cuero de bovinos varían entre 4 a

10 mm; en cuero de ovino, entre 3 a 7 mm. Para cueros de buena calidad y uso general este valor debe superar los 5 mm (ISO, 2024).

Con el objetivo de promover una producción más sostenible del cuero, este estudio evaluó la viabilidad de reutilizar el agua residual del baño de cromo en la producción de cuero ovino crust y demostrar que es posible obtener un cuero de calidad sin comprometer significativamente sus propiedades físico-mecánicas.

### **Materiales y métodos**

La presente investigación se realizó durante el mes de marzo del año 2024 en el Laboratorio de Curtiembres del Departamento de Producción Animal perteneciente a la Facultad de Zootecnia de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Se utilizaron un total de 30 pieles de ovino adulto en estado de conservación seco salado y previamente estabilizadas mediante este método, con un peso promedio de  $2.0 \pm 0.27$  kilogramos y un espesor promedio de  $1.45 \pm 0.21$  mm. Las pieles fueron pesadas individualmente utilizando una balanza analítica con una precisión de  $\pm 0.01$  g, y su grosor fue determinado mediante un calibrador digital para cuero, con una resolución de 0.01 mm.

#### Solución del Proceso de Curtido

La solución utilizada para el curtido de las 30 pieles seco salado estuvo conformada por agua (296.45 l), detergente aniónico como agente desengrasante (406.35 g), cloruro de sodio para equilibrio iónico (2 322 g), Eusapon OC como humectante (116.1 ml), sulfuro de sodio como agente depilante (774 g), óxido de calcio para degradación del pelo (870.8 g), bisulfito de sodio como quelante de calcio (290.25 g), cloruro de amonio para neutralización residual (290.25 g), ácido fórmico como regulador de pH (390.6 g) y sulfato básico de cromo como agente curtiente principal (73.14 g). La solución representó una concentración inicial de 8 % de sulfato básico de cromo en relación al peso de la piel, común en los procesos de curtido (INACAL, 2018).

#### Proceso de Curtido y Tratamientos

La obtención del cuero crust se realizó siguiendo la metodología estandarizada de curtido al cromo, según los protocolos descritos por Córdova *et al.* (2013) y Alvarez (2018), mediante una secuencia de procesos consecutivos que incluyeron: pre-remojo (lavado), remojo, pelambre, descarnado, descalcado, piquelado y cromado (Figura 1). El proceso de curtido tuvo una duración de 8 a 10 horas. La temperatura inicial fue de 25 – 30 °C, incrementándose gradualmente hasta alcanzar los 35 – 40 °C. Tras la etapa de basificación (fijación del cromo) se alcanzó un pH final de 3.8 – 4.2. El proceso se realizó con una agitación constante y lenta (6 – 10 rpm en bombo) y una relación baño/cuero de 2:1 en peso (Vargas & Amurrio 2017).



**Figura 1.** Proceso de obtención del cuero crust (Fuente: Elaboración propia).

El agua residual obtenida al finalizar el proceso de cromado se reutilizó hasta tres veces, sin recibir ninguna adición de cromo ni insumos, conformando los tratamientos de baño (T1: primer baño, T2: segundo baño y T3: tercer baño). En cada tratamiento, la solución residual del baño anterior se utilizó directamente en el siguiente; es decir, T2 empleó el agua de T1, y T3 el de T2. En el caso específico del cromo, logramos reutilizar baños con 45.39% de cromo presente en el agua residual, un valor significativo considerando la dosis inicial de 1.89 g de Cr/l (Ravello, 2017). Cada tratamiento incluyó un grupo de 10 pieles ( $n = 10$ ).

Finalmente, todos los cueros crust obtenidos fueron sometidos a un proceso de rebajado para obtener una homogenización de grosor a 1 mm de espesor (INACAL, 2018). El muestreo y evaluación física del cuero crust se llevó a cabo conforme a la norma NTP-ISO 2418 (INACAL, 2006) el cual establece los principios generales para el muestreo y preparación de muestras de cuero para ensayos físicos y químicos. Esta norma garantiza que las pruebas sean representativas, reproducibles y comparables entre tratamientos de reutilización de agua para el cromado y reducción del espesor a 1 mm.

#### Parámetros evaluados

El nivel de cromo en el agua antes de iniciar el proceso de cromado fue evaluado en gramos por litro bajo la forma de cromo aparente y cromo real (Hintermeyer *et al.*, 2013). Ambos parámetros indican cuánto del cromo añadido se ha fijado realmente en la piel (cromo real) y cuánto está presente en el baño o ha

sido absorbido sin fijarse completamente (cromo aparente).

El nivel de cromo aparente se determinó secuencialmente para cada baño de curtido, tomando como referencia el valor inicial de 1.89 g Cr/l (100%). Tras el primer baño, el residual fue de 1.54 g Cr/l (81.5%), en el segundo 1.21 g Cr/l (64.0%) y en el tercero 1.07 g Cr/l (56.6%), calculados mediante la sustracción del cromo absorbido en cada etapa (Rosas, 2019). El cromo real se determinó mediante el análisis de la solución residual en cada baño, obteniéndose 1.46 g Cr/l (77.4%) en el primero, 1.00 g Cr/l (53.0%) en el segundo y 0.86 g Cr/l (45.4%) en el tercero (Hintermeyer *et al.*, 2013; Rosas, 2019). Se determinó también el cromo total absorbido por la piel respecto del baño inicial y en cada baño (Benitez-Campo, 2011).

La evaluación físico-mecánica fue realizada antes y después del rebajado del cuero crust y fue realizada de modo longitudinal (INACAL, 2015), es decir se tomaron muestras en diferentes puntos a lo largo de la piel, a las cuales se sometieron a las pruebas de resistencia y/o formación de grietas cuando se ejerce una fuerza. Los parámetros evaluados fueron: fuerza de grieta (N), según la norma ISO 3377-2:2016 (ISO, 2016); fuerza de ruptura de la flor (N/mm) y distensión a la ruptura de la flor (mm), ambos determinados conforme a la norma ISO 3379:2024 (ISO, 2024). Los tres parámetros permiten una adecuada evaluación del efecto del cromo sobre la piel (Téllez *et al.*, 2004; Vargas & Amurrio, 2017). En adición, se estimó el porcentaje de materia seca de los cueros evaluados con la finalidad de determinar el contenido de cromo (g de cr/kg cuero) (Tolentino, 2021).

#### Diseño experimental

Los datos se analizaron mediante un ANOVA, siguiendo un diseño completamente al azar (Fórmula 1). Los tratamientos consistieron en desarrollar el proceso de curtido reutilizando el agua residual proveniente del cromado (primer, segundo o tercer baño). La adecuación del modelo estadístico se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk para examinar la normalidad del conjunto de datos y la prueba de Bartlett para evaluar la homogeneidad de la varianza (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Se aplicó la prueba de Diferencia Límite Significativa (DLS,  $\alpha = 0.05$ ) para separar las medias de los parámetros estudiados. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software gratuito en línea SAS Ondemand for academics (Student Edition).

$$VR_{ij} = u + \text{Baño}_i + e_{ij}$$

**Fórmula 1.** Modelo aditivo lineal.

VR<sub>ij</sub>: Es la variable respuesta (fuerza de la grieta, ruptura de la flor y resistencia a la ruptura de la flor)

obtenida con el i-ésimo tratamiento de reutilización del agua de baño para realizar el proceso de cromado.

u: es la media general.

Baño<sub>i</sub>: Es el efecto de la i-ésima reutilización del agua de baño para realizar el proceso de cromado (primer, segundo o tercer baño).

e<sub>ij</sub>: Es el error experimental.

**Resultados**

Los resultados mostraron una disminución progresiva en los niveles de cromo, tanto real como aparente, en cada reutilización del agua de baño para realizar el proceso de cromado (primer, segundo o tercer baño, respectivamente), lo que se tradujo en una reducción del consumo de agua fresca y productos químicos. Esta disminución responde a la absorción gradual de cromo por parte de las pieles en cada tratamiento (Tabla 1). A pesar de dicha reducción, las soluciones residuales conservaron concentraciones significativas de cromo soluble, suficientes para mantener su eficacia curtiente en los baños sucesivos. En particular, tras tres reutilizaciones del agua residual del proceso de curtido, se registró 1.07 g de cromo aparente por litro de baño (g/l), lo que evidenció un patrón de agotamiento progresivo y con variabilidad entre los baños, con respecto a la concentración de cromo inicial de 1.89 g/l.

**Tabla 1.** Disponibilidad aparente y real del cromo (Cr) en el agua residual (g/l).

Tratamientos	Disponibilidad de cromo aparente en baño (g/l)	Disponibilidad de cromo real en baño (g/l)	Cromo total absorbido respecto del baño inicial (g/l)	Utilización de cromo absorbido respecto a cada baño (%)
Primer Baño	1.54	1.46	0.35	23.92
Segundo Baño	1.21	1.00	0.27	33.20
Tercer Baño	1.07	0.86	0.09	16.57

Los mejores resultados físico-mecánicos se obtuvieron con el cuero crust producido reutilizando el agua de cromado en el segundo baño (Tabla 2). Si bien no se observaron diferencias significativas en la fuerza de grieta ni en la fuerza de ruptura de la flor (P > 0.05), se detectaron diferencias estadísticamente significativas en la resistencia a la ruptura de la flor (P < 0.05) entre los diferentes tratamientos.

**Tabla 2.** Evaluación del cuero crust según tratamiento de baño.

Parámetro	Reutilización del agua residual		
	Baño 1	Baño 2	Baño 3
Fuerza de grieta (N)	55.5 ± 4.9 <sup>a</sup>	66.3 ± 8.7 <sup>a</sup>	62.3 ± 5.4 <sup>a</sup>
Fuerza de ruptura de flor (N/mm)	51.6 ± 4.9 <sup>a</sup>	61.3 ± 8.7 <sup>a</sup>	57.3 ± 5.4 <sup>a</sup>
Resistencia a ruptura de flor (mm)	7.2 ± 0.3 <sup>b</sup>	9.2 ± 0.6 <sup>a</sup>	7.6 ± 0.3 <sup>b</sup>

Los valores con superíndices diferentes son significativamente diferentes en P < 0.05 de acuerdo con la prueba Diferencia Límite Significativa (DLS).

El rebajado del grosor del cuero no mejoró de forma significativa (P > 0.05) los parámetros físico-mecánicos y los valores encontrados superaron los niveles requeridos por la industria del cuero (Tabla 3). El rebajado incrementó la flexibilidad superficial del cuero crust ovino, el cual se atribuye al aumento de la resistencia a la ruptura de la flor.

**Tabla 3.** Efecto del rebajado del cuero crust.

Parámetro	Rebajado	No Rebajado
Fuerza de grieta (N)	61.4 ± 3.7 <sup>a</sup>	58.4 ± 3.2 <sup>a</sup>
Fuerza de ruptura de flor (N/mm)	61.3 ± 3.7 <sup>a</sup>	52.1 ± 2.9 <sup>a</sup>
Resistencia a ruptura de flor (mm)	8.9 ± 0.3 <sup>a</sup>	7.9 ± 0.2 <sup>a</sup>

Los valores con superíndices diferentes son significativamente diferentes en P < 0.05, de acuerdo con la prueba Diferencia Límite Dignificativa (DLS).

El porcentaje de materia seca (%) de los cueros evaluados fue 80.35% para todos los tratamientos. Los resultados del contenido de cromo en las muestras del cuero (Tabla 4) revelaron que, a pesar de usar la dosis estándar recomendada por la industria (8% sulfato básico de cromo en relación al peso de la piel) esta resultó muy alta y perduró durante los 3 baños, sugiriendo la posible reutilización del agua residual hasta por una cuarta vez.

**Tabla 4.** Contenido de cromo (g) en cuero crust.

Tratamiento	Materia Seca del cuero (g)	g Cr / Kg cuero	g Cr / cuero (repetición)	g Cr / Tratamiento
Baño 1	215.34 ± 22.93 <sup>b</sup>	20.79 ± 1.68 <sup>a</sup>	4.52 ± 0.76 <sup>a</sup>	13.55 <sup>a</sup>
Baño 2	337.20 ± 88.12 <sup>a</sup>	13.61 ± 2.61 <sup>b</sup>	4.29 ± 0.70 <sup>a</sup>	12.88 <sup>a</sup>
Baño 3	224.71 ± 86.69 <sup>b</sup>	7.84 ± 0.54 <sup>c</sup>	1.83 ± 0.79 <sup>b</sup>	5.50 <sup>b</sup>

Los valores con superíndices diferentes son significativamente diferentes en P < 0.05 de acuerdo con la Diferencia Límite Significativa (DLS).

**Discusión**

Nuestra investigación demostró el potencial de reutilizar el agua residual del proceso de curtido con

romo como estrategia para optimizar la producción de cueros, minimizando su impacto ambiental (Ortiz & Carmona 2015). La reutilización del agua residual del curtido en hasta tres baños consecutivos no afectó la resistencia a la propagación de grietas (Ortiz, 2013). Los valores obtenidos para los tres tratamientos (T1: 55.5 N, T2: 66.3 N y T3: 62.3 N) fueron muy superiores al rango establecido por la norma técnica ISO (2016), que considera aceptables valores entre 30 y 40 N. Este resultado podría atribuirse a una mejor redistribución del cromo, y su variabilidad, a diferencias estructurales del cuero o en la absorción del curtiente (Córdova *et al.* 2013; Alvarez 2018).

Los valores de fuerza de ruptura de la flor revelaron que la reutilización del agua residual del curtido hasta en tres ocasiones no compromete su resistencia. Los resultados obtenidos para los tres tratamientos (T1: 51.6 N/mm, T2: 61.3 N/mm y T3: 57.3 N/mm) superan ampliamente el valor mínimo de 30 N/mm establecido por la norma técnica ISO (2024). Esta respuesta podría deberse a una mejor penetración del curtiente (Tolentino, 2021), aunque la variabilidad ( $\pm 8.7$  N/mm) encontrada para el T2 sugiere cierta heterogeneidad en las muestras o en el proceso de curtido (Alvarez, 2018).

Según la norma ISO (2024), un cuero de buena calidad debe presentar una resistencia a la ruptura de la flor superior a 5 mm. En este estudio, los tres tratamientos evaluados superaron dicho umbral, con valores de 7.2 mm (T1), 9.2 mm (T2) y 7.6 mm (T3). Tal como señaló Córdova *et al.* (2013), respecto a la resistencia a la ruptura de la flor, el valor registrado para T2 sugiere que, durante el segundo baño, se alcanzó una mayor elongación en la capa de flor, posiblemente debido a una mejor distribución del curtiente o a un tiempo de fijación más eficiente. Esta mayor capacidad de elongación antes de la ruptura podría estar asociada a una estructura colagénica más abierta o uniforme, favorecida por las condiciones del segundo baño. En cambio, los valores encontrados para T1 y T3 reflejan una menor deformabilidad, posiblemente relacionada con una penetración menos eficaz o una distribución más irregular del cromo, especialmente en T3, donde su menor concentración podría haber reducido la efectividad del proceso (Hintermeyer *et al.*, 2013).

El rebajado no comprometió la resistencia del cuero a la propagación de la grieta ni a la ruptura de la flor, manteniéndose dentro de los parámetros estructurales aceptables para la industria del cuero (fuerza de la grieta  $> 40$  N y ruptura de la flor  $> 5$  mm). Esto sugiere que la integridad del colágeno se conserva y que la mejor penetración del curtiente tras el rebajado mejora la cohesión y flexibilidad de la flor, posiblemente por una distribución más uniforme, o una reducción de tensiones internas (Hintermeyer *et al.*, 2013). Nuestros resultados de fuerza de grieta y fuerza de ruptura de la flor superaron los valores reportados por Vargas &

Amurrio (2017), aunque la resistencia a la ruptura de la flor fue inferior.

La eficiencia de absorción del cromo también se vio afectada por el aumento de la turbidez, posiblemente causada por colágeno liberado desde la piel (Gallego, 2011). Debido a limitaciones presupuestarias, no fue posible realizar un análisis más exhaustivo de la composición del baño. Un análisis más completo de la composición del baño habría permitido identificar otros compuestos responsables y mejorar nuestra investigación.

Según Khan *et al.* (2018), en su estudio sobre el curtido de pieles caprinas, los valores de fuerza de ruptura de flor (20.04 – 20.43 N/mm) y resistencia a la ruptura (6.08 – 7.34 mm) obtenidos al reutilizar baños de curtido con diferentes proporciones de cromo recuperado (10% recuperado vs. 3% recuperado + 5% fresco) no solo cumplen con los estándares ISO, sino que también son comparables a los logrados mediante el curtido tradicional. Estos resultados demostraron que la incorporación de cromo recuperado en los baños no afectó las propiedades mecánicas esenciales del cuero, especialmente su resistencia superficial.

La reutilización del baño de curtido hasta el agotamiento del cromo de forma progresiva por tratamiento (T1: 13.55 g, T2: 12.88 g y T3: 5.50 g) permitió una reducción de hasta un 59.41% en el consumo de cromo (Tabla 4), lo que representa un alto potencial para disminuir su emisión al ambiente. Sin embargo, es fundamental optimizar el proceso para garantizar una absorción eficiente y evitar la acumulación de sustancias que puedan perjudicar la calidad del cuero o el medio ambiente. Este método mantiene la calidad del cuero crust ovino, reduce la huella ambiental y optimiza el uso de recursos, ofreciendo una solución práctica y sostenible al eliminar pasos intermedios.

Recomendamos continuar investigando y desarrollando tecnologías específicas para cada etapa del proceso de curtido, con el objetivo de optimizar la reutilización del agua y minimizar el impacto ambiental. La implementación de estas tecnologías permitiría no solo reducir significativamente la carga contaminante de los efluentes, sino también optimizar el uso de recursos hídricos y disminuir los costos de producción.

## Conclusiones

La dosis inicial de 1.89 g/l de cromo en el baño de curtido fue excesiva para nuestro sistema, lo que podría generar una mayor carga contaminante en los efluentes. Por ello, consideramos evaluar la reducción de esta dosis para minimizar el impacto ambiental del proceso de curtido.

El baño 2 no alteró las propiedades del cuero crust porque mantuvo una concentración adecuada de cromo (1.21 g Cr/l), lo que permitió una fijación eficiente y homogénea sin saturar la piel. Esto estabilizó el baño y

favoreció un curtido que preservó y mejoró las propiedades físico-mecánicas del cuero crust. A diferencia de los tratamientos convencionales de curtido con cromo, que implican altos costos y sistemas técnicos complejos, la reutilización directa del agua del baño, sin necesidad de aditivos ni tratamientos previos, representa una alternativa simple, económica y accesible. Esta estrategia resulta especialmente adecuada para curtiembres de pequeña y mediana escala, facilitando una gestión más sostenible y rentable del proceso.

#### Literatura citada

- Alvarez P.E. 2018. Características tecnológicas del cuero para capellada de alpaca huacaya (*Lama pacos*) adulta, curtido mediante los métodos wet-white y wet-blue. Tesis para optar el título de Ingeniero Zootecnista. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3455>.
- Benítez-Campo N. 2011. Producción limpia y biorremediación para disminución de la contaminación por cromo en la industria de curtiembres. Ambiente y Sostenibilidad, 1: 25-31. Revista del Doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales. <https://revistaambiente.univalle.edu.co/index.php/ays/article/view/4335/6555>.
- Chávez Á. 2010. Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 9(17): 41-50. <http://hdl.handle.net/11407/869>.
- Córdova H.M., Vargas R., Cesare M.F., Flores del Pino L. & Visitación L. 2014. Tratamiento de las aguas residuales del proceso de curtido tradicional y alternativo que utiliza acomplexantes de cromo. Revista de la Sociedad Química del Perú, 80(3): 183-191. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v80n3/a05v80n3.pdf>.
- Córdova H.M., Vargas R., Téllez L., Cesare M.F., Becker R. & Visitación L. 2013. Influencia del uso de acomplexantes en el baño de curtido sobre la calidad final del cuero. Revista de la Sociedad Química del Perú, 79(4): 388-397. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v79n4/a10v79n4.pdf>.
- Duque O.J. 2019. Diseño de un sistema de recuperación de cromo en el proceso de curtido de cuero al cromo en Curtiembres Búfalo. [Tesis] Informe de trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Químico Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química. Medellín, Colombia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/7a7fc4ef-9e8e-48d4-9511-6ac9735ce4fd/content>.
- Gallego M. 2011. Caracterización y tratamiento mediante membranas de las aguas residuales de descalcado de una industria de curtidos para su reutilización. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/15826>.
- Gutiérrez H. & De la Vara R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. Segunda Edición. Mc Graw Hill Interamericana.
- Hintermeyer B.H., Lacour N.A. & Tavani E.L. 2013. Reutilización del cromo (III) en el líquido residual de curtido. En: II Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. 629 – 634. <https://bit.ly/rEA-UNALM-29>.
- INACAL. 2006. NTP-ISO 2418:2006. Cuero. Ensayos químicos, físicos, mecánicos y de solidez. Ubicación y preparación de muestras para los ensayos. Dirección de Normalización – INACAL.
- INACAL. 2015. R.D. N° 017-2015-INACAL/DN: Aprueban Normas Técnicas Peruanas en su versión 2015, sobre cobre y aleaciones de cobre, calzado y otras. NTP 291.018:1970 (revisada el 2015): CUEROS. Método para determinar la carga y la distensión a la rotura de la flor y al reventado de los cueros livianos. Primera edición. Reemplaza a la NTP 291.018:1970 (revisada el 2010). El Peruano, 32(13522): 573699-573701. Lima, 29 de diciembre de 2015. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1329244-2>. <https://busquedas.elperuano.pe/cuadernillo/NL/20151231>.
- INACAL. 2018. R.D. N° 033-2018-INACAL/DN: Aprueban Normas Técnicas Peruanas en su versión 2018 respecto a calzado, peletería, cuero y otros. NTP-ISO 5432 (revisada el 2018): Cuero. Pieles de oveja en estado wet blue. Especificaciones. Primera edición. Reemplaza a la NTP-ISO 5432:2008 (revisada el 2013). El Peruano, 35(14714). Viernes 9 de noviembre de 2018. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1710449-1>. <https://busquedas.elperuano.pe/cuadernillo/NL/20181109>.
- ISO. 2016. ISO 3377-2:2016 | ULTCS/IUP 8 Leather — Physical and mechanical tests — Determination of tear load. Part 2: Double edge tear. Edition 2. ISO (International Organization for Standardization). <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/88/68861.html?browse=tc>.
- ISO. 2024. ISO 3379:2024 | IULTCS/IUP 9 Leather — Determination of distension and strength of surface (ball burst method). Edition 3. ISO (International Organization for Standardization). <https://www.iso.org/standard/87432.html>.
- Kanagaraj J., Senthilvelan T., Panda R.C. & Kavitha S. 2015. Eco-friendly waste management strategies for greener environment towards sustainable development in leather industry: a comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 89, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.013>.
- Khan K., Khan I.H., Khan I.I., Al Mahmud A. & Hossain D. 2018. Recovery And Reuse of Chromium From Spent Chrome Tanning Liquor By Precipitation Process. American Journal of Engineering Research (AJER), 7(1): 346-352. <https://www.ajer.org/papers/Vol-7-issue-1/ZR0701346352.pdf>.
- Kumar R., Basu A., Bishayee B., Chatterjee R.P., Behera M., Ang W.L., Pal P., Shah M., Tripathy S.K., Ambika S., Janani V.A. Chakraborty S., Nayak J. & Jeon B.-H. 2023. Management of tannery waste effluents towards the reclamation of clean water using an integrated membrane system: A state-of-the-art review. Environmental Research, 229: 115881. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115881>

- Ortiz N.E. & Carmona J.C. 2015. Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de curtiembres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. *Revista Luna Azul*, (40): 117-126. DOI: 10.17151/10.17151/luaz.2015.40.9.
- Ortiz N.E. 2013. 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. Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente - Modalidad Virtual. Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas. Universidad de Manizales, Colombia. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/1076>
- Ortiz N.E., Ayala J., León A.J. & Mahecha L.C. 2018. Extracción y recuperación de sulfuros de aguas residuales de curtiembres. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(2): 285-297. <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/10033>.
- Prasad S., Yadav K.K., Kumar S., Gupta N., Cabral-Pinto M.M.S., Rezania S., Radwan N. & Alam J. 2021. Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *Journal of Environmental Management*, 285: 112174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112174>
- Ravello M.O. 2017. Evaluación Técnica-Económica, al recuperar y reutilizar el cromo en efluentes de curtiembre rebaza, minimizando el impacto ambiental negativo. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/12519>.
- Rosas Y.E. 2019. Caracterización y remoción de cromo (III) de aguas residuales de curtiembres del parque industrial de Río Seco utilizando hueso de olivo (*Olea europea*) procesado como biosorbente. Tesis para optar el Título Profesional de INGENIERO QUÍMICO. Escuela Profesional de Ingeniería Química / Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9250>.
- Téllez J., Roxs M.C. & Gaitán A.M. 2004. Aspectos toxicológicos relacionados con la utilización del cromo en el proceso productivo de curtiembres. *Revista de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional Colombia*, 52(1): 50-61. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/74585>.
- Tolentino J.C. 2021. Caracterización de la piel de alpaca seco salado y procesada hasta pelambre con fines comestibles para perros. Tesis Ingeniero Zootecnista. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4784>.
- Vargas D. & Amurrio D. 2017. Alternativa de proceso de curtido con alto agotamiento de Cromo para las curtiembres tradicionales de la ciudad de Cochabamba. *Acta Nova*, 8(1): 3-30. <https://bit.ly/rEA-UNALM-30>.

<sup>1</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina \ Facultad de Zootecnia \ Departamento de Producción Animal \ Laboratorio de Curtiembre. Lima-Perú. Correo: lab\_curtiembre@lamolina.edu.pe.

<sup>2</sup> Correo autor corresponsal: jcandio@lamolina.edu.pe.