

ARTÍCULO ORIGINAL

Biotratamiento para reducción de carga orgánica generada en el agua residual de curtiembres

Biotreatment to reduce the organic load generated in tannery wastewater

Leoncio Exequiel Chiclote Rodríguez^{1a}, Bertha Chiclote Díaz^{1a}, Juan Carlos Mariños Legendre^{1b*}, Amílcar Santos Diego Pérez^{2c}, Ana Isabel Huamán Jiménez^{2d} y Miguel Elías Pinglo Bazán^{1d}

¹ Lizberth S.A.C., Trujillo, Perú

² Instituto Tecnológico de la Producción, Trujillo, Perú

^a lizberthsac11@gmail.com, ^bjmarinos@itp.gob.pe, ^cadiego@itp.gob.pe, ^dahuaman@itp.gob.pe, ^empinglo@itp.gob.pe
* Autor de correspondencia

Resumen

Uno de los problemas recurrentes que limita la competitividad de las empresas dedicadas a la curtición y adobo de pieles es el cumplimiento y adecuación a la normativa ambiental DS-003-2002-PRODUCE por parte de OEFA y el DS-021-2009-VIVIENDA impuesta por SEDALIB; normas que exigen no sobrepasar los límites permisibles de agua residual. Conocido ello, se presenta una alternativa eficiente para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y pH presentes en las aguas de remojo a través de uso de microalgas *Chlorella pyrenoidosa* que muestran eficiencias del 80, 90 y 95 por ciento. La metodología empleada consta de equipos de filtración para el pretratamiento de las aguas de remojo que permiten la retención y separación de cuerpos voluminosos flotantes; un sistema de coagulación y floculación para poder operar de forma óptima en menor tiempo y una fase en suspensión que arrastra consigo el agua residual; en tanto para la parte de biorremediación se utiliza el tratamiento cerrado, el cual consta de un método de agitación magnética y control de temperatura. Con una muestra de 25-35 m³/día de la etapa de remojo, se logró reducir entre un 80-92% los mencionados parámetros, obteniendo una concentración de DBO₅ y DQO en torno a los 1040,42 mg/L y 1568 mg/L respectivamente; en tanto la concentración final

de nutrientes e inhibidores presentes en el agua residual de remojo llegan a los 18.76 mg/L para el caso de nitrógeno amoniacial, 25.05 mg/L de nitrógeno total, 15.23% de salinidad y 0.87 mg/L de sulfuro; todo ello bajo el sistema de tratamiento validado y sostenible con el medio ambiente a diferencia de las metodologías convencionales que solo descargan los grandes restos de albumina y globulina generando colapso en la red de alcantarillado.

Palabras claves: biotratamiento; efluentes; agua residual; curtientes; demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno

Abstract

One of the recurring problems that limits the competitiveness of companies engaged in tanning and leather marination is compliance and adaptation to the environmental regulations DS-003-2002-PRODUCE by OEFA and DS-021-2009-VIVIENDA imposed by SEDALIB; standards that require not to exceed the permissible limits of waste water. Known this, an efficient alternative is presented to reduce the Biochemical Oxygen Demand (BOD5), Chemical Oxygen Demand (COD) and pH present in soaking waters with microalgae that show efficiencies of 80, 90 and 95 percent. The methodology used consists of filtration equipment for the pretreatment of soaking water which allow the retention and separation of floating bulky bodies; a coagulation and flocculation system to be able to operate optimally in less time and a suspended phase that carries the wastewater with it; while for the bioremediation part the closed treatment is used, which consists of a method of magnetic agitation and temperature control. With a sample of 25-35 m³/day of the soaking stage, it was possible to reduce between 80-92% the aforementioned parameters, obtaining a concentration of DBO5 AND COD around 1040.42 mg/L and 1568 mg/L respectively; for ammoniacal nitrogen, 25.05 mg/L total nitrogen, 15.23% salinity and 0.87 mg/L sulfide; all this under the validated and sustainable treatment system with the environment unlike conventional methodologies that only discharge the large remains of albumin and globulin generating collapse in the sewer network.

Keywords: biotreatment; effluents; waste water; tanneries; biochemical oxygen demand; chemical oxygen demand

Introducción

Al cierre del año 2020 la industria del cuero a nivel regional congregó a un promedio de 118 empresas activas según la Superintendencia Nacional de Aduanas y de

Administración Tributaria, obteniendo un total de 550 empresas a nivel nacional. El problema identificado que limita la competitividad de las empresas dedicadas a esta actividad transformativa y del sector en su conjunto, es el cumplimiento y adecuación de la normativa ambiental DS-003-2002-PRODUCE por parte de OEFA y el DS-021-2009-VIVIENDA impuesta por SEDALIB; normas que exigen no sobrepasar los límites permisibles de agua residual antes de ser descargado al alcantarillado, poniendo en riesgo la continuidad de las empresas de forma temporal o indefinida tras la aplicación de multas sancionatorias (Zegarra, 2017).

Los sistemas de tratamientos de aguas residuales convencionales utilizan productos químicos, los cuales tienen un alto costo e implica tener medidas de contención para la salud del trabajador (Salazar, 2019). Frente a ello, la evidencia internacional viene apostando con mayor énfasis por la aplicación de tratamiento alternativos entre los cabe mencionar la eliminación de nutrientes a partir del uso de microalgas. Las aguas residuales de las curtideras tienen un alto contenido orgánico y son ricas en compuestos nitrogenados que son esenciales para el cultivo de microalgas, por lo que se estudió inicialmente la producción de biomasa y la eliminación de nitrógeno amoniacial, fósforo y oxígeno químico por la microalga *Scenedesmus sp.*, cultivada en aguas residuales de curtiduría, a diferentes concentraciones de aguas residuales (entre 20% y 100%), intensidad de luz (entre 80 y 200 μmol de fotones m^2 / s) a una temperatura de 25 ° C y aireación constante. Los resultados mostraron que la adaptación de microalgas para esta fuente de nutrientes fue efectiva.

El cultivo de *Scenedesmus sp.* mostró la concentración máxima de biomasa (0.90 g/L) y la máxima eliminación de nitrógeno amoniacial (85.63%), fósforo (96.78%) y DQO (80.33%) en una curtiduría de 88.4% e intensidad de luz de 182.5 μmol fotones m^2 / s . (Wang, Chen, Xinfei, Quan & Yu, 2017).

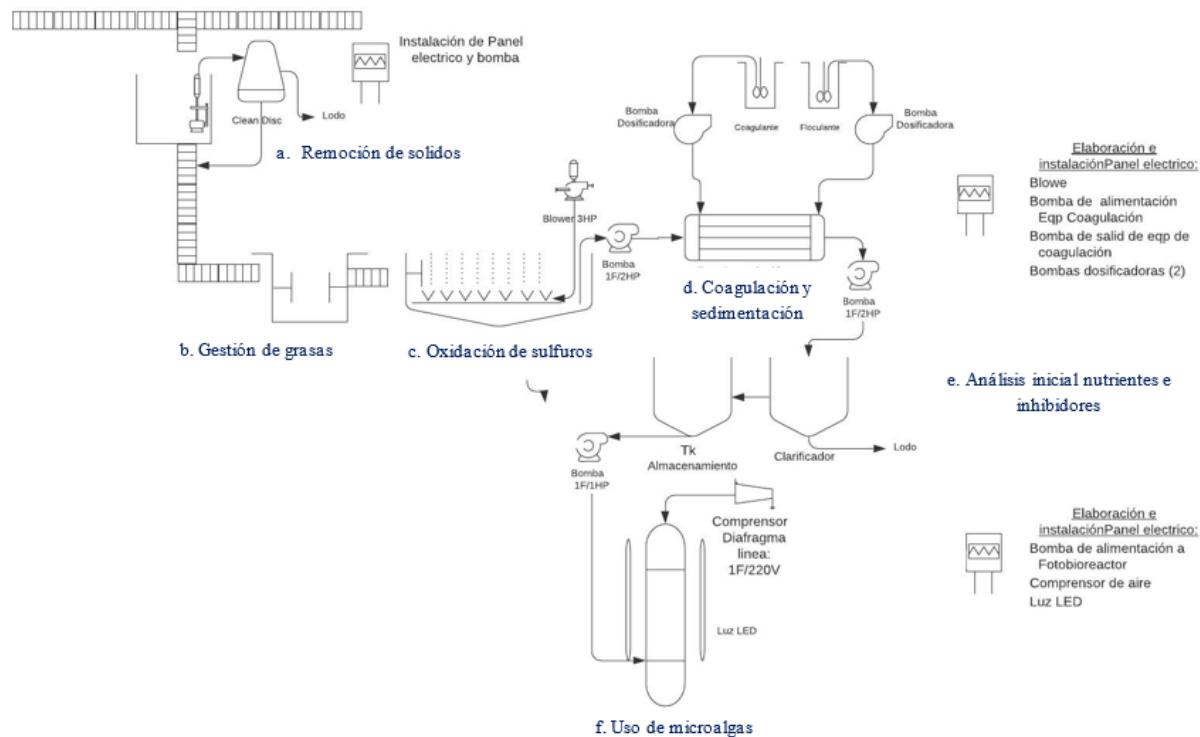
El biotratamiento hoy presentado ha validado su eficacia bajo un proceso contemplado en fases secuenciales entre las que se considera principalmente la incubación y preparación de microalgas del tipo *Chlorella pyrenoidosa* como agentes de remoción de carga contaminante y que se ha posiciona exitosamente como alternativa rentable y eficiente en el tratamiento de aguas residuales originadas dentro de todo el proceso que implica el adobo y curtición de pieles.

Material y métodos

La metodología aplicada contempló las siguientes actividades secuenciales (véase Imagen 1).

Imagen 1

Diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales



a. Remoción de sólidos

La remoción de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables, se ha ejecutado de la siguiente forma: descarga del baño residual de la etapa de remojo en tres tiempos: remojo, primer lavado y segundo lavado, cada uno en un tiempo intervalo de 20 minutos hasta completar el pozo de almacenamiento.

b. Gestión de grasas

Por medio de un método continuo se han retenido las grasas emulsionadas, en tanto, los aceites solubles pasaron a la siguiente etapa para verificar el correcto funcionamiento de retención del sistema.

c. Oxidación de sulfuros

Iniciando con la preparación del sulfato de manganeso a un porcentaje de dilución del 2.5% en una solución %P/%V, inmediatamente dosificado a 50 ppm. Posteriormente se realizó el llenado del pozo de homogenización y oxidación a la capacidad e 20 m³, realizando el encendido del soplador y calibrando la presión a 1.5 PSI como condición de operación para la suministración de transferencia de oxígeno, así mismo, se verificó que la concentración de oxígeno disuelto se

encontrase en un rango de 9 a 11 mg/L. En caso de presencia de espuma mayor de una altura de 10 cm, se dosificó antiespumante con una dosis de 10 ppm. En adelante se realizaron las tomas de muestra cada dos horas en un tiempo máximo de 8 horas para determinar la concentración de DBO₅.

d. *Coagulación y sedimentación de sólidos sedimentables y coloides*

Para el pre tratamiento, ha sido importante llevar a una condición de operación fija, en este caso el valor de pH adecuado ha sido de 7.5, haciendo uso de ácido fosfórico al 5M. A continuación, se realiza la preparación del coagulante: Sulfato férrico al 10% con una dosis de 1500, 2000 ppm, 2500 ppm y 3000 ppm, realizando la dosificación en vasos de precipitados de 100 ml y la preparación de poliacrilamida al 1% con una dosis a 10 ppm, aplicando el mismo proceso mencionado.

e. *Análisis inicial de nutrientes e inhibidores presentes en el agua residual de remojo*

Previa a la puesta en marcha del tratamiento a base de cultivos puros de microalga *Chlorella pyrenoidosa* (en litros) junto con el agua residual de remojo, se identificó la cantidad de nutrientes residuales bajo la seguridad que el sustrato en forma de N-NH₃ (Nitrógeno amoniacal), Nitrógeno Total y fosfatos serán aprovechables para la remoción de materia orgánica e inorgánica. Al mismo tiempo que se identificaron los inhibidores presentes en el agua residual, que ralenticen el proceso fotosintético de adaptación, crecimiento, estacionario y muerte de la microalga para la remoción de la carga contaminante.

Tabla 1

Concentración inicial de nutrientes e inhibidores presentes en el agua residual de remojo

Parámetro	Nutrientes/inhibidor	Concentración
Nitrógeno amoniacal*	Nutriente	676.1 mg/L
Nitrógeno total*	Nutriente	724.3 mg/L
Salinidad*	Inhibidor	16.30%
Fosfatos*	Nutriente	11 mg/L
Sulfuro**	Inhibidor	11 mg/L

Fuente:

*Parámetro evaluado por laboratorio externo

**Parámetro evaluado por laboratorio interno

Según la Tabla 1, la concentración de nutrientes como nitrógeno amoniacal y fosfatos son altas para una buena adaptación y crecimiento exponencial de la microalga *Chlorella pyrenoidosa*, lo que permitió generar expectativas que exista una disminución en más o menos 50% de reducción de DBO₅.

Por otra parte, la concentración de agentes inhibidores del crecimiento fotosintético como lo es la salinidad, es un valor significativo, al igual que el sulfuro (S-2) en su estado iónico es un agente reductor, por tanto, se estimó la disminución a través del tiempo de la concentración de oxígeno disuelto, debido al consumo rápido de las microalgas para subsistir en su hábitat.

f. *Crecimiento de biomasa microalgal de Chlorella pyrenoidosa y conductividad*

Tras el estudio del crecimiento de la biomasa microalgas a través de diversos días del tiempo de residencia hidráulica se determinó realizar el análisis durante el último día para evaluar la conductividad y concentración resultando, obteniendo una curva de crecimiento para estudio (véase Tabla 2).

Tabla 2

Conductividad y Curva de crecimiento microalgal a través del tiempo durante 6 días, medición vía óptica con objetivo 40X

Tiempo de residencia hidráulica (TRH)	Conductividad (mS/cm)	Concentración celular (10^6 cel/ml)
0	25.2	7.325
2	24.8	6.075
4	26	7.525
6	25.6	8.175
8*	25.3	4.550

*Esta medición consideró para evaluar el crecimiento de la microalga en el último día.

Gráfico 1

Curva de crecimiento microalgal a través del tiempo.



Según el Gráfico 1 se logra visualizar las diferentes etapas del crecimiento microalgal de la *Chlorella pyrenoidosa* efectivas para la remoción de la carga contaminante presente en el agua residual. Evidentemente la etapa inicial de incubación no se logró visualizar debido que se incubó sin mezclar las microalgas en ambientes aislados y controlados. En tanto, se demuestra la etapa de adaptación durante los dos primeros días, e inmediatamente la etapa de crecimiento exponencial con el mayor porcentaje de remoción durante los días del 2 al 6, por último, del día 6 al 8 la etapa de transición a muerte de la microalga, cumpliendo su ciclo fotosintético.

Resultados

La remoción de la demanda bioquímica de oxígeno ha sido excepcional desde el segundo día de tratamiento, demostrando que el tratamiento logró ser eficiente en materia orgánica soluble. Por otra parte, los resultados de materia inorgánica disuelta y fragmentada en la solución acuosa, representada como DQO, también logró un excelente resultado.

Tabla 3

Concentración de DBO_5 y DQO a través del tiempo de residencia hidráulica

Tiempo de residencia hidráulica (TRH)	DBO_5 (mg/L)	DQO (mg/L)
0	2500	4538
2	1040,42	1568

Tabla 4

Concentración final de nutrientes e inhibidores presentes en el agua residual de remojo

Parámetro	Nutrientes / Inhibidor	Concentración
Nitrógeno amoniacal	Nutriente	18.76 mg/L
Nitrógeno total	Nutriente	25.05 mg/L
Salinidad	Inhibidor	15.23%
Sulfuro*	Inhibidor	0.87 mg/L

*Resultado analizado en laboratorio interno

Discusión

La cosecha de la biomasa algal es el procedimiento más complejo y costoso en el cultivo de microalgas, existiendo técnicas de aplicación a cultivos abiertos donde la biomasa se encuentra en constante exposición a las condiciones del ambiente, así como también la aplicación de cultivos cerrados conocidos como fotobiorreactores los cuales se encuentran prácticamente aislados del entorno. La elección toma en consideración factores biológicos, técnicos, económicos y sobre todo ambientales como: la luz, temperatura, oxígeno disuelto entre otros.

La alternativa de aplicar cultivos de algas sobre el tratamiento de aguas residuales ha demostrado su eficiencia en cuanto al crecimiento celular relativo de los mismos, la razón se fundamenta en la existencia de un alto porcentaje de nutrientes entre los que las cepas de cultivo de *Chlorella pyrenoidosa*, entre otras variedades, logran exitosamente su desarrollo (Mendoza, J., et al., 2018). La elección del proyecto por apostar por cultivos cerrados radica en el control que éstos permiten en cuanto a los parámetros de estudio de la misma forma que se comprueba la obtención de cultivos hiperconcentrados.

Al concentrar consorcios de algas bacterianas y suspenderlos en un tratamiento de membrana con la aplicación de un fotoreactor de membrana (PMBR) que cultive el consorcio algal-bacteriano reduciría significativamente los tiempos, siendo que el uso de algas bacterianas logró eliminar el amonio casi por completo y la eficiencia de eliminación de la demanda química de oxígeno fue del 90% (Qu et al., 2021)

En un estudio realizado por Ramos, Pizarro (2018) se evaluó el crecimiento y la eficiencia de remoción de nutrientes disueltos por la microalga *Chlorella vulgaris*. El resultado de crecimiento en la condición indoor alcanzó un valor máximo de $4,17 \cdot 10^6 \pm 7,57 \cdot 10^5$ células m/L en el día 6, mientras que en la condición experimental outdoor el crecimiento máximo obtenido fue de $2,81 \cdot 10^6 \pm 2,69 \cdot 10^5$ células m/L alcanzado en el día 2.

Nuestro estudio evidencia en torno al crecimiento de la biomasa de microalgas muestra un incremento exponencial con el paso del tiempo de residencia hidráulica, alcanzando su mayor concentración ($8.175 \cdot 10^6$ cel/ml) al sexto día, posteriormente se denota la caída del crecimiento lo que evidencia el cumplimiento de su ciclo fotosintético. Estos resultados refuerzan la idea de la existencia de una relación directa entre el crecimiento algal y el consumo de nutrientes.

La investigación internacional y los resultados de nuestra propuesta logran finalmente comprobar la disminución de la carga orgánica DBO5 y DQO; asimismo, tras el análisis final de nutrientes e inhibidores presentes en el agua residual. Se corrobora la reducción de la materia orgánica percibida como DBO5 y materia inorgánica como DQO,

logrando reducir, debido al elevado sustrato que existe en la solución en forma de nitrógeno amoniacal, nitrógeno total fosfatos.

Rosales, Rodríguez & Ballen (2018) aplican una evaluación de la capacidad de crecimiento y de remoción de nitrógeno, fósforo y cromo por parte de la microalga *Scenedesmus* sp., comparando la eficiencia entre las células libres e inmovilizadas en una matriz de esponja de Luffa. Los resultados confirman remociones superiores al 90% para NO₃– 3, NH₄⁺ 4, PO₄^{3–} 4 y cromo total, así como una reducción importante de la DBO y DQO (> 97%) debido al efecto sinérgico con las bacterias presentes en los cultivos de la microalga.

Khouni, Louhichini & Ghrabi, (2020), por su parte confirman que el uso de microalgas y sistemas adjuntos para la producción de biomasa y tratamiento de aguas residuales, independientemente del período de funcionamiento permiten la eliminación de la materia orgánica más soluble del efluente tratado entre un 80% a 90%, siendo que los resultados obtenidos indican que la tasa de carga de la masa influye en la eficiencia de la eliminación de materia orgánica; lo que se ve optimiza a través de la alternativa eficiente de la propuesta que obtiene eficiencias en torno al 80, 90 y 95 por ciento para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y pH presentes en las aguas de remojo.

Conclusiones

Debido al tratamiento del agua residual generada de 25-35 m³/día de la etapa de Remojo bajo el sistema del Tratamiento, se logró reducir entre un 80-92% la DBO₅ (Demanda bioquímica de oxígeno) y DQO (Demanda química de oxígeno), a diferencia de las metodologías convencionales que solo descargan los grandes restos de albumina y globulina generando colapso en la red de alcantarillado. La implementación de este biotratamiento de efluentes basado en el uso de un Tratamiento con microalga *Chlorella pyrenoidosa*, cumple con los límites máximo permisibles de DS 021-2009-VIVIENDA Y DS 003-2002- PRODUCE.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad – INNOVATE PERÚ por el cofinanciamiento para el desarrollo de la presente investigación y por su apoyo continuo al ecosistema con fondos para la generación de proyectos innovadores realizando el acompañamiento técnico oportuno que finalmente lograr un impacto positivo en el desarrollo productivo y el fortalecimiento de los actores del sistema nacional de innovación empresarial del Perú.

Contribución de autoría

Leoncio Exequiel Chiclote Rodríguez, Bertha Chiclote Díaz, Juan Carlos Mariños Legendre y Amílcar Santos Diego Pérez concibieron la idea, diseñaron el estudio, recogieron los de datos y realizaron el análisis e interpretación de datos. Ana Isabel Huamán Jiménez realizó la búsqueda bibliográfica, revisó el borrador y elaboró el primer borrador. Juan Carlos Mariños Legendre revisó el primer borrador del manuscrito y elaboró la versión final. Miguel Elías Pinglo Bazán realizó la revisión crítica de su contenido y validación final del manuscrito.

Conflictos de interés

Ninguno.

Referencias bibliográficas

- DS-003-2002-PRODUCE (2002). Que aprueba los Límites Máximos Permisibles y Valores Referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. *Diario Oficial El Peruano*. <https://bit.ly/3kWgdHh>
- DS-021-2009-VIVIENDA.(2009). Que aprueba los Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. *Diario Oficial El Peruano*. <https://bit.ly/3mew2Ze>.
- Khouni, I., Louhichi, G., & Ghrabi, A. (2020). Assessing the performances of an aerobic membrane bioreactor for textile wastewater treatment: Influence of dye mass loading rate and biomass concentration. *Process Safety and Environmental Protection*, 135, 364-382. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.011>.
- Mendoza, J., León, M., Nunja, J., Rodríguez, R., Vera, M., & Ipanaqué, J. (2018). Remoción de demanda química de Oxígeno de efluentes de remojo de curtiduría utilizando microalgas *Chlorella* sp. viva en suspensión. *Infinitum...*, 8(2). <https://doi.org/10.51431/infinitum.v8i2.487>.
- Qu, F., Yang, Z., Li, X., Yu, H., Pan, Z., Fan, G., He, J., & Rong, H. (2021). Membrane fouling control by UV/persulfate in tertiary wastewater treatment with ultrafiltration: A comparison with UV/hydroperoxide and role of free radicals. *Separation and Purification Technology*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117877>.
- Ramos, R., Pizarro, R. (2018). Crecimiento y capacidad de biorremediación de *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) cultivada en aguas residuales generadas en el cultivo del pez dorado *Seriola lalandi* (Perciformes: Carangidae). *Revista de biología marina y oceanografía*, 53(1). <https://bit.ly/3opXSoe>.

Rosales, G., Rodríguez, C., Ballen, M. (2018). Remoción de contaminantes y crecimiento del alga *Scenedesmus* sp. en aguas residuales de curtidores, comparación entre células libres e inmovilizadas. *Ingeniería y ciencia*, 28, 11-34. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6795676>.

Salazar, J. (2019). *Evaluación y diagnóstico aplicando una nueva tecnología para reducir carga contaminante de los efluentes líquidos de una curtidera en el distrito de El Porvenir*. [Tesis de Ingeniero, Universidad Nacional de Trujillo]. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/12918>

Wang, X., Wang, G., Chen, S., Xunfei, F. De, Quan, X., & Yu, H. (2017). Integración de membrana filtración y fotoelectrocatalisis en gC 3 norte 4 / CNTs / Al 2 O 3 membrana con respuesta a la luz visible para un mejor tratamiento del agua. *Journal of Membrane Science*, 541(1), 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.06.046>.

Zegarra, E. (2017). *Propuesta de mejora en los procesos de pelambre y curtido para reducir costos operacionales de la curtidera Chimu Murgia Hnos S.A.C*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Privada del Norte]. <http://hdl.handle.net/11537/12347>