

## Evaluación técnico-económica del uso de biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres

### Technical-economic evaluation of the use of biopolymers for the treatment of wastewater of a tannery

Nickole Basurto-Flores<sup>1</sup>, Nataly Medina-Guerrero<sup>2</sup>

#### Resumen

**[Introducción]:** Durante años las aguas residuales de curtiembres han sido vertidas a diversas fuentes de aguas sin control alguno o con tecnologías poco eficientes, lo que genera un impacto en la calidad del agua. **[Objetivo]:** Se evaluó la viabilidad técnico-económica del uso del biopolímero pectina y quitosano para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres. **[Metodología]:** Se efectuó la extracción de pectina a partir de la cocona y el quitosano a partir de camarón. Se realizó una prueba de jarras donde se combinó el agua residual y los biopolímeros, la velocidad de agitación fue de 120 rpm y el tiempo de contacto de 1, 2 y 3 h. Se realizaron análisis de pH, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST) y  $\text{Cr}^{+6}$  de las muestras obtenidas. Para la comparación con Valores Máximos Admisibles (VMA) se utilizaron las muestras que mostraron mayor remoción de SST y  $\text{Cr}^{+6}$ . Para el análisis estadístico de los diferentes tiempos y concentraciones se realizó una prueba ANOVA y de comparación múltiple, para el cotejo de eficiencias entre pectina y quitosano se realizó 1 prueba T de student. **[Resultados]:** En la cantidad de 1 g tanto de quitosano como de pectina se registró una remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  de 98.33 % y 98.30 % respectivamente, ambos con un tiempo de 1 h, en los sólidos suspendidos totales hubo una reducción del 98 % con 1 h de mezcla para la pectina y 96 % con 3 h de mezcla usando el quitosano. La eficiencia de remoción entre quitosano y pectina no mostraron una diferencia significativa. En la parte económica existe un ahorro de 846.85 USD, mientras que para el quitosano se tendría un ahorro de 807.61 USD. La concentración de parámetros de sólido sedimentable y aceites y grasas se encontró dentro de los VMA. Sin embargo, para sulfuros, DBO y DQO no se cumplió. **[Conclusiones]:** Con el uso de biopolímeros se logró una considerable disminución del  $\text{Cr}^{+6}$  y de los SST, además de que ambos resultaron ser muy eficientes. También es una tecnología más rentable económicamente, en comparación con la tecnología empleada por la curtiembre estudiada; sin embargo, para poder alcanzar los requerimientos de los VMA se deben utilizar algunas tecnologías adicionales.

**Palabras clave:** Curtiembres; pectina; quitosano; remoción de contaminantes

---

<sup>1</sup> Ingeniera ambiental, egresada de la Universidad Científica del Sur, Perú. [nickoleallyson@gmail.com](mailto:nickoleallyson@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-4502-3823>

<sup>2</sup> Ingeniera ambiental, egresada de la Universidad Científica del Sur, Perú. [natalyvimg@gmail.com](mailto:natalyvimg@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0001-9586-7851>

## Abstract

**[Introduction]:** For years, wastewater from tanneries has been discharged into various water sources without any control or with inefficient technologies, generating an impact on water quality. **[Objective]:** To evaluate the technical-economic feasibility of the use of the biopolymer pectin and chitosan for the treatment of tannery wastewater. **[Methods]:** Extraction of pectin from cocona and chitosan from shrimp was performed. A jar test was performed where the wastewater and biopolymers were combined, the agitation speed was 120 rpm and the contact time was 1, 2 and 3 h. Analyses of pH, chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), total suspended solids (TSS) and Cr<sup>+6</sup> were performed on the samples obtained. For comparison with Maximum Allowable Values (MAV), the samples that showed the highest TSS and Cr<sup>+6</sup> removal were used. For the statistical analysis of the different times and concentrations an ANOVA and multiple comparison test was performed, for the comparison of efficiencies between pectin and chitosan a Student's t-test was performed. **[Results]:** In the amount of 1 g of both chitosan and pectin there was a removal of Cr<sup>+6</sup> of 98.33 % and 98.30 % respectively, both with a time of 1 h, in total suspended solids there was a reduction of 98 % with 1 h of mixing for pectin and 96 % with 3 h of mixing using chitosan. The removal efficiency between chitosan and pectin did not show a significant difference. In the economic part there is a saving of 846.85 USD while for chitosan there would be a saving of 807.61 USD. The concentration of settleable solids and oils and fats parameters were found to be within the VMA. However, for sulfides, BOD and COD were not met. **[Conclusions]:** With the use of biopolymers, a considerable decrease in Cr<sup>+6</sup> and TSS was achieved, in addition to the fact that both proved to be very efficient. It is also a more economically profitable technology compared to the technology used by the tannery studied; however, in order to meet the requirements of the VMA, some additional technologies must be used.

**Keywords:** Chitosan; contaminant removal; pectin; tannery

### 1. Introducción

La industria de curtiembre tiene como objetivo la transformación de la piel de animales en cuero para la fabricación de diversos tipos de prendas de vestir, accesorios, muebles, entre otros. Dependiendo del producto y del origen de la piel, se utilizan diferentes tipos de procesos como son: el desengrase, el purgado, el desengrasado, el piquelado y el curtido propiamente dicho (Córdova *et al.*, 2013). Esta es una industria con alta demanda en todo el mundo, requerida por muchos sectores comerciales, principalmente relacionados con la moda (Silva y Salinas, 2022).

El proceso de producción de las curtiembres es muy similar en los países latinoamericanos, los cuales son realizados por pequeñas y medianas empresas, que cuentan con mínima actualización tecnológica, por lo que los cuidados ambientales son bajos (Martínez y Romero, 2018). Países como Argentina y Ecuador van en alza en la producción de cuero, tanto para consumo interno como para la exportación (Duran y Martínez, 2022). Esta industria también se encuentra muy presente en países como Venezuela, Colombia y Perú (Gómez *et al.*, 2018). En el Perú se identificaron este tipo de fábricas de curtido en los departamentos de Arequipa, Lima y Trujillo, un 90 % de estas localizadas en Trujillo (García, 2021).

Con el desarrollo de la industria de la curtiduría, sus aguas residuales se han convertido en una de las principales fuentes de contaminación industrial, además de ser una de las más

contaminantes (Zhao y Chen, 2019). En los procesos de precurtido y curtido se generan aproximadamente un 90 % de todos los contaminantes, siendo los principales: cromo, sulfuro y materia orgánica (ITP, 2018). En el proceso tradicional, se consume aproximadamente de 60 % a 80 % del cromo aplicado y lo restante se procede a eliminarlo como agua residual (Córdova *et al.*, 2014), en la cual se puede encontrar una concentración cercana a los 198.1 mg de cromo total por litro de agua (Zevallos, 2014).

Estas aguas residuales se caracterizan principalmente por presentar altos valores de DQO y DBO, asimismo de la presencia de nitrógeno, fósforo, sulfuros y cromo<sup>+6</sup> (Martínez y Romero, 2018). Por otro lado, también se han encontrado presencia de hidrocarburos y de pesticidas (Duarte *et al.*, 2009). Otra de las principales características que poseen estas aguas es que su pH es básico y puede llegar hasta 13, esto se debe a la gran cantidad de sulfuros utilizados en los procesos de extracción del pelambre del animal (Salas, 2005).

Aunque en los países existen normativas para el vertimiento de aguas negras, estas suelen descargarse de forma directa en cuerpos de agua naturales, sin previo tratamiento, especialmente en los países en vía de desarrollo, esto genera procesos de eutrofización en las aguas superficiales, lo que provoca la pérdida de biodiversidad y problemas de salud pública (Martínez y Romero, 2018).

Por este motivo debemos darle una gran importancia al tratamiento de aguas residuales de calidad en las empresas de curtiembres; sin embargo, en el Perú actualmente no existe un tratamiento único que sea utilizado para la descontaminación de las aguas residuales que estas generan.

Es por ello, que cada empresa utiliza el sistema que considera más adecuado dependiendo de los equipos que usen en sus procesos y de la cantidad de trabajadores (Castillo y López, 2018). El 93 % de las empresas de curtiembres peruanas son pequeñas, lo cual ocasiona que sus sistemas de tratamiento de aguas residuales y de residuos sólidos sean poco eficientes o hasta inexistentes (Rendulich, 2019). Debido a esta grave situación, en las diversas provincias del país las aguas residuales de estas empresas son vertidas hacia las plantas de tratamiento domésticas o efluentes naturales sin ningún proceso previo (Sotomayor, 2006).

Así mismo, ciertas empresas al ser de carácter informal incumplen con las normativas nacionales sobre la descarga de aguas residuales, por lo que no pueden obtener una licencia ambiental para el vertimiento de sus aguas; en esta misma línea, si estas empresas son descubiertas por el Estado se procedería a su clausura definitiva y, por lo tanto, aumentaría el desempleo (Ortiz y Carmona, 2015).

El Cr<sup>3+</sup> en contacto con el agua se transforma en Cr<sup>6+</sup>, debido a la minoración del ácido sulfhídrico, amoníaco, azufre, nitrito y sulfuro de hierro; lo que ocasiona que este metal pesado se pueda precipitar de forma rápida y sea asimilado por las partículas que se encuentran en suspensión. Por este motivo, diversas especies marinas como las ostras, almejas, peces y mejillones pueden acumular este metal dentro de su organismo, pues resultan afectadas por estar en contacto con el agua contaminada (Chávez, 2010).

Además, otro efecto negativo que trae el cromo en el medio ambiente es la contaminación de suelos, el cual ocasiona que las diversas plantas sembradas en estas zonas absorban estos contaminantes lo que impacta severamente, con enfermedades, a los seres vivos que las consuman. De igual manera, se ha evidenciado que las especies marinas que estén en contacto directo con agua con cromo pueden sufrir daños irreversibles en su piel como llagas o la aparición de tumores (Cerón, 2018).

Por otro lado, también puede traer consecuencias en los seres humanos, al ocasionar enfermedades alérgicas para la piel, respiratorias y cancerígenas (Benítez-Campos, 2011). Así mismo, se ha demostrado que el  $\text{Cr}^{6+}$  en el cuerpo puede originar sangrado o irritaciones de la nariz, enfermedades graves como el cáncer de pulmón, daños del hígado o de los riñones, debilitación del sistema inmunológico o incluso, generar hasta la muerte (Castiblanco y Perilla, 2019).

De la misma manera, otro parámetro que emite altas concentraciones en las curtiembres son los sólidos suspendidos totales (SST) debido a las elevadas cantidades de pelaje, grasa animal, proteínas en suspensión, cabello, estiércol y sangre que generan sus procesos (Ramos y Vargas, 2020). El aumento de las concentraciones de SST en el medio ambiente y, principalmente, en los cuerpos de agua genera un aumento de la turbidez disminuyendo así la entrada de la luz solar, esto trae como consecuencia que la biodiversidad se vea perjudicada, ya que sin la luz solar no puede existir desarrollo de la vegetación acuática (Semarnat, 2016).

A lo largo de los años se han investigado diversas tecnologías fisicoquímicas y biológicas para inmovilizar, eliminar o reducir contaminantes en las aguas residuales (Montenegro *et al.*, 2021), pero utilizar algunos tratamientos convencionales suele presentar efectos adversos, como el uso de reactivos químicos, los cuales pueden formar productos halogenados dañinos para los seres vivos (de Vergara, 2015), otros tipos de tratamientos fisicoquímicos tienen una vida útil corta, además de tener un coste muy alto y un elevado nivel de conocimiento para su análisis y su experimentación (Campos y Marchán, 2021).

Entre los tratamientos convencionales más modernos, se ha comenzado a investigar sobre la eficacia de los biopolímeros, los cuales se definen como biomoléculas de origen natural sintetizadas por microbios, plantas y animales (Sahana y Rekha, 2018). Estos se pueden clasificar según su fuente, los cuales se dividen en 3 subgrupos: polímeros, que son basados en monómeros bioderivados y son biodegradables, procedentes de recursos renovables y, por último, biopolímeros extraídos de microorganismos (Valero *et al.*, 2013).

Estas macromoléculas están siendo aplicadas en diversas áreas de estudios. En los últimos años los biopolímeros han ganado prestigio debido a sus propiedades de biodegradabilidad, biocompatibilidad y renovabilidad, además de que se obtienen a un bajo costo (Pattanashetti *et al.*, 2017). Del mismo modo, se ha demostrado, mediante varias investigaciones realizadas, su efectividad para remover materia orgánica y para el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas (Lim *et al.*, 2018). Entre los biopolímeros más investigados y que poseen una alta eficiencia para tratar aguas residuales tenemos al quitosano, a la *Cactus lefaria* y a la pectina (Fernández y Ruiz, 2020).

Como se menciona anteriormente uno de los biopolímeros más estudiados es el quitosano, el cual es obtenido gracias a la desacetilación de la quitina y que podemos encontrar en el exoesqueleto de los crustáceos y en algunos insectos (Desbrières y Guibal, 2018). Su capacidad de absorber metales es debido a que poseen grupos funcionales amino, los cuales actúan en forma de ligandos frente a los contaminantes (Rodríguez, 2011). Según un estudio se demostró su eficiencia para la remoción del color a un 78 % en aguas residuales de una curtiembre que utiliza altas concentraciones de colorante aniónico en sus procesos (Hala y Ali, 2019).

Otro biopolímero importante es la pectina, el cual se puede obtener de la cáscara de frutos cítricos y de algunos vegetales. Una de sus principales características es su capacidad adsorbente, la cual depende mucho de la cantidad de carboxilos en forma aniónica que contenga la pectina,

este componente genera una interacción con especies de carga positiva como los metales (García *et al.*, 2011; Sánchez *et al.*, 2014). Según un estudio realizado en el 2018, se comprobó que la pectina obtenida de la cáscara de naranja absorbió un 94 % de iones de cromo en aguas residuales de curtiembre (Ramírez *et al.*, 2018).

Por lo antes descrito, es importante investigar tratamientos eficientes y de bajo costo para que así las pequeñas y medianas curtiembres puedan tener acceso a tratar sus aguas residuales, y ser descargadas directamente a la red de alcantarillado. Además, estos biopolímeros son biodegradables e inoocuos, en comparación con otras tecnologías como: lagunas, lodos activados, entre otros (Méndez y Arias, 2014).

## 2. Metodología

### 2.1 Recolección y ubicación de la muestra

El muestreo del agua residual se realizó en una microempresa de curtiembre ubicada en el distrito de ATE, Lima, Perú, entre las coordenadas: 12°03'54.6" S y 76° 58'33.8" O. La muestra estuvo compuesta por 56 L de agua residual, la cual se recolectó del tanque de almacenamiento, donde se vierte el agua proveniente de sus procesos industriales, se llevó a cabo un tipo de muestreo compuesto de forma manual.

### 2.2 Análisis del agua residual obtenida de la empresa de curtiembre

La muestra recolectada fue llevada al laboratorio de química de la Universidad Científica del Sur, donde se midió el pH, por medio de un pHmetro HANNA HI 98130. Por otro lado, las concentraciones de DBO, DQO, SST, turbidez y de Cr<sup>+6</sup> se analizaron en el laboratorio acreditado R-LAB S.A.C.

Para la prueba de DBO se llenó completamente un envase de plástico de 1 000 ml con la muestra de agua residual, sin presencia de burbujas; posteriormente, se almacenó y se mandó a evaluar mediante la metodología de *5-days BOD test*. En el caso del DQO se vertió 100 ml de muestra en un envase de plástico, donde se añadió H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta llegar a un pH menor a 2, esto para su conservación y almacenamiento, para su análisis se utilizó la metodología *closed reflux, colorimetric method*. Con respecto del SST se utilizó un frasco de plástico de 250 ml lleno con la muestra, la metodología para este parámetro fue el de *total suspended solids dried at 103-105 °C*. Para la turbidez se realizó en un envase de plástico ámbar de 100 mL y se aplicó el método *nephelometric*. Por último, para el Cr<sup>+6</sup> se llenó un frasco de plástico y se le agregó NaOH y sulfato de amonio hasta llegar a un pH 9.3, se aplicó la metodología de *chromium colorimetric method*.

### 2.3 Extracción pectina

La metodología utilizada se adaptó a la descrita por Molina (2016), se adquirió 12 kg de cocona (*Solanum sessiliflorum*) de una chacra en Iquitos - Perú, estas se sumergieron en agua a 85 °C por 15 min, posteriormente se traspasó a un recipiente con agua a una temperatura ambiente, en donde se separó la cáscara de sus semillas y pulpa, la cáscara se secó a 50 °C por 24 h, luego se molió y tamizo con un tamiz No. 40 (425 µm).

Para el proceso de extracción se utilizó una solución compuesta por agua potable mezclada con HCl 1 M, obteniendo un pH de 2.5, el cual se verificó con un pHmetro HANNA HI 98130, la solución se mezcló con las cáscaras secas y molidas, esto se calentó mediante un sistema abierto, a una temperatura de 95.5 °C por 60 min, este contiene agitadores magnéticos y una plancha de calentamiento.

Se filtró con una tela 100 % poliéster, con un tamaño de poro de aproximadamente 7 µm, al producto filtrado se vertió alcohol etílico al 96 % y se dejó reposar por 2 horas a una temperatura ambiente. Permitiendo así, que la pectina salga a flote, la cual se filtró nuevamente con una tela de 100 % poliéster. A la pectina obtenida se realizaron 3 lavados con etanol para ser purificada, en el primer lavado se utilizó etanol al 85 %, en los 2 restantes se aplicó etanol al 96 %. Por último, se dejó secar la pectina a lo largo de 6 horas, a una temperatura de 50 °C, se molió y se almacenó a temperatura ambiente.

## **2.4 Extracción del quitosano**

La metodología utilizada se adaptó a la descrita por [Del Valle \(2017\)](#), el biopolímero quitosano se obtuvo a partir de 10 kg de camarón de los cuales solo se extrajo el exoesqueleto.

Se procedió a lavar esta cáscara, después, se dejó escurriendo y secando en papel aluminio alrededor de 2 semanas, a temperatura ambiente. A lo largo de ese tiempo, se agitó continuamente para lograr que seicara de manera homogénea y se consiguió la descomposición de la materia orgánica.

Pasado el tiempo establecido, se molieron las cáscaras y se obtuvo así un producto menor a 0.5 cm. A continuación, se realizó la desproteínización, en donde se vertió, en carbonato de sodio al 4 %, el producto obtenido, a 40 °C y por 3 horas, para conseguir así el material proteico.

Posteriormente, se procedió a disgregar la cáscara al realizar el filtrado y lavado del producto. En seguida, se sometió a la desmineralización, vertiendo en ácido clorhídrico de 5 % el producto, a temperatura ambiente y, aproximadamente de 12 a 24 horas. Se procedió a lavar y filtrar el producto. Para el blanqueamiento necesario, el producto se colocó de nuevo en carbonato de sodio a temperatura ambiente durante 4 días. Después, lo obtenido se filtró y calentó a 30 °C, con la intención de agilizar el desarrollo del procedimiento. Al finalizar, se obtuvo el producto en forma de polvo blanquecino.

## **2.5 Tratamiento de coagulación-floculación mediante prueba de jarras**

La prueba de jarras es uno de los procesos de coagulación y floculación más importantes, donde se utilizan diversas concentraciones de coagulantes o floculantes, esto con el objetivo de reducir la materia orgánica y coloides en suspensión ([Fúquene y Yate, 2018](#)). Este ensayo se realizó en el laboratorio de química de la Universidad Científica del Sur.

Se utilizaron 4 concentraciones de cada biopolímero, las cuales fueron: 0.4, 0.6, 0.8 y 1 g, a continuación, cada una mezclada en 250 ml de agua destilada. La metodología utilizada para la prueba de jarras fue adaptada a la descrita por [Hala & Ali \(2019\)](#), en 4 vasos precipitados de 1 000 ml se vertieron 500 ml de agua residual y se añadió la mezcla mencionada anteriormente. La velocidad de mezcla establecida fue de 120 rpm y se evaluó en 3 tiempos diferentes: 1, 2 y 3 horas.

## **2.6 Análisis del agua residual postratamiento**

En las muestras postratamiento se dejó sedimentar por 1 hora y se procedió a realizar los mismos análisis de los parámetros descritos previamente en el pretratamiento. Para las muestras que presentaron un mayor porcentaje de remoción de contaminantes se procedió a analizar 3 parámetros adicionales, los cuales fueron aceites y grasas, sulfuros y una corrida de metales. Para los aceites y grasas se vertió la muestra en un frasco de vidrio de 1 000 ml y se le agregó H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta llegar a un pH menor a 2, seguidamente para su análisis se utilizó la metodología titulada: *n-Hexane Extractable Material (HEM; Oil and Grease) and Silica Gel Treated n-Hexane Extractable Material (SGT-HEM; Non-polar Material) by Extraction and Gravimetry*. Por otro lado, para sulfuros se agregó la muestra en un envase de 100 ml de plástico y se le añadió acetato de zinc y NaOH para llegar a un pH mayor a 9; posteriormente, se utilizó la metodología de *Sulfide Methylene Blue*. Por último, para la corrida de metales se vertió en un frasco de plástico de 1000 ml HNO<sub>2</sub> con la muestra, hasta llegar a un pH menor a 2, se utilizó la metodología titulada: *Espect ICP-MS*.

## **2.7 Análisis de datos**

Se utilizó el *software* estadístico SPSS para realizar el procesamiento de datos y el posterior análisis. En primer lugar, se realizó una prueba ANOVA donde se observó si los resultados eran significativamente diferentes respecto a las distintas concentraciones y los diferentes tiempos empleados. Posteriormente se realizó una comparación múltiple mediante una prueba *post hoc*, y para el análisis de comparación entre pectina y quitosano se realizó la prueba paramétrica T de Student.

## **2.8 Análisis de costos**

Para el análisis de costos se procedió a hacer una simulación a escala industrial del tratamiento planteado en esta investigación, y se procedió a comparar con la tecnología actual que posee la empresa donde se realizó el muestreo. Tomando en cuenta los costos de inversión que se necesitan para implementar ambas tecnologías.

## **2.9 Comparación con la normativa vigente**

Los análisis de sólidos suspendidos totales, aceites y grasas, sulfuros y sólidos sedimentables, junto con los análisis realizados al agua postratamiento, se compararon con los parámetros establecidos mediante el DS-010-2019-VIVIENDA refrendado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, el cual aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado.

# **3. Resultados y discusión**

## **3.1 Análisis del agua residual**

Para la obtención de los resultados se tomó en consideración un punto de muestreo. Se realizaron monitoreos de parámetros fisicoquímicos como: pH, turbidez, DBO, DQO, Cr<sup>+6</sup> y SST detallados en el **Cuadro 1**. Los resultados conseguidos son mayores comparados a los obtenidos por [Zeballos \(2014\)](#) en una empresa de curtiembres de Arequipa, en especial donde el SST fue de 1766 mg/l mientras que los resultados de nuestra muestra sin tratamiento (M-Blanco) obtuvo 5000 mg/l. Esto podría deberse a que el agua obtenida se almacenaba en un tanque para posteriormente realizarse el tratamiento pertinente. Los valores de pH, DBO y DQO fueron muy similares a los obtenidos por [Rosas \(2019\)](#), en el caso del Cr<sup>+6</sup> [Castillos y López \(2018\)](#) obtuvieron valores de 0.024 mg/l, mientras que [Morochó \(2017\)](#) mostró un resultado de 0.753 mg/l, esta variación puede ser a las distintas concentraciones de cromo que utilizan las curtiembres.

**Cuadro 1.** Resultados de los análisis fisicoquímicos de las aguas residuales provenientes de curtiembre.

**Table 1.** Results of the physicochemical analysis of the wastewater from the tannery.

Parámetros	Concentración	Unidad
pH	13	
Turbidez	1 000	NTU
DBO	3 282	mg/l
DQO	7 860	mg/l
Cr <sup>+6</sup>	0.6	mg/l
SST	5 000	mg/l

### 3.2 Resultados de porcentaje de remoción de Cr<sup>+6</sup> y SST con pectina

En el **Cuadro 2** se muestran las concentraciones iniciales y finales de Cr<sup>+6</sup> y SST usando 4 diferentes concentraciones de pectina y 3 diferentes tiempos de mezclado, además del porcentaje de remoción por cada muestra. Solo se analizaron y compararon el porcentaje de remoción de estos contaminantes, debido a que son los más perjudiciales para la calidad del agua.

En el presente trabajo la muestra control presentó concentraciones iniciales de 0.6 mg/l de Cr<sup>+6</sup>, la muestra M-1P obtuvo un valor de 0.13 mg/l de Cr<sup>+6</sup> residual, el cual fue disminuyendo hasta llegar a la muestra M-7P, donde mantuvo un valor de 0.01 mg/l, obteniendo así el 98.3 % de remoción de Cr<sup>+6</sup>. En el caso de los SST la concentración inicial fue de 5000 mg/l, y su concentración máxima de remoción se vio reflejada en M-10P con una remoción del 98 %, mientras que la mínima fue de 86.12 %.

Para la prueba ANOVA se realizó con una significancia de 0.05, los resultados para la remoción del cromo, según el tiempo, el p-valor fue de 0.742, mientras que según la concentración de pectina su p-valor resultó 0.001. En el caso de la remoción de SST el factor tiempo tuvo una diferencia significativa entre los tiempos de mezcla ya que su p-valor fue menor al valor de significancia, mientras que para la concentración de pectina el p-valor fue de 0.457. En cuanto a la comparación múltiple la concentración de 0.4 g muestra una diferencia de

remoción muy marcada comparada con las concentraciones de 0.6, 0.8 y 1 g.

**Cuadro 2.** Valores de las concentraciones iniciales y finales de Cr<sup>+6</sup> y SST postratamiento empleando pectina y porcentaje de remoción del Cr<sup>+6</sup> y SST.

**Table 2.** Values of the initial and final concentrations of Cr+6 and TSS post treatment using pectin and percentage of removal of Cr+6 and TSS.

Identificación de la muestra	h	g	Cr <sup>+6</sup>			SST		
			Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Remoción de Cr <sup>+6</sup> (%)	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)	Remoción de SST (%)
M-1P	1	0.4	0.6	0.13	78.3	5000	265	94.7
M-2P	2	0.4	0.6	0.08	86.7	5000	450	91
M-3P	3	0.4	0.6	0.08	86.7	5000	694	86.1
M-4P	1	0.6	0.6	0.07	88.3	5000	192	96.2
M-5P	2	0.6	0.6	0.05	91.7	5000	425	91.5
M-6P	3	0.6	0.6	0.03	95	5000	425	91.5
M-7P	1	0.8	0.6	0.01	98.3	5000	148	97
M-8P	2	0.8	0.6	0.01	98.3	5000	373	92.5
M-9P	3	0.8	0.6	0.01	98.3	5000	428	91.4
M-10P	1	1	0.6	0.01	98.3	5000	99	98
M-11P	2	1	0.6	0.01	98.3	5000	440	91
M-12P	3	1	0.6	0.01	98.3	5000	164	96.7

Los resultados muestran que a mayores concentraciones de pectina mayor será su remoción de contaminantes, tal y como lo demuestran [Paredes y Valles \(2020\)](#), que lograron una remoción del 96 %, con su más alta cantidad de adsorbente, la cual fue de 60 g de pectina proveniente de cáscara de naranja, [Tejada et al., \(2015\)](#) también menciona que la cantidad de adsorbente es un factor clave para disminuir la concentración de contaminantes. Sin embargo, en cuanto al tiempo de mezclado mostró que a mayor tiempo la remoción fue disminuyendo, [Cardona et al., \(2013\)](#) mencionan que los biopolímeros se saturan dependiendo del tamaño de su partícula, por lo que con el paso del tiempo estas pueden liberar los contaminantes adsorbidos reduciendo la remoción de estos, esto se puede observar perfectamente en la remoción de SST con respecto al tiempo.

### 3.3 Resultados de porcentaje de remoción de Cr<sup>+6</sup> y SST con quitosano

En el **Cuadro 3** podemos observar que se obtuvo una concentración inicial de Cr<sup>+6</sup> de 0.6 mg/l y SST de 5000 mg/l. Posteriormente del tratamiento con el quitosano la muestra que removió menos Cr<sup>+6</sup> fue M-2Q, con una concentración de 0.09 mg/l y se tuvo una mayor remoción en la muestra M-7Q, las cuales alcanzaron un 98.33 %.

Por otro lado, la muestra que removió una mayor concentración de SST fue la M-12Q, con un porcentaje de 96 %. Podemos observar que sigue la misma tendencia que se describe en la remoción con el biopolímero pectina, en el cual se menciona que a una mayor concentración es mayor el porcentaje de remoción.

La prueba ANOVA, con una significancia de 0.05, determinó que la remoción de Cr<sup>+6</sup> tenía un p-valor de 0.832 que indica que la remoción de Cr<sup>+6</sup> no varía con relación al tiempo. Lo mismo se realizó para analizar remoción de Cr<sup>+6</sup> respecto a la concentración, el p-valor resultó menor al valor de significancia y se determinó que sí varía con relación a la concentración. Para el SST el factor tiempo dio como resultado un p-valor de 0.462 y para la concentración resultó un p-valor de 0.837, lo cual nos indican ambos no varían con respecto al tiempo y a la concentración del quitosano, respectivamente. Por último, en la comparación múltiple se observa que las concentraciones de 0.6 y 0.8 g muestran una mayor diferencia significativa en relación con las concentraciones de 0.4 y 1 g.

**Cuadro 3.** Valores de las concentraciones iniciales y finales del Cr<sup>+6</sup> y SST postratamiento empleando quitosano y porcentaje de remoción del Cr<sup>+6</sup> y SST

**Table 3.** Values of the initial and final concentrations of Cr+6 and TSS post treatment using chitosan and percentage of removal of Cr+6 and TSS

Identificación de la muestra	h	g	Cr <sup>+6</sup>			SST		
			Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción de Cr <sup>+6</sup> (%)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción de SST (%)
M-1Q	1	0.4	0.6	0.08	86.7	5 000	296	94.1
M-2Q	2	0.4	0.6	0.09	85	5 000	299	94
M-3Q	3	0.4	0.6	0.05	91.7	5 000	321	93.6
M-4Q	1	0.6	0.6	0.05	91.7	5 000	310	93.8
M-5Q	2	0.6	0.6	0.08	86.7	5 000	408	91.8
M-6Q	3	0.6	0.6	0.06	90	5 000	359	92.8
M-7Q	1	0.8	0.6	0.01	98.3	5 000	326	93.5
M-8Q	2	0.8	0.6	0.01	98.3	5 000	448	91
M-9Q	3	0.8	0.6	0.01	98.3	5 000	220	95.6
M-10Q	1	1	0.6	0.01	98.3	5 000	464	90.7
M-11Q	2	1	0.6	0.01	98.3	5 000	210	95.8
M-12Q	3	1	0.6	0.01	98.3	5 000	200	96

Para [Najarro \(2021\)](#) el Cr<sup>+6</sup> redujo un porcentaje de 61.2 % en aguas residuales de una curtiembre el cual es un porcentaje menor al obtenido, esto puede deberse a que solo se utilizó 0.4 gramos de biopolímero obtenido de los desechos de cangrejo. Por otro lado, [Rodríguez et al.](#),

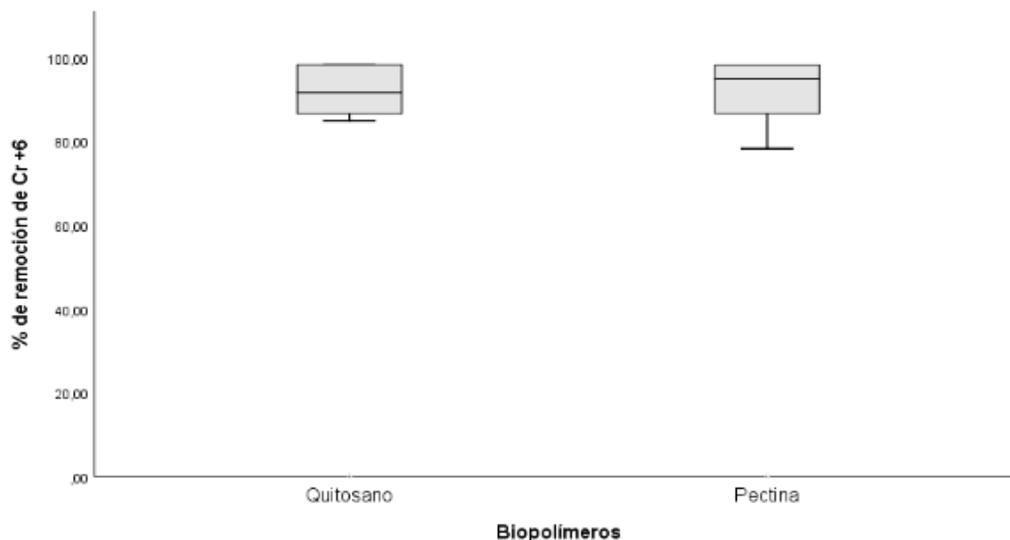
(2022) en su investigación determinaron una remoción de SST de 99.3 % con una dosis de quitosano sintético de 0.4 g, así mismo, se definió que, a mayor concentración mayor fue el porcentaje de remoción.

### 3.4 Comparación la eficiencia de los biopolímeros en la remoción del Cr<sup>+6</sup> y SST

Se realizó la prueba paramétrica T para la comparación de los biopolímeros utilizados, en relación con los porcentajes de remoción de Cr<sup>+6</sup> y SST, para determinar cuál de estos bioadsorbentes tiene una mejor eficiencia.

La **Figura 1** muestra la distribución de datos obtenidos del porcentaje de remoción de Cr<sup>+6</sup> con el uso de la pectina y quitosano. Los datos de la pectina a pesar de estar un poco más dispersos en comparación con el quitosano, la mayoría de los valores obtenidos se encuentran en el mismo rango. Según la prueba estadística realizada este obtuvo un valor de 0.975 con una significancia de 0.05, por lo que no existe una diferencia significativa entre los datos.

El rango de remoción de Cr<sup>+6</sup> para el quitosano fue del 85 % al 98.3 % mientras que para la pectina fue de 78.3 % al 98.3 %, [Paredes y Valles \(2020\)](#) también midieron el efecto del tiempo y la cantidad de pectina proveniente de la cáscara de limón sobre el porcentaje de remoción del Cr<sup>+6</sup>, obteniendo un rango de valores muy parecido, su rango de valores estuvo entre 85 % y el 94 %; sin embargo, la cantidad de pectina utilizada fue mayor, al igual que el tiempo de mezcla. Respecto al quitosano los datos obtenidos son muy similares a los conseguidos por [Hossain et al., \(2017\)](#) pues logró remover entre 99.93 % y 99.97 % de cromo, la razón por la que pudo suceder esto se basa en el tipo de biopolímero usado, ya que utilizó quitosano sintetizado, a partir de caparazón de cangrejo, además las concentraciones usadas fueron más altas.



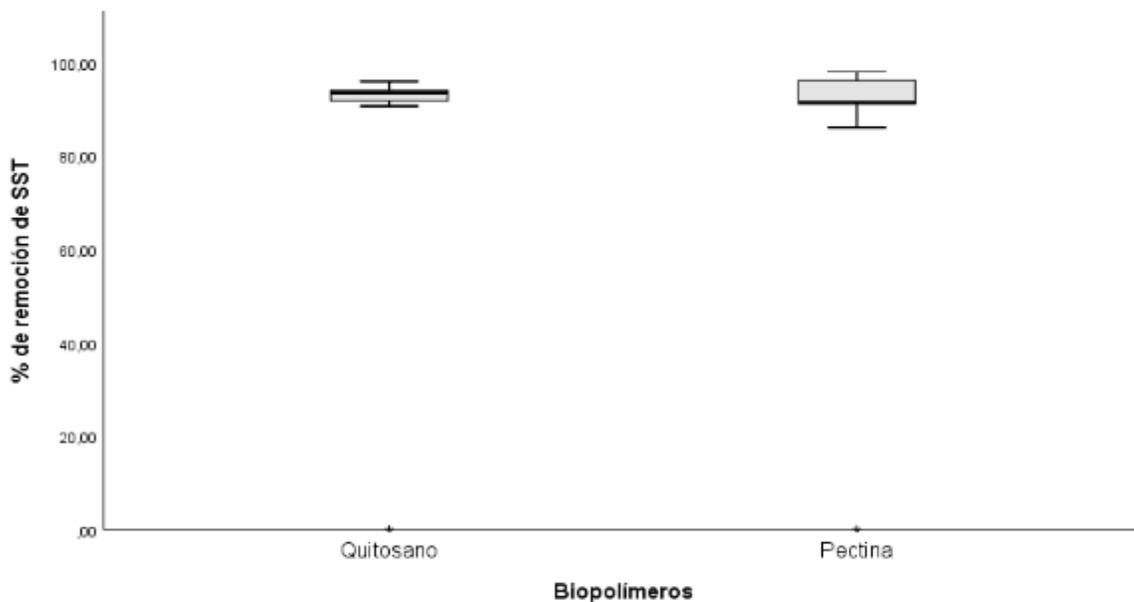
**Figura 1.** Distribución de datos de remoción de Cr<sup>+6</sup> con pectina y quitosano.

**Figure 1.** Distribution of Cr<sup>+6</sup> removal data with pectin and chitosan.

En la **Figura 2** podemos contemplar la distribución de datos de los porcentajes de remoción de SST con tratamientos de tipo quitosano y pectina. En este podemos observar que los datos están

muy concentrados alrededor de su mediana, con respecto al quitosano se determinó que sus valores se encuentran muy poco dispersos en comparación a los valores de la pectina. En cuanto a la prueba estadística igualmente se utilizó un valor de significancia de 0.05 y se obtuvo p-valor de 0.97, lo cual establece que remoción de SST no difiere con el tiempo empleado en ambos tratamientos.

Referente al rango de remoción del SST del quitosano fue de 90.7 % hasta un 96 %, y los valores de la pectina resultaron desde un 86.12 % hasta un 98.02 %. [Laura \(2018\)](#) determinó un porcentaje de remoción del parámetro SST de 75 % en los 3 tipos de pectina que elaboró con cáscara de naranja, mandarina y de limón respectivamente, este resultado es menor al obtenido en la presente investigación, esto puede deberse a que se realizó en solo un tiempo de 15 minutos y se ha demostrado que la remoción de dicho parámetro sí varía con respecto al tiempo. Por otro lado, con respecto al quitosano [Vejarano y Principe \(2021\)](#) lograron un porcentaje de remoción de entre 39.3 % hasta 87.8 % con este biopolímero extraído de cáscaras de langostinos, con tiempos de floculación de 10, 15 y 20 minutos, los cuales son resultados similares a los presentados en esta investigación.



**Figura 2.** Gráfico de cajas sobre la distribución de datos de remoción de SST con pectina y quitosano.

**Figure 2.** Boxplot on the distribution of SST removal data with pectin and chitosan.

### 3.5 Resultados de los costos de tratamiento con biopolímeros con respecto a la tecnología actual de la empresa y el uso de biopolímeros

Los costos se tomaron en cuenta para un volumen de aproximadamente 12 500 L de agua residual. En el **Cuadro 4**, se utiliza el área de rejillas para retener sólidos de gran tamaño, el peróxido de hidrógeno y cal se utilizan para la floculación y sedimentación de contaminantes, el uso del clorinador sirve para la desinfección, además se agrega aproximadamente 12.5 m<sup>3</sup> de agua

potable para poder disminuir la turbidez presente. Con todo lo antes mencionado se observa que el costo total que genera el uso de este tipo de tratamiento es de 24 777.13 USD.

**Cuadro 4.** Costos empresariales de la tecnología actual de la curtiembre.

**Table 4.** Business costs with current tannery technology.

Descripción	Unidad		Costo unitario	Costo total
Área de rejillas	unidad	1	\$ 523.29	\$ 523.29
Peróxido de hidrógeno (50 %)	gal	8	\$ 130.82	\$ 1046.56
Cal	kg	8	\$ 4.19	\$ 33.52
Clorinador	unidad	3	\$ 79.54	\$ 238.62
Pastillas de cloro	kg	6	\$ 13.06	\$ 78.36
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	12.5	\$ 3.32	\$ 41.5
Tanques (De 25 Kl)	unidad	3	\$ 6384.09	\$ 19 152.28
Mantenimiento	anual	1	\$ 2093.14	\$ 2093.14
Equipo de medición	unidad	2	\$ 784.93	\$ 1569.86
			<b>Total</b>	<b>\$ 24 777.13</b>

*Nota: Se hizo una conversión de soles a dólares americanos, con un tipo de cambio de 0.26 dólares USD del día 6 del mes diciembre del 2022.*

Por otro lado, los tratamientos planteados en esta investigación reemplazaron el uso del peróxido de hidrógeno al 50 % y cal, por el uso de biopolímeros, ya que cumplen con la misma función de floculador, tampoco se tiene en cuenta el uso de agua potable, ya que los biopolímeros tienen la capacidad de reducir la concentración de turbidez, esto se muestra tanto en el **Cuadro 5** como en el **Cuadro 6**, igualmente podemos apreciar los costos que implicaría utilizar este tipo de tratamiento, siendo el costo total de 23 930.28 USD para el tratamiento con pectina y de 23 969.52 USD con el uso del quitosano.

**Cuadro 5.** Costos empresariales de la tecnología actual usando pectina.

**Table 5.** Business costs of current technology using pectin.

Descripción	Unidad		Costo unitario	Costo total
Área de rejillas	unidad		\$ 523.29	\$ 523.29
Pectina	kg/día	3	\$ 91.58	\$ 274.74
Clorinador	unidad	3	\$ 79.54	\$ 238.62
Pastillas de cloro	kg	6	\$ 13.06	\$ 78.36
Tanques	unidad	3	\$ 6 384.09	\$ 19 152.27
Mantenimiento	anual	1	\$ 2 093.14	\$ 2093.14
Equipo de medición	unidad	2	\$ 784.93	\$ 1569.86
			<b>Total</b>	<b>\$ 23 930.28</b>

*Nota: Se hizo una conversión de soles a dólares americanos, con un tipo de cambio de 0.26 dólares USD*

del día 6 del mes diciembre del 2022.

**Cuadro 6.** Costos empresariales de la tecnología actual usando quitosano.  
**Table 6.** Business costs of current technology using chitosan.

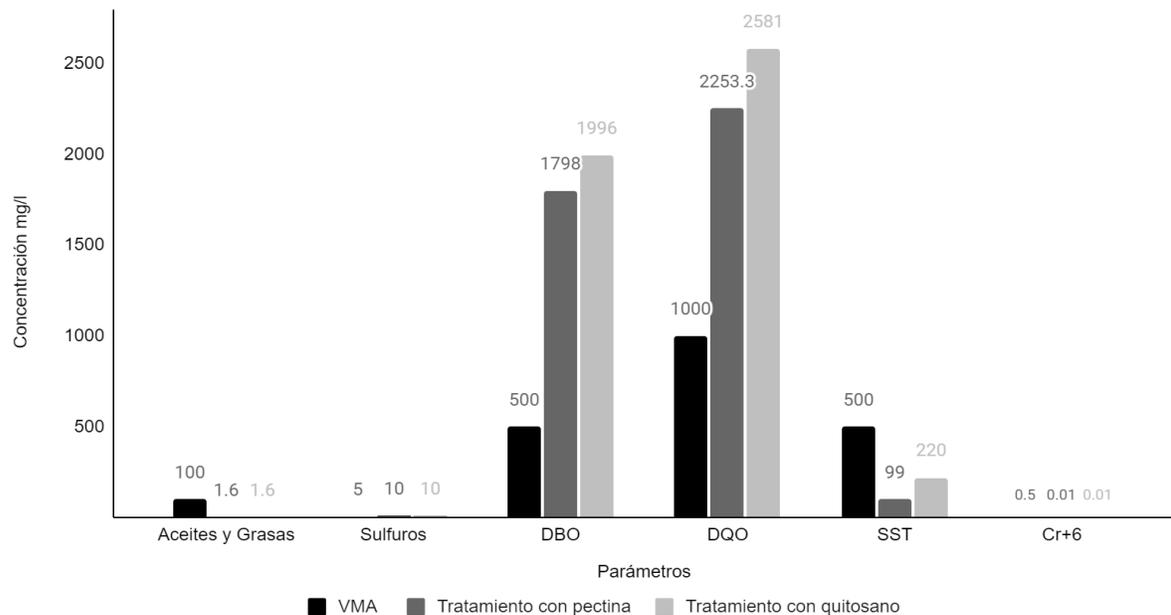
Descripción	Unidad		Costo unitario	Costo total
Área de rejillas	unidad	1	\$ 523.29	\$ 523.29
Quitosano	kg/día	3	\$ 104.66	\$ 313.98
Clorinador	unidad	3	\$ 79.54	\$ 238.62
Pastillas de cloro	kg	6	\$ 13.06	\$ 78.36
Tanques	unidad	3	\$ 6384.09	\$ 19 152.27
Mantenimiento	anual	1	\$ 2093.14	\$ 2093.14
Equipo de medición	unidad	2	\$ 784.93	\$ 1569.86
<b>Total</b>			<b>\$ 23 969.52</b>	

*Nota: Se hizo una conversión de soles a dólares americanos, con un tipo de cambio de 0.26 dólares USD del día 6 del mes diciembre del 2022.*

Los tratamientos convencionales para tratar efluentes industriales, los cuales usan principalmente procesos físicos y de neutralización elemental, no suelen remover altas concentraciones de contaminantes. Por otra parte, existen tratamientos como la oxidación con ozono o hipoclorito; sin embargo, su implementación es muy costosa y de difícil manejo (Ramírez *et al.*, 2013), además Tejada *et al.*, (2015) mencionan que para la remoción de metales pesados se realizan mediante intercambio iónico sobre resinas, reducción, sedimentación, precipitación química, entre otros, las cuales también resultan ser tecnologías con un costo alto y muy poco eficientes. Por lo que la bioadsorción podría ser una solución económica para los tratamientos de aguas residuales, siendo también un tratamiento viable y eficiente.

### **3.6 Resultados de las aguas tratadas con biopolímeros con respecto a los valores máximos admisibles (VMA) para su descarga al alcantarillado**

Con respecto a los valores máximos admisibles se realizaron 3 análisis adicionales los cuales fueron corrida de metales, concentración de sulfuros, y aceites y grasas, estos se midieron en las muestras que presentaron una mayor remoción de SST y Cr<sup>+6</sup>, para el tratamiento con pectina se utilizó la M-10P y para el quitosano fue la M-12Q. Los datos obtenidos para la presente comparación se realizaron solamente con el uso de biopolímeros, sin ningún tratamiento previo. Como se puede apreciar en la **Figura 3**, con el tratamiento de pectina y de quitosano se disminuyeron los parámetros de aceites y grasas, SST y Cr<sup>+6</sup> con respecto al VMA. El tratamiento con pectina redujo el parámetro de DBO a 1484 mg/l y el DQO a 5606 mg/l, por otro lado, el quitosano disminuyó el DBO a 1286 mg/l y el DQO a 5279 mg/l. A pesar de esta considerable reducción, los parámetros de sulfuros, DBO y DQO no lograron cumplir con los valores establecidos por el VMA.



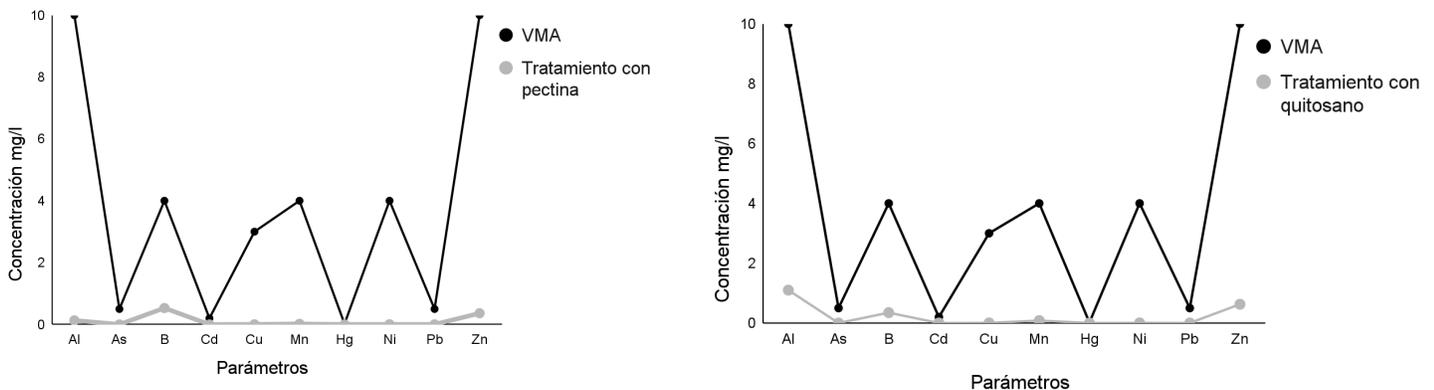
**Figura 3.** Comparación entre la normativa VMA y los tratamientos pectina y quitosano  
**Figure 3.** Comparison between MAV standards and pectin and chitosan treatments

En Colombia las curtiembres son una industria importante en su economía, el cual tiene varias de estas empresas en el nivel nacional (Martínez y Romero, 2018). La normativa colombiana, establecida por el ministerio del ambiente, el valor límite máximo en aceites y grasas es de 15 mg/l el cual es 85 mg/l menos que la normativa del Perú, al igual que el DBO y DQO, siendo menor al VMA por 800 mg/l, para el SST en la normativa de Colombia su valor límite máximo es 100 mg/l. Con esta comparación entre ambas normativas podemos determinar que los VMA de Perú son más permisibles que la normativa de Colombia. No obstante, el Cr<sup>+6</sup> no se encuentra contemplado en la normativa de dicho país, a pesar de ser un parámetro muy peligroso para la salud y el medio ambiente si se encontrara en altas concentraciones.

Por otro lado, con respecto a las concentraciones de metales pesados podemos observar en el Cuadro 7 que todos estos parámetros postratamiento con la pectina y el quitosano resultaron ser valores menores que los establecidos en los VMA. Entre los valores más destacados que podemos encontrar postratamiento está el aluminio, que tuvo una concentración de 0.132 mg/l con la pectina y 1.1 mg/l con el quitosano, el cadmio en el que se obtuvo un valor de 0.00001 mg/l para la pectina y de 0.00248 mg/l con el quitosano. Así mismo, en la Figura 4 se puede visualizar que con ambos tratamientos las concentraciones de metales pesados son menores a las establecidas por los VMA, sin embargo, el tratamiento con pectina demostró mayor remoción en algunos parámetros como el aluminio, cadmio y zinc.

**Cuadro 7.** Comparación de la concentración de metales postratamiento y la normativa VMA.  
**Table 7.** Comparison of the concentration of post-treatment metals and the MAV regulations.

Metal	Concentración según VMA (mg/l)	Concentración con tratamiento con pectina (mg/l)	Concentración con tratamiento con quitosano (mg/l)
Al	10	0.132	1.1
As	0.5	0.00077	0.00094
B	4	0.531	0.348
Cd	0.2	0.00001	0.00248
Cu	3	0.0049	0.0049
Mn	4	0.02	0.08344
Hg	0.02	0.002	0.000745
Ni	4	0.006	0.0061
Pb	0.5	0.003	0.00286
Zn	10	0.362	0.629



**Figura 4.** Comparación de la concentración de metales postratamiento y la normativa VMA.

**Figure 4.** Comparison of the concentration of post-treatment metals and the MAV regulations.

Para la concentración de metales pesados, haciendo una comparativa de la normativa con la normativa de Colombia, podemos determinar que para los parámetros de Al, B y Mn no se tiene un valor máximo establecido, esto es, debido a que la normativa dispone que dichos parámetros tienen que pasar por un análisis realizado por los responsables de esta actividad en laboratorios acreditados y ese informe es enviado a la autoridad competente anualmente. Por otro lado, el valor del Zn no se encuentra establecido en la normativa. Los demás parámetros como el As poseen un valor máximo de 0.1mg/l el cual es 0.4 mg/l menor al VMA, el Cd es 0.01 mg/l, el Cu es de 1 mg/l, el Hg es de 0.002 mg/l, Ni es un 0.10 mg/l el cual es 3.9 mg/l más bajo que el VMA, por

último, el Pb tiene un valor máximo de 0.1 mg/l. Al finalizar podemos determinar que los VMA de Perú para metales pesados son nuevamente más permisibles que la normativa de Colombia.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el análisis de aguas residuales corroboran lo mencionado en la literatura. Las concentraciones de DBO, DQO,  $\text{Cr}^{+6}$ , pH, SST y turbidez presentes en el agua resultaron ser muy altas, por lo que el vertimiento directo de estos efluentes hacia un cuerpo de agua ocasionaría una pérdida en la calidad de agua, provocando así un daño en la biodiversidad acuática; además, el contacto directo con estas aguas contaminadas podría afectar la salud pública.

El biopolímero pectina registró una mayor remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  a partir de utilizar una concentración de 0.8 g y de sólidos suspendidos totales (SST) a una concentración de 1 g a 1 hora. En el caso de la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  los valores no son muy diferentes según el tiempo, pero dependiendo de la concentración utilizada la remoción de este contaminante varía. Es decir, que a mayor concentración de pectina la remoción de  $\text{Cr}^{+6}$  será mayor. Por otro lado, los valores obtenidos en el SST demuestran que el tiempo es un factor clave para la remoción de este contaminante en comparación con la concentración, ya que se observa que, a mayor tiempo de mezcla, menor es el porcentaje de remoción, mientras que en la cantidad de bioadsorbentes los valores obtenidos no difieren significativamente.

Con respecto al quitosano, también se registró una mayor remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  a partir de una concentración de 0.8 g y de sólidos suspendidos totales (SST) con una concentración de 1 g a 3 horas. En relación del  $\text{Cr}^{+6}$  se determinó que su remoción sí varía con respecto concentración del biopolímero, convirtiéndolo en un importante factor en la investigación; sin embargo, en relación con el tiempo se analizó que no varía la remoción del contaminante. Por otro lado, con respecto al SST se demostró que en cuanto al tiempo y la concentración del biopolímero ninguno de los dos varía con respecto al porcentaje de remoción de dicho parámetro.

La comparación entre la eficiencia de remoción del  $\text{Cr}^{+6}$  usando pectina, contra el uso del quitosano mostró que, el rango de distribución de datos era muy similar entre los biopolímeros, por lo que se puede decir que, tanto el quitosano como la pectina fueron igualmente eficientes en cuanto a la adsorción del  $\text{Cr}^{+6}$  ya que ambos alcanzaron una remoción de 98.3 %, mientras que los valores mínimos alcanzados fueron mayores al 75 %. De igual manera, en la comparación de la eficiencia en la remoción de SST mostró que los valores del quitosano se encuentran muy poco dispersos en comparación a los de la pectina. El porcentaje máximo de remoción de la pectina fue de 98 % y el quitosano obtuvo 96 %, con lo cual podemos afirmar que el tratamiento con pectina resultó más eficiente con respecto a la remoción de SST.

La viabilidad económica usando este tipo de tratamiento resulta ser mejor, comparada con el tratamiento actual de la empresa, ya que usando la pectina se ahorraría aproximadamente 846.85 USD mientras que para el quitosano se tendría un ahorro de 807.61 USD, aunque estos valores no sean muy significativos para empresas a gran escala recordemos que en Latinoamérica la mayoría de empresas de curtiembres son de informales y de pequeña escala, para las cuales este ahorro podría ser significativo. Además, estas aguas tratadas se podrían reutilizar reduciendo el consumo de agua y, por lo tanto, los costos por el consumo de estas.

Y, por último, el tratamiento con ambos biopolímeros resultó ser eficiente en los parámetros de aceites y grasas, SST y  $\text{Cr}^{+6}$  para la descarga hacia el alcantarillado, según los Valores Máximos Admisibles (VMA) de Perú. Para las concentraciones de metales se puede determinar que con los dos tipos de biopolímeros resultaron ser valores menores a los establecidos en los VMA. No

obstante, a pesar de que hubo una disminución considerable en los parámetros de sulfuros, DBO y DQO, no se alcanzaron los valores permitidos por la VMA. Se recomienda aplicar un tratamiento adicional para la descarga del agua residual, esto es debido a que esta investigación se realizó solamente con el uso de biopolímeros, sin ningún tratamiento previo.

## 5. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

## 6. Agradecimientos

Agradecemos a la revista y a las personas revisoras anónimas por las oportunas observaciones que ayudaron a enriquecer la versión final del artículo.

## 7. Referencias

- Benítez-Campos, N. (2011). Producción limpia y biorremediación para disminución de la contaminación por cromo en la industria de curtiembre. *Ambiente y Sostenibilidad* (1), 25-31 <https://doi.org/10.25100/ays.v1i1.4335>
- Campos, M. y Marchán, J. (2021). *Avances, Ventajas y Desventajas de los Nanomateriales en el Tratamiento de Aguas Residuales: Una Revisión Sistemática*. (Tesis de Ingeniería Forestal, Universidad César Vallejo, Perú). [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/87647/Campos\\_RMJ-March%  
c3%a1n\\_VJF-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/87647/Campos_RMJ-March%c3%a1n_VJF-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Cardona, A., Cabañas, D. y Zepeda, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II), *Ingeniería*, 1(17), 1-9. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46729718001.pdf>
- Castiblanco, Y., y Perilla, A. (2019). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales proveniente de procesos de cromado de plásticos en empresas de Bogotá*. (Tesis, Universidad Cooperativa de Colombia). <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/fcf9d32f-d056-426e-8cf9-30b4b8b934e8/content>
- Castillo, M. y López, J. (2018). *Tratamiento del agua residual industrial de la curtiembre Rolemt, para el cumplimiento de valores máximos admisibles*. (Tesis, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Perú). <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/825/INFORME%20FINAL%20ODE%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cerón, A. (2018). *Estudio comparativo de los efectos físicos causados por agua contaminada con sales de cromo en Lemna Minor y Limnobium Laevigatum*. (Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador). <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9028/1/236T0347.pdf>
- 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. [file:///C:/Users/AmbientPC1/Downloads/Dialnet-HidrogequimicaEnElAcuiferoCosteroDelEjeBananeroDe-4845697%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/AmbientPC1/Downloads/Dialnet-HidrogequimicaEnElAcuiferoCosteroDelEjeBananeroDe-4845697%20(1).pdf)
- Córdova, H., Vargas, R., Cesare, M., Flores, L., y Visitación, L. (2014). Tratamiento de las aguas residuales del proceso de curtido tradicional y alternativo que utiliza acomplejantes de cromo. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 80(3), 183-191. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v80i3.226>
- Córdova, H., Vargas, R., Téllez, L., Cesare, M., Becker, R., y Visitación, L. (2013). Influencia del uso de acomplejantes 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>
- De Vergara, M. del B. (2015). *Cloración frente a ozonización en el tratamiento de agua potable. Ventajas y desventajas de ambos procesos*. (Tesis, Universidad Complutense, España). In Facultad De Farmacia. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/48546/1/MARIA%20DEL%20BARRIO%20VERGARA%20%281%29.pdf>
- Del Valle, M. (2017). *Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos mediante el uso de biopolímeros en agua turbia del estero salado*. (Tesis, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Perú). <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/22573>
- Desbrières, J., & Guibal, E. (2018). Chitosan for wastewater treatment. *Polymer International*, 67(1), 7-14. <https://doi.org/10.1002/pi.5464>
- Duarte, E., Olivero, J., y Jaramillo, B. (2009). Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembre usando quitosán obtenido de desechos de camarón. *Scientia et Technica*, 2(42), 290–295. <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/2679/1401>
- Duran, O. y Martínez, L. (2022). *Caracterización tecnológica y del talento humano en las empresas del sector de curtiembres del área metropolitana de Cúcuta y su ventaja competitiva*. Universidad libre seccional Cúcuta. (Tesis, Universidad Libre Seccional Cúcuta, Colombia).

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/23787/TESIS%20ALFREDO%20Y%20SARAI%20ULTIMA%20CORRECI%20c3%93N.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Fernández, Y., y Ruiz, C. (2020). Tratamiento de agua residual mediante aplicación de sulfafo de aluminio y biopolímero natural de tamarindo (*Tamarindus indica*). *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. 6(2) 28-34. [https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri\\_ctd/index](https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/index)
- Fúquene, D., Yate, A. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *ECAPMA*. 2(1). <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>
- García, H. (2021). *Propuesta de una planta de tratamiento de las aguas residuales, para mejorar la recirculación del agua y los tratamientos en cada una de las etapas del proceso de curtido en una empresa curtiembre, en la ciudad de Trujillo*. (Tesis doctoral, Universidad Nacional de Piura, Perú). <https://docplayer.es/219179817-Universidad-nacional-de-piura-escuela-de-posgrado.html>
- García, V., Yipmantin, A., Guzmán, E., Pumachagua, R., y Maldonado, H. (2011). Estudio de la cinética de biosorción de iones plomo en pectina reticulada proveniente de cáscaras de cítricos. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(3), 173-181. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v77n3/a02v77n3.pdf>
- Gómez, D., Rodríguez, J. P., y Betancourth, J. F. (2018). *Pulpa de café para la remoción de Cr (III) en aguas residuales provenientes de curtiembres*. [Seminario]. In Memorias del Seminario Nacional de Gestión Ambiental Urbana y Control de la Contaminación (III), pp. 56-65). <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.01675>
- Hala, A., & Ali, J. (2019). Chitosan as a widely used coagulant to reduce turbidity and color of model textile wastewater containing an anionic dye (acid blue). [Conference]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 584, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/584/1/012036>
- Hossain, K., Sikder, M., Rahman, M., Uddin, M. & Kurasaki, M. (2017). Investigation of Chromium Removal Efficacy from Tannery Effluent by Synthesized Chitosan from Crab Shell. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(4), 1569-1577. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2435-0>
- Instituto Tecnológico de la Producción [ITP]. (2018). Evaluación para la sustitución de procesos y/o productos químicos para la producción limpia en la industria de curtiembres. *Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva*, (01), 1-30. [https://www.itp.gob.pe/archivos/vtic/CCAL\\_001-2018.pdf](https://www.itp.gob.pe/archivos/vtic/CCAL_001-2018.pdf)
- Laura, V. (2018). *Estudio de la determinación de la actividad floculante en aguas provenientes del río chili conteniendo AS, PB y CR tratados con pectina obtenidos a partir de la cáscara de naranja, limón y mandarina*. (Tesis posgrado, Universidad Nacional de San

Agustín de Arequipa, Perú).  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6884/QUMlative.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

- Lim, B., Lim, J., & Ho, Y. (2018). Garden cress mucilage as a potential emerging biopolymer for improving turbidity removal in water treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.015>
- Martínez, S., y Romero, J. (2018). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: Un análisis de su competitividad. *Revista de La Facultad de Ciencias Económicas*, 26(1), 113-124. <https://doi.org/10.18359/rfce.2357>
- Méndez-Gómez, E., y Arias-Lizárraga, D. (2014). Remoción de sólidos en aguas residuales de la industria harinera de pescado empleando biopolímeros. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V (3), 115-123.
- Molina, D. (2016). *Extracción de pectina de frutos amazónicos mediante un proceso asistido por microondas*. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). <http://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58261/DianaE.MolinaSoler.2016.pdf?sequence=1>
- Montenegro, S., Pulido, S. y Calderón, L. (2019). Prácticas de biorremediación en suelos y aguas. *Ecapma*, 1(2), 49. <https://doi.org/10.22490/notas.3451>
- Morocho, M. (2017). *Tratamiento de aguas residuales de una curtiembre en el cantón cuenca mediante la aplicación dosificada de EMAS (microorganismos eficientes autóctonos)*. (Tesis magíster, Universidad de Cuenca, Ecuador). <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/26955/1/Tesis.pdf.pdf>
- Najarro, R. (2021). *Proceso de absorción natural con quitosano para la remoción de cromo hexavalente en aguas residuales de curtiembre del segundo tramo del río Huaycoloro, Lima 2021*. (Tesis, Universidad César Vallejo, Perú). [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/74514/Najarro\\_SR-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/74514/Najarro_SR-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ortiz, N., y Carmona, J. (2015). Aprovechamiento de cromo eliminado en aguas residuales de curtiembres (San Benito, Bogotá), mediante tratamiento con sulfato de sodio. *Luna Azul*, (40), 117-126. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.40.9>
- Paredes, M., & Valle, M. (2020). *Evaluación de la capacidad de adsorción de la cáscara de limón (citrus limón (l.) burm. f.) para la remoción de cromo (vi) de aguas residuales de la empresa textilera Hualhuas* (Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú). [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6474/T010\\_70346918\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6474/T010_70346918_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Pattanashetti, N., Heggannavar, G., & Kariduraganavar, M. (2017). Smart biopolymers and their biomedical applications. *Procedia Manufacturing*, (12), 263-279. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.030>
- Ramírez, J., Martínez, Ó. y Fernández, L. (2013). Remoción de contaminantes en aguas residuales industriales empleando carbón activado de pino pátula. *Revista Avances Investigación En Ingeniería*, 10(1), 42-49. [http://www.unilibre.edu.co/revistaavances//avances-10-1/Tema\\_05\\_carbon\\_activado\\_pino.pdf](http://www.unilibre.edu.co/revistaavances//avances-10-1/Tema_05_carbon_activado_pino.pdf)
- Ramirez, V., Bonilla, E., Carvajal, L. y Serrezuela, R. (2018). Removal of chromium in wastewater from tanneries applying bioremediation with algae, orange peels and citrus pectin. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(9), 433-449. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.8235>
- Ramos, H., y Vargas, G. (2020) *Remoción de DQO y SST en el tratamiento de aguas residuales de curtiembre en un reactor UASB: Revisión Sistemática*. (Tesis, Universidad César Vallejo, Perú). [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/65580/Ramos\\_VHE-Vargas\\_SGH-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/65580/Ramos_VHE-Vargas_SGH-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Rendulich, J. (2019). *Diseño de un modelo de gestión de producción para pequeñas curtiembres basado en buenas prácticas de manufactura y un sistema de información de dosificación e impacto de insumos de curtido – caso: curtiembre Fernando Quispe*. (Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú). <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/11485/UPretaje.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez, M. (2011). *Adsorción de metales pesados mediante biocompositos con base en quitina de diferentes grados de acetilación*. (Tesis de posgrado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C., Perú) <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/2959/TMIPICYTR6A32011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez-Jiménez, D., Rodríguez-Díaz, Y., y Burbano-Erazo, E. (2022). Quitosano aplicado en el tratamiento del agua residual de la producción de aceite de palma. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1). [http://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v33n01\\_44288.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_meso/v33n01_44288.pdf)
- Rosas, Y. (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, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú). <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9250/IQroquye.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Sahana, T., & Rekha, P. (2018). Biopolymers: Applications in wound healing and skin tissue engineering. *Molecular Biology Reports*, 45(6), 2857-2867. <https://doi.org/10.1007/s11033-018-4296-3>
- Salas, G. (2005). Eliminación de sulfuros por oxidación en el tratamiento del agua residual de una curtiembre. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 8(1), 49-54. <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/5152/4243>
- Sánchez, D., García, V., Yipmantin, A., Guzmán, E., Ale, N., y Maldonado, H. (2014). Estudio de la cinética de biosorción de iones cadmio (II) en pectina reticulada proveniente de cáscaras de naranja. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(4), 298-307. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v80n4/a09v80n4.pdf>
- Semarnat. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde.* México. [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/SEMARNAT%202016.%20Informe%20situac.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SEMARNAT%202016.%20Informe%20situac.pdf)
- Silva, M. y Salinas, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1), 69-80. <https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>
- Sotomayor, R. (2006). Tratamiento de los efluentes de la industria del cuero en la ciudad de Arequipa. *Ciencia y Desarrollo*, 7, 31-36. <https://doi.org/10.21503/cyd.v7i0.1192>
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á. y Garcés-Jaraba, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Valero, M., Ortigón, Y., y Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: Avances y perspectivas. *DYNA*, 80(181), 171-180. <https://www.redalyc.org/pdf/496/49628728019.pdf>
- Vejarano, R., y Principe, D. (2021). *Influencia de dosificación de quitosano y tiempo en la remoción de sólidos suspendidos totales y turbidez en aguas residuales municipales.* (Tesis, Universidad Nacional de Trujillo, Perú). [https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17374/Tesis%20VEJARANO%20GARCIA\\_%20PRINCIPE%20QUISPE\\_protegido.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/17374/Tesis%20VEJARANO%20GARCIA_%20PRINCIPE%20QUISPE_protegido.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Zeballos, J. (2014). *Determinación de parámetros fisicoquímicos en efluentes industriales de curtiembres de la asociación de pequeñas y medianas empresas de curtiembres, fábricas de cola y derivados del cuero (APYMECO) - Parque Industrial de Río Seco (PIRS), Cerro Colorado-Arequipa.* (Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa,

Perú). <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/454/M-21669.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zhao, C. & Chen, W. (2019). A review for tannery wastewater treatment: some thoughts under stricter discharge requirements. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 26102-26111. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05699-6>