

Evaluación del colágeno de la piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*) obtenido mediante extracción alcalina y ácida


Evaluation of tilapia (*Oreochromis niloticus*) skin collagen obtained through alkaline and acid extraction


*Delgado Zambrano, Paola Aracely*¹


*Blondet Morales, Odalys Gabriela*²

Cedeño Alcívar, Diana Carolina^{3*}

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador

¹ paola.delgado.41@espam.edu.ec 

² odalys.blondet.41@espam.edu.ec 

³ dcedeno@espam.edu.ec 

Recibido/received:18/08/2025 Corregido/revised:15/01/2026 Aceptado/accepted:15/06/2026

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el colágeno de la piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*) obtenido mediante extracción ácida y alcalina, empleando un diseño factorial 2×2. Se aplicaron cuatro tratamientos que combinaron dos concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH 0.5 N y 0.8 N) con dos tipos de ácido (acético y cítrico al 5%), cada uno con cuatro repeticiones, totalizando 16 unidades experimentales. La metodología incluyó etapas sucesivas de pretratamiento alcalino, extracción de grasa con alcohol etílico, desmineralización con EDTA y HCl, extracción ácida, precipitación salina, centrifugación y secado en estufa de convección forzada del colágeno extraído. Se realizaron análisis bromatológicos (humedad, grasa, proteína, cenizas), fisicoquímicos (pH, acidez), y funcionales (capacidad de retención de agua y emulsificación), complementados con evaluación estadística mediante ANOVA bifactorial y prueba de Tukey (p<0.05). El tratamiento T3 (NaOH 0.8 N + ácido acético) demostró mayor eficiencia con un rendimiento de 26.8%, contenido proteico de 84.47%, menor contenido de grasa (1.37%), buena capacidad de retención de agua (67.3%) y emulsificación (18.69 ml/g). Se concluye que este procedimiento representa una alternativa sustentable y efectiva para el aprovechamiento de subproductos de la industria pesquera, aportando a la valorización de residuos orgánicos mediante la obtención de biopolímeros de alto valor agregado. El estudio aporta evidencia científica al determinar la interacción óptima entre una hidrólisis alcalina fuerte y un extracto orgánico débil mediante diseño factorial, maximizando simultáneamente el rendimiento, pureza proteica y propiedades funcionales (CRA y CE) del biopolímero sin alterar su estructura. Esto constituye una alternativa sustentable y efectiva para valorizar residuos pesqueros en biopolímeros de alto valor agregado.

^{1*} Autor de correspondencia
Correo: dcedeno@espam.edu.ec



Palabras clave: Biopolímeros; subproductos; hidrólisis enzimática; propiedades funcionales; aprovechamiento de residuos; caracterización físico-química

Abstract: The present study aimed to evaluate the effect of acid and alkaline hydrolysis processes on the extraction of collagen from tilapia skin (*Oreochromis niloticus*), using a 2×2 factorial design. Four treatments were applied, combining two concentrations of sodium hydroxide (NaOH 0.5 N and 0.8 N) with two types of acid (5% acetic and citric), each with four replications, totaling 16 experimental units. The methodology included successive stages of alkaline pretreatment, fat extraction with ethyl alcohol, demineralization with EDTA and HCl, acid hydrolysis, salt precipitation, centrifugation, and forced convection oven drying of the extracted collagen. Bromatological analyses (moisture, fat, protein, ash), physicochemical parameters (pH, acidity), and functional properties (water-holding capacity and emulsification) were evaluated, supported by statistical analysis using two-way ANOVA and Tukey's test ($p < 0.05$). Treatment T3 (NaOH 0.8 N + acetic acid) showed the highest efficiency, with a yield of 26.80%, protein content of 84.47%, lower fat content (1.37%), good water-holding capacity (67.30%), and emulsification ability (18.69 ml/g). It is concluded that this procedure represents a sustainable and effective alternative for the utilization of by-products from the fishing industry, contributing to the valorization of organic waste through the production of high value-added biopolymers. The study's scientific contribution lies in determining the optimal interaction between strong alkaline hydrolysis and a weak organic extractant using a factorial design, simultaneously maximizing the yield, protein purity, and functional properties (WHC and EC) of the biopolymer without altering its structure. This provides a sustainable and effective alternative for valorizing fishing industry waste into high value-added biopolymers.

Keywords: Biopolymers; by-products; enzymatic hydrolysis; functional properties; waste valorization; physicochemical characterization

Introducción

En Ecuador la producción de tilapia a escala comercial ha incrementado en los últimos años, posicionando al país como uno de los principales productores a nivel mundial y pionero en América Latina. De acuerdo con la Cámara Nacional de Acuicultura (CNA) (2023) en 2021, el país exportó 1 157,000 libras de tilapia y en 2022 solo a Estados Unidos se enviaron 105,641 libras.

El procesamiento industrial y fileteado de la tilapia (*Oreochromis* sp.) genera un volumen sustancial de subproductos pesqueros que representan entre el 60% y 70% del peso total del organismo (Peñarubia et al., 2023). Cuando estos residuos orgánicos no reciben un tratamiento o valorización adecuados por parte de los comerciantes, se convierten en una fuente crítica de degradación ambiental (Thirukumaran et al., 2022). Los residuos de pescado representan amenazas para el ambiente (contaminación del agua, emisiones de gases de efecto invernadero, olores y plagas) (Islam et al., 2021).

Según Galanakis (2021), el uso de subproductos de pescado y desechos pesqueros permiten la futura disminución de desechos, los cuales, caso contrario, serán vertidos en el medio acuático, provocando

una eutrofización del agua. Sin embargo, dichos desechos se pueden minimizar al aplicar prácticas y estrategias sostenibles, con esto concuerda Furtado et al. (2022) al exponer la necesidad de examinar métodos para la reutilización de estos desechos pesqueros.

La notable densidad y calidad proteica de los subproductos pesqueros facilita su bioconversión en compuestos de alto valor agregado. Por un lado, Ramakrishnan et al. (2023) destacan el aprovechamiento de estas matrices proteicas en la nutrición humana y en el aislamiento de enzimas de uso industrial mediante tecnologías de extracción sostenible. Asimismo, Guan et al. (2026), demuestran la viabilidad de incorporar estos compuestos biológicamente activos en formulaciones cosmecéuticas y en el desarrollo de insumos agrícolas funcionales. Más allá de las proteínas, el procesamiento integral de otras fracciones macroestructurales como los lípidos y la quitina representa una estrategia clave para mitigar el impacto ecológico de la actividad pesquera (Navarro-Hortal et al., 2023). Finalmente, este enfoque de valorización no solo resuelve una problemática ambiental, sino que actúa como un motor para consolidar prácticas de bioeconomía circular en las regiones acuícolas (Mozumder et al. 2022).

La problemática identificada es el desaprovechamiento de los residuos pesqueros, especialmente la piel de tilapia, la cual es una fuente rica en colágeno de alta pureza (Song et al., 2020). La extracción de esta proteína a partir de subproductos marinos representa una opción sostenible y de bajo costo en comparación con las fuentes terrestres tradicionales (Ashraf et al., 2020). De este modo, la valorización de la piel de tilapia genera perspectivas importantes para el desarrollo de nuevos productos.

El colágeno de pescado es una proteína esencial cuya importancia trasciende la industria alimentaria, siendo un componente valioso también en los sectores cosmético y farmacéutico (Hoyos et al., 2022). Esta relevancia se debe, en gran medida, a que el colágeno tipo I es el componente estructural predominante en los tejidos conectivos de los vertebrados, representando aproximadamente el 70% del colágeno total del cuerpo humano. Dada la creciente demanda global de colágeno y el aumento en la producción de filetes de tilapia, se ha generado un alto interés en la extracción de colágeno a partir de subproductos de animales acuáticos. Esta fuente se ha consolidado como una alternativa abundante y segura a las fuentes tradicionales de mamíferos (Gallo et al., 2022), aprovechando así los residuos de la creciente industria de la tilapia.

Los métodos de extracción ácido y alcalino se emplean ampliamente para liberar y purificar proteínas estructurales como el colágeno a partir de matrices biológicas, mediante la modificación controlada del pH del sistema. En la extracción ácida, soluciones con pH bajo (2–4), comúnmente ácido acético, rompen enlaces interfibrilares y favorecen la solubilización de colágeno tipo I debido a su sensibilidad a ambientes ligeramente ácidos, lo que genera estructuras más abiertas y mayor accesibilidad molecular (Jafari et al., 2020). Por otro lado, la extracción alcalina utiliza soluciones con pH elevado (8–12), generalmente NaOH, que actúan desnaturalizando proteínas no colagénicas y rompiendo interacciones hidrofóbicas y enlaces iónicos, permitiendo así la liberación de moléculas de colágeno más purificadas. Diversos estudios reportan que el pretratamiento alcalino mejora la exposición de grupos polares y facilita la remoción de proteínas no deseadas, optimizando el rendimiento final del proceso (Gaikwad y Kim, 2024; Susanti et al., 2024; Rajabimashhadi et al., 2023).

A diferencia de las investigaciones tradicionales en colágenos marinos que evalúan variables de extracción de manera aislada, el valor innovador de este estudio radica en el análisis sistemático y multivariable (diseño factorial 2x2) de la interacción complementaria entre la fuerza de desproteínización alcalina y la especificidad del ácido orgánico. Lo nuevo que este trabajo aporta a la literatura existente es la demostración cuantitativa de que el ajuste preciso de la concentración de NaOH a 0.8, combinado estrictamente con ácido acético al (5%), genera una desestabilización controlada de los enlaces interfibrilares de la piel de tilapia que no solo incrementa el rendimiento a un nivel competitivo (26.8%), sino que remueve selectivamente los lípidos residuales y preserva la integridad de la triple hélice, optimizando la capacidad emulsificante y de retención de agua por encima de los estándares reportados para extractantes homólogos.

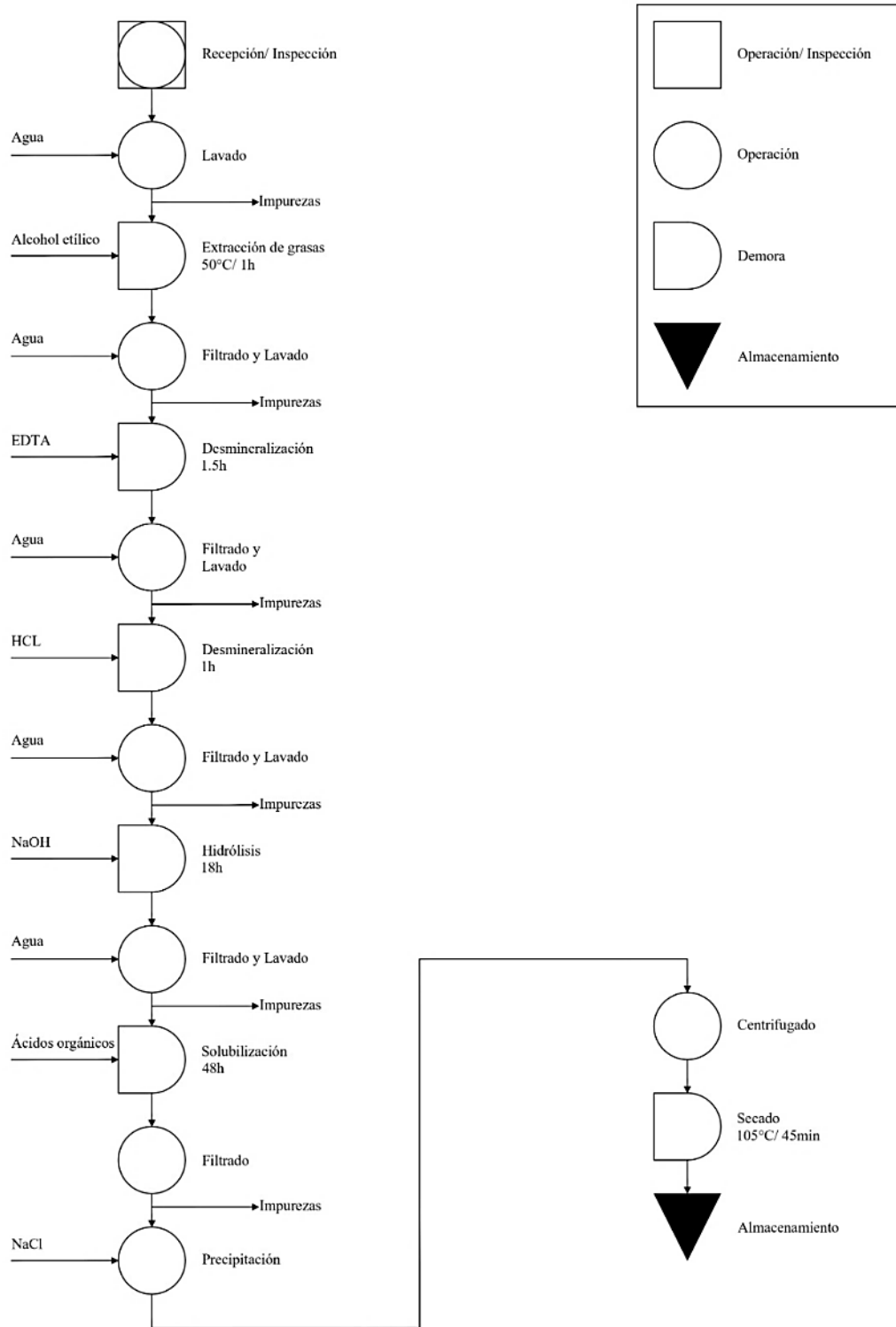
En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el colágeno de la piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*) obtenido mediante extracciones alcalinas y ácidas. Se evaluó si al menos uno de los tratamientos influye significativamente en las propiedades bromatológicas, físico-químicas y en el rendimiento del colágeno extraído.

Material y Métodos

La piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*) fue recolectada de comerciantes locales en la represa “La Esperanza”, situada en la parroquia Quiroga, cantón Bolívar. Posteriormente, las muestras fueron transportadas bajo condiciones controladas de temperatura hacia los laboratorios de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López” (ESPAM MFL) para su procesamiento y análisis. Este estudio evaluó la extracción de colágeno de piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*) mediante un diseño factorial 2x2, combinando dos concentraciones de hidróxido de sodio (0.5N y 0.8N) y dos tipos de ácido (acético y cítrico, ambos al 5%). Se aplicaron cuatro tratamientos con cuatro repeticiones cada uno, totalizando 16 unidades experimentales. Se utilizó un diseño completamente al azar, se analizó con ANOVA bifactorial y la prueba de tukey (5% de significancia) en InfoStat. Se evaluaron los efectos individuales y combinados de los factores sobre las propiedades del colágeno, siguiendo una metodología similar a la de Ormaza y Santos (2024). En la Figura 1 se muestran las etapas del proceso desarrollado para la obtención a partir de la piel de tilapia.

Figura 1

Diagrama de flujo etapas del proceso de extracción de colágeno



EDTA: ácido etilendiaminotetraacético; HCl: ácido clorhídrico; NaOH: hidróxido de sodio

Preparación de la muestra: Muestras de piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*) fueron recolectadas de comerciantes locales y transportadas bajo condiciones controladas de temperatura hasta los laboratorios de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí (ESPAM MFL). Una vez en el laboratorio, se lavaron cuidadosamente con agua potable para remover impurezas superficiales como polvo y tierra. Posteriormente, la piel fue cortada en segmentos pequeños utilizando cuchillos de acero inoxidable previamente esterilizados, con el fin de facilitar su procesamiento en las etapas posteriores.

Extracción de grasas: Para eliminar la grasa de los desechos, se trató la muestra con alcohol etílico. Se utilizaron 300 g de la muestra y 300 mL de alcohol etílico, los cuales fueron calentados durante 1 hora a 50 °C. Luego, se procedió a filtrar y lavar la muestra con agua destilada.

Desmineralización: La remoción de carbonatos de calcio se llevó a cabo con dos reactivos: EDTA a 0.5M, durante 1.5 horas a temperatura ambiente, seguido de un lavado y filtrado. Luego, la muestra se trató con una solución de ácido clorhídrico (HCl) a 0.5N durante 1 hora, a temperatura ambiente, bajo agitación constante. Al finalizar, se filtró y se lavó nuevamente.

Hidrólisis alcalina: Con el propósito de eliminar las proteínas no colágenas, se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) al 0.5N y 0.8N, durante 18 horas a temperatura ambiente. Posteriormente, hasta obtener un pH neutro la muestra fue filtrada y lavada.

Extracción ácida: El colágeno se solubiliza en ácido acético y ácido cítrico al 5% en sus diferentes tratamientos, esto se dio por un periodo de 2 días bajo temperatura ambiente. Después, la solución fue filtrada con papel filtro #40.

Precipitación salina: Para recuperar el colágeno, se utilizó una solución de cloruro de sodio (NaCl) 2.5 M en una proporción 1:1 con el colágeno soluble en ácido. La mezcla se agitó y se colocó en un embudo de separación para precipitar el colágeno.

Colágeno en estado sólido: El colágeno precipitado se drenó del embudo y se centrifugó en tubos de ensayo. Esta fase fue realizada en tres etapas de centrifugación: 2 minutos a 30 RPM, 3 minutos a 35 RPM y 5 minutos a 45 RPM, con el fin de eliminar el exceso de solución precipitante. Finalmente, el colágeno se secó en una estufa de convección forzada a 105 °C durante 45 minutos.

Técnicas: Tras la obtención del colágeno, las muestras fueron trasladadas al laboratorio en vasos de precipitación protegidos por papel aluminio, donde se evaluaron los efectos de las diferentes concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH) y de ácidos orgánicos (acético y cítrico al 5%) sobre las propiedades fisicoquímicas y bromatológicas del colágeno extraído de piel de tilapia.

Caracterización bromatológica: La determinación de la humedad se realizó mediante el método gravimétrico, de acuerdo con las directrices de (Méndez, 2020) y la norma AOAC 934.01. Se procedió a pesar 2 g de muestra para su posterior secado en una estufa a 135 °C durante un periodo

de 2 horas. Tras este proceso, la muestra se trasladó a un desecador por 30 minutos y finalmente se registró el peso final para aplicar el cálculo matemático descrito en la ecuación 1:

$$H = \frac{W_i + W_m - W_f}{W_m} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación (1), H representa el porcentaje de humedad (%), W_i equivale al peso inicial de crisol vacío (g), W_m corresponde al peso de la muestra húmeda (g) y W_f Se refiere al peso final del crisol con la muestra seca (g).

Para el análisis de cenizas, se empleó el método gravimétrico basado en la metodología descrita por (Méndez, 2020) y la norma AOAC 923.03. Se pesaron 2 g de muestra, los cuales se sometieron a calcinación en un crisol durante 25 minutos para posteriormente transferir la muestra a una mufla a 600 °C. Tras completarse el enfriamiento en el desecador durante un lapso de 30 minutos, se efectuó el pesaje final con el propósito de aplicar el cálculo correspondiente establecido en (2):

$$C = \frac{W_f + W_i}{W_m} \times 100 \quad (2)$$

En la ecuación (2), C representa el contenido de cenizas (%), W_f simboliza el peso del crisol con las cenizas obtenidas (g), W_i es el peso del crisol vacío (g) y W_m corresponde al peso inicial de la muestra analizada (g).

El contenido de grasa se cuantificó a través del método Soxhlet mediante la aplicación de un solvente orgánico como el hexano, fundamentado en el procedimiento de (Méndez, 2020) y la norma AOAC 920.39. Una vez eliminado el disolvente por completo, se procedió al pesaje del residuo extraído y se ejecutaron las operaciones matemáticas respectivas a través de (3):

$$G = \frac{W_{gf} + W_{gi}}{W_m} \times 100 \quad (3)$$

En la ecuación (3), G representa el porcentaje de grasa total (%), W_{gf} es el peso final del balón receptor junto con la grasa extraída (g), W_{gi} es el peso inicial del balón vacío (g) y W_m corresponde al peso de la muestra seca (g).

La cuantificación de proteína se realizó mediante el método Kjeldahl, usando 1.5 g de la muestra. El proceso incluyó digestión y destilación con reactivos como hidróxido de sodio (NaOH), ácido sulfúrico y rojo de metilo. La digestión se llevó a cabo durante 1 hora y 30 minutos, seguida de un enfriamiento de una hora. Posteriormente fue destilada con la adición de diversos reactivos y el proceso concluyó con una titulación con hidróxido de sodio (NaOH), registrando el volumen consumido al observar el cambio de color Avilés-Vélez (2002, p.43) y la norma AOAC 2002.11 (4).

$$P = \frac{[(V_a \times N_a) - (V_b \times N_b)] \times M_{eq} \times F_c}{W_m} \times 100 \quad (4)$$

En la ecuación (4), P representa el porcentaje de proteína total (%), V_a y N_a corresponden al volumen (mL) y normalidad del ácido respectivamente, V_b y N_b equivalen al volumen (mL) y la normalidad de la base empleada en el blanco, M_{eq} es el miliequivalente del nitrógeno (0.014 g/meq), F_c representa el factor de conversión de proteína específico y W_m corresponde al peso de la muestra (g). *Caracterización fisicoquímica:* El pH se determinó con un potenciómetro, mezclando 10 g de muestra con 0,5 L de agua destilada, y sumergiendo el electrodo en la solución para obtener la lectura, siguiendo la metodología aplicada por Muñoz (2022).

Por su parte, la acidez se evaluó mediante titulación volumétrica bajo los criterios de (Méndez, 2020) y la norma AOAC 981.12. Se disolvieron 5 g de muestra en agua destilada, permitiendo un tiempo de reposo de 24 horas. El extracto obtenido fue transferido a un matraz y se tituló con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N empleando fenolftaleína en calidad de indicador, procesándose la información de acuerdo con (5):

$$A_t = \frac{V_b \times N_b \times m_{eq}}{W_m} \times 100 \quad (5)$$

En la ecuación (5), A_t representa el porcentaje de acidez titulable (%), V_b indica el volumen de NaOH consumido durante la titulación (mL), N_b refiere a la normalidad teórica del NaOH (0.1 N), m_{eq} es el miliequivalente del ácido orgánico predominante en la matriz y W_m corresponde al peso de la muestra analizada (g).

La capacidad de retención de agua (CRA) se valoró a través del método gravimétrico tomando como referencia la metodología planteada por Oswell et al. (2021) y la norma AOAC 971.09. El análisis consistió en colocar 5 g de muestra en una solución de cloruro de sodio (NaCl) 0.6 M. Tras las etapas consecutivas de agitación, enfriamiento y centrifugación, se procedió a la cuantificación del volumen no retenido con el objetivo de resolver (6):

$$CRA = \frac{V_i - V_s}{W_m} \times 100 \quad (6)$$

En la ecuación (6), CRA describe la capacidad de retención de agua (%), V_i determina el volumen inicial de la solución de NaCl añadida (mL), V_s constituye el volumen del líquido sobrenadante remanente (mL) y W_m corresponde al peso inicial de la muestra (g).

Para la determinación de la capacidad de emulsión (CE) por método gravimétrico, se pesaron 25 g de colágeno y se homogeneizaron junto con una solución de cloruro de sodio (NaCl) 0.1 M en un equipo licuador hasta la conformación de una pasta uniforme. Posteriormente, se extrajeron 50 g de dicha pasta para adicionarle 0.75 L de cloruro de sodio (NaCl) 0.1 M a una temperatura constante de 5 °C mediante un nuevo proceso de licuado. El ensayo continuó con la incorporación gradual de aceite vegetal hasta identificar el punto de saturación en el cual cesó la integración con la pasta, siguiendo las directrices de Oswell et al. (2021) y la norma AOAC 988.10. El cálculo de los ensayos ejecutados por duplicado se rigió bajo lo establecido en (7):

$$CE = \frac{V_p \times W_c}{W_c + V_{NaCl}} \times 100 \quad (7)$$

Donde CE es la capacidad de emulsión (%), V_p representa el volumen de la pasta (mL), W_c el peso del colágeno utilizado (g) y V_{NaCl} Es el volumen total de la solución de NaCl adicionada (mL).

Determinación de rendimiento: El cálculo porcentual del rendimiento de colágeno extraído a partir de la piel de tilapia se fundamentó en los criterios descritos por Méndez (2020). El procesamiento de los datos recolectados se operó a través del programa Microsoft Excel 2016 con la finalidad de establecer el rendimiento de cada tratamiento de extracción mediante el uso de (8):

$$R = \frac{W_f}{W_i} \times 100 \quad (8)$$

R expresa el porcentaje de rendimiento estimado (%), W_f corresponde al peso final del colágeno recuperado (g) y W_i equivale a; peso inicial; de la piel de tilapia introducida al sistema (g).

Unidad experimental: Considerando lo planteado por Han et al. (2023), para cada unidad experimental se tomaron 300 g de piel de tilapia para cada uno de los tratamientos, estos fueron sometidos a dos concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH) (0.5 y 0.8 N) y dos tipos de ácidos (acético y cítrico) al 5% para la extracción del colágeno, de lo cual se obtuvieron un total de 16 unidades experimentales.

Resultados y discusión

Análisis bromatológicos del colágeno de piel de tilapia (Oreochromis niloticus)

A partir de los tratamientos químicos descritos en la metodología (T1), se efectuaron análisis bromatológicos en laboratorio con el propósito de determinar la eficacia de cada combinación en la extracción de colágeno de la piel de tilapia (*Oreochromis niloticus*). Los parámetros evaluados incluyeron el contenido de humedad, cenizas, grasa y proteína, los cuales fueron sometidos a un análisis estadístico mediante ANOVA bifactorial, seguido de la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para establecer diferencias significativas entre tratamientos. Los datos obtenidos permitieron identificar que el tratamiento T3 (NaOH 0.8 N + ácido acético 5%) presentó los valores más favorables en términos de rendimiento de extracción, pureza proteica, baja concentración lipídica y propiedades funcionales del colágeno, evidenciando su superioridad frente a los demás parámetros evaluados.

Tabla 1
Tratamientos aplicados

Tratamiento	Descripción
T1	Hidróxido de sodio 0.5 N - ácido acético 5%
T2	Hidróxido de sodio 0.5 N - ácido cítrico 5%
T3	Hidróxido de sodio 0.8 N - ácido acético 5%
T4	Hidróxido de sodio 0.8 N - ácido cítrico 5%

Respecto al parámetro de humedad, el análisis de varianza indicó que la hidrólisis alcalina ($p = 0.0013$), la extracción ácida ($p < 0.001$) y la interacción entre ambos factores ($p < 0.001$) ejercieron efectos estadísticamente significativos (Tabla 2). Estos valores sugieren que el proceso de extracción ácida posee una influencia preponderante sobre la humedad final del colágeno en comparación con la hidrólisis alcalina individual o la acción combinada de las variables.

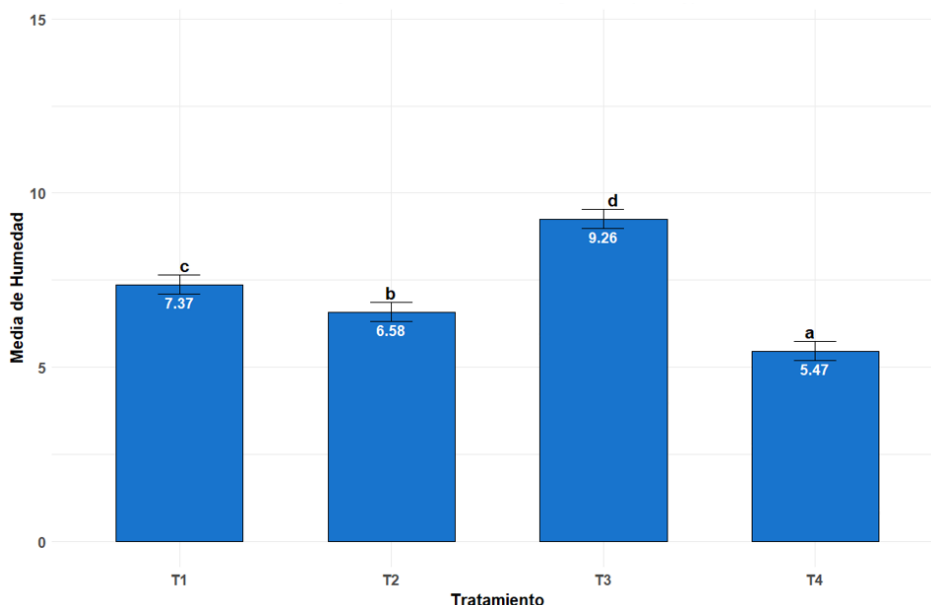
Tabla 2
Análisis ANOVA de humedad

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	0.597	0.597	17.37	0.0013
Extracción ácida	1	20.954	20.954	609.96	1.17e-11
Hidrólisis alcalina *					
Extracción ácida	1	8.985	8.985	261.56	1.64e-09
Residuos	12	0.034			

* símbolo utilizado para representar la unión de ambos procesos. Uso del software R Studio

Los análisis estadísticos confirmaron que la variable de humedad cumple con los supuestos de normalidad y homogeneidad a través de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, validando la aplicación del ANOVA. En este sentido, el tratamiento T3 reflejó la retención de humedad más elevada, mientras que el tratamiento T4 evidenció el valor mínimo registrado (Figura 2). El T3 mostró la humedad más alta y T4 la más baja, esto sugiere que la combinación de NaOH 0.8 N y ácido cítrico retiene más agua debido a una extracción menos agresiva sobre la matriz proteica, mientras que NaOH 0.8 N + ácido acético logra mayor ruptura de enlaces y mejor secado. Estudios recientes indican que el uso de ácido acético, incluso combinado con burbujas ultrafinas, mejora la solubilización y recuperación de colágeno con menor humedad residual (Kuwahara, 2021).

Figura 2
Contenido (%) de humedad por tratamiento



En la Tabla 3 se muestra que, para el parámetro cenizas, la hidrólisis alcalina ($2,24e-09$), la extracción ácida ($4,43e-08$) y la interacción entre ambos factores ($6,28e-11$) presentaron diferencias significativas, esto sugiere que la interacción de ambos factores tiene un mejor rendimiento que los factores individuales.

En la Figura 3 se observa que el T2 (NaOH 0.5N - ácido cítrico 5%) presenta un mayor contenido de cenizas, mientras que el T4 (NaOH 0.8N - ácido acético 5%) presenta el porcentaje de cenizas más bajo.

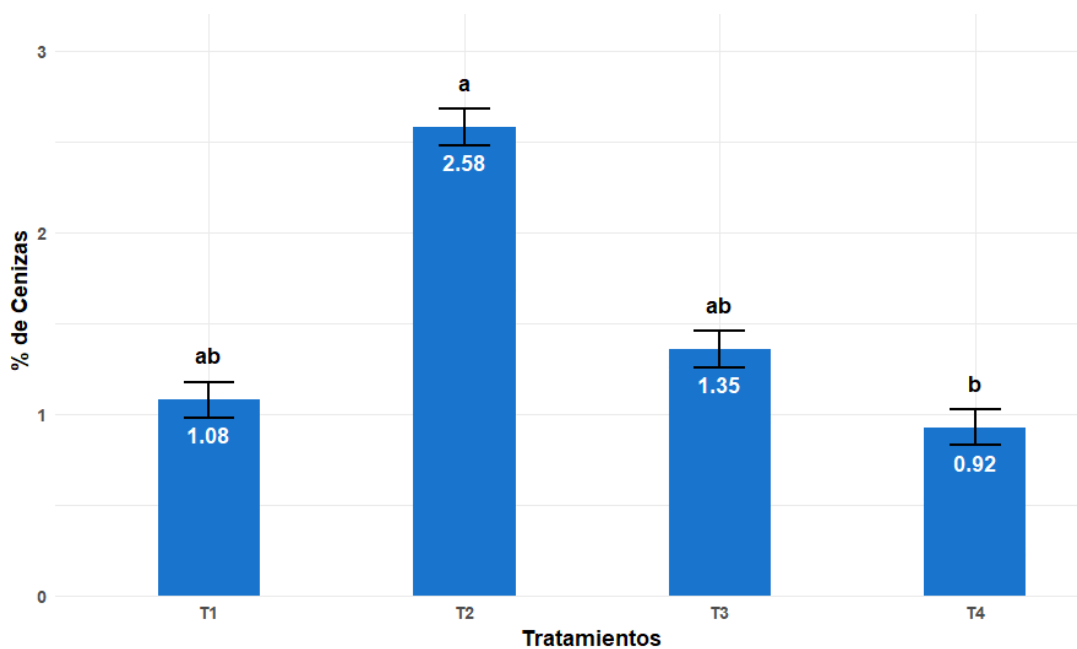
Tabla 3
Análisis ANOVA de cenizas

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	1.939	1.939	244.4	2.24e-09
Extracción ácida	1	1.161	1.161	146.3	4.43e-08
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	3.639	3.639	458.5	6.28e-11
Residuos	12	0.095	0.008		

La Figura 3 muestra que el T2 (NaOH 0.5N - ácido cítrico 5%) presenta mayor contenido mineral residual, lo que sugiere una desmineralización menos eficiente. Estudios en especies similares han señalado que el ácido acético mantiene menor concentración de cenizas en el colágeno final,

posiblemente por su capacidad para solubilizar sales iónicas más eficientemente en fases posteriores de lavado (Gutiérrez-Canul et al., 2025).

Figura 3
Contenido de cenizas por tratamiento



En la Figura 3, gráfico de cenizas, hay más dispersión entre tratamientos, con traslapes en las barras de error, especialmente entre T1 y T2. Esto visualiza de forma inmediata la inconsistencia en los valores y respalda la falta de homogeneidad estadística encontrada. Lo que sugiere que el tipo de ácido tiene mayor impacto que la concentración de NaOH, aunque no hay diferencias categóricas.

En la Tabla 4 se muestra que, para el parámetro grasas, la hidrólisis alcalina (0.000646), la extracción ácida (1.16e-03) y la interacción entre ambos factores (2.61e-09) presentaron diferencias significativas, esto sugiere que la interacción de ambos factores tiene un mejor rendimiento que los factores individuales.

El ANOVA fue válido para esta variable. Se identificó una diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos, siendo T3 nuevamente el más eficiente al presentar el menor contenido de grasa (1.37 %).

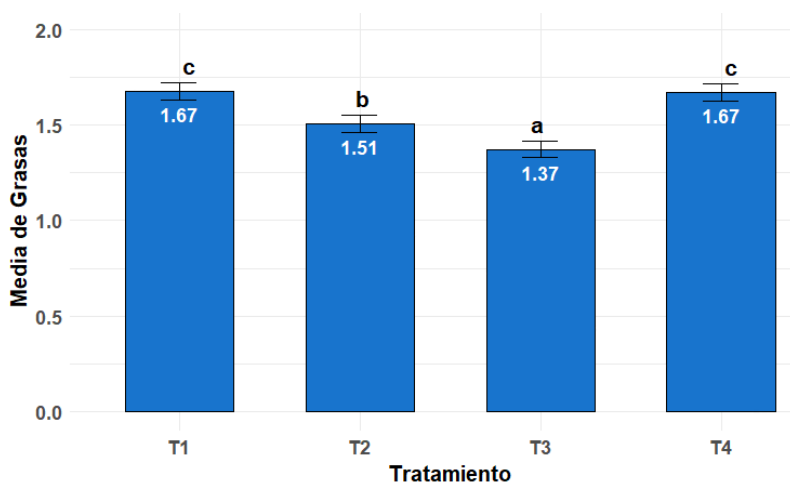
Tabla 4
Análisis ANOVA de grasa

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	0.0189	0.0189	20.86	0.000646
Extracción ácida	1	0.0163	0.0163	17.94	1.16e-03

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	0.2186	0.2186	241.17	2.61e-09
Residuos	12	0.0109			

La menor concentración de grasa observada en T3 sugiere que la combinación de NaOH 0.8 N y ácido acético favorece una desproteínización más profunda y una remoción más efectiva de lípidos adheridos a la matriz colagénica. Esto se debe a que los tratamientos alcalinos de mayor intensidad promueven la ruptura de interacciones hidrofóbicas y enlaces entre lípidos y proteínas no colagénicas, facilitando su eliminación durante el proceso de lavado. La literatura indica que concentraciones moderadas a altas de NaOH incrementan la eficiencia en la remoción de grasa y material no colagénico, optimizando la pureza del colágeno obtenido (Jafari et al., 2020; Susanti et al., 2024; Rajabimashhadi et al., 2023). Además, se ha reportado que etapas ácidas posteriores, como el uso de ácido acético, generan desestabilización adicional en las estructuras residuales asociadas a lípidos, contribuyendo a una matriz colagénica más limpia (Gaikwad y Kim, 2024).

Figura 4
Contenido (%) de grasas por tratamiento



En la Figura 4, gráfico de grasa evidencia una disminución progresiva desde T2 hasta T3, donde T3 muestra el valor más bajo con clara separación visual. Las barras de error son estrechas, lo que indica alta precisión experimental y poca variabilidad. El gráfico enfatiza la efectividad visualmente apreciable del ácido acético en combinación con NaOH 0.8 N para eliminar lípidos.

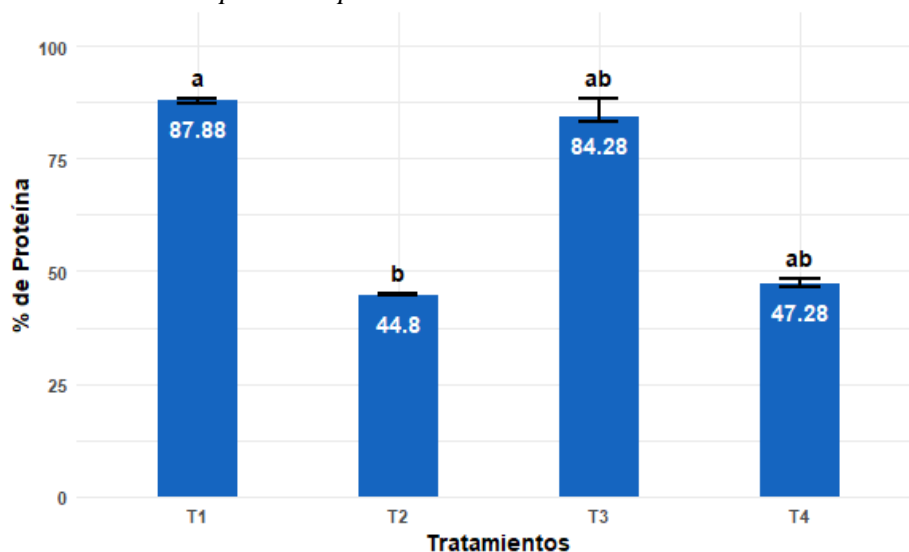
En la Tabla 5 se muestra que para el parámetro proteínas, la hidrólisis alcalina (0,770872), la extracción ácida (2,00e-16) y la interacción entre ambos factores (1,05e-03) presentaron diferencias significativas, esto sugiere que la extracción ácida tiene mayor efecto que la hidrólisis alcalina o la combinación de ambos.

Tabla 5
Análisis ANOVA de proteínas

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	0	0	0.089	0.770872
Extracción ácida	1	6512	6512	42221.3	2.00e-16
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	28	28	18.416	1.05e-03
Residuos	12	19	2		

En la Figura 5 se muestra que el T1 tiene mayor contenido de proteína (87.88%), mientras que T2 presentó los niveles más bajos. Esto indica una mayor eficiencia en la extracción de colágeno tipo I con el tratamiento T3. De acuerdo con Costa et al. (2022), la piel de tilapia constituye una fuente importante de colágeno tipo I, cuya extracción se ve favorecida en pH moderadamente ácido, lo que se logró al combinar NaOH 0.5N + ácido acético 5%. Esta combinación permitió la mayor liberación de proteínas estructurales sin degradación significativa del colágeno.

Figura 5
Contenido de proteínas por tratamiento



En la Figura 5 se observa que los tratamientos T1 y T3 alcanzaron valores mayores, con una caída abrupta en T2. La diferencia entre T3 y el resto de tratamientos es clara, aún sin valores numéricos. Esto visualmente sugiere una extracción más eficaz del colágeno en dicho tratamiento. El gráfico aporta evidencia visual de esta tendencia, aun cuando el ANOVA no haya sido estadísticamente válido.

Análisis fisicoquímicos del colágeno de piel de tilapia (Oreochromis niloticus)

A partir de los distintos tratamientos implementados en la investigación (Tabla 1), se realizaron análisis fisicoquímicos, con la finalidad de identificar qué tratamiento permite obtener un colágeno con propiedades óptimas en términos de composición y calidad.

En la tabla 6 se muestra que, con respecto al pH, la hidrólisis alcalina (0,0703), la extracción ácida (5,45e-05) y la interacción entre ambos factores (0,1333) presentaron diferencias significativas (Tabla 6), esto sugiere que la extracción ácida tiene mayor efecto que la hidrólisis alcalina o la combinación de ambos.

El análisis descriptivo mostró que los tratamientos con ácido cítrico presentaron un pH más bajo, reflejando mayor acidez residual en el producto final. Este efecto es común cuando se emplean ácidos orgánicos débiles sin suficiente neutralización posterior (Reyes, 2022).

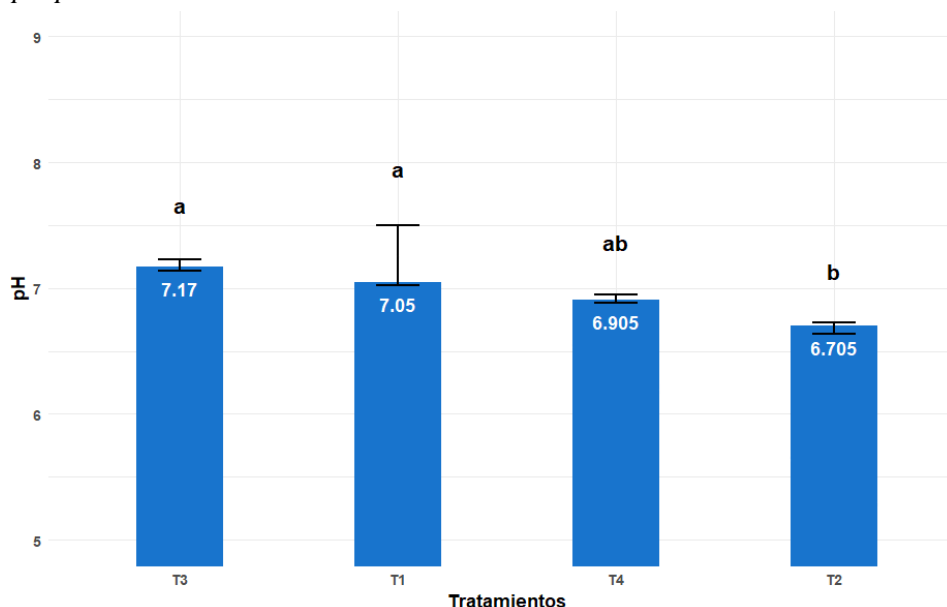
Tabla 6
Análisis ANOVA de pH

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	0.0564	0.0564	3.947	0.0703
Extracción ácida	1	0.5293	0.5293	37.038	5.45e-05
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	0.0371	0.0371	2.593	0.1333
Residuos	12	0.1715	0.0143		

El uso de ácido acético en los tratamientos T1 y T3 permitió mantener un pH más estable durante el proceso de extracción, debido a que su capacidad amortiguadora es menor que la del ácido cítrico. Esta característica es fundamental para la estabilidad del colágeno, dado que un pH excesivamente bajo puede desnaturalizar la integridad estructural de la triple hélice. Al respecto, Haque et al. (2026) et al. demostraron que el empleo de este ácido orgánico en subproductos de tilapia permite una extracción eficiente resguardando las propiedades funcionales de la proteína.

Diversos estudios han señalado que este ácido orgánico favorece la recuperación eficiente del colágeno de origen acuático, preservando la conformación de la triple hélice cuando el proceso se desarrolla bajo condiciones moderadamente ácidas. En contraste, valores extremos de pH pueden comprometer la integridad estructural de la proteína. En este sentido, Han et al. (2023) reportaron que el ácido acético permitió obtener colágeno soluble de piel de tilapia con adecuada conservación de sus propiedades estructurales, mientras que Costa et al. (2022) confirmaron que la extracción en medio ácido mantiene las características fisicoquímicas del colágeno tipo I, favoreciendo su estabilidad funcional.

Figura 6
pH por tratamiento



En la Figura 6, el gráfico de pH muestra que T2 tiene el valor más bajo, mientras que T3 y T1 se agrupan en valores más estables y cercanos. Visualmente, se observa una mayor dispersión en tratamientos con ácido cítrico. Este patrón gráfico indica que el ácido acético permitió una mayor estabilidad del pH, lo que se refleja en la calidad final del colágeno.

En la Tabla 7 se muestra que, con respecto a la acidez, la hidrólisis alcalina ($3,26e-08$), la extracción ácida ($2e-16$) y la interacción entre ambos factores ($1,84e-05$) presentaron diferencias significativas (Tabla 7), esto sugiere que la extracción ácida tiene mayor efecto que la hidrólisis alcalina o la combinación de ambos.

Tabla 7
Análisis ANOVA de acidez

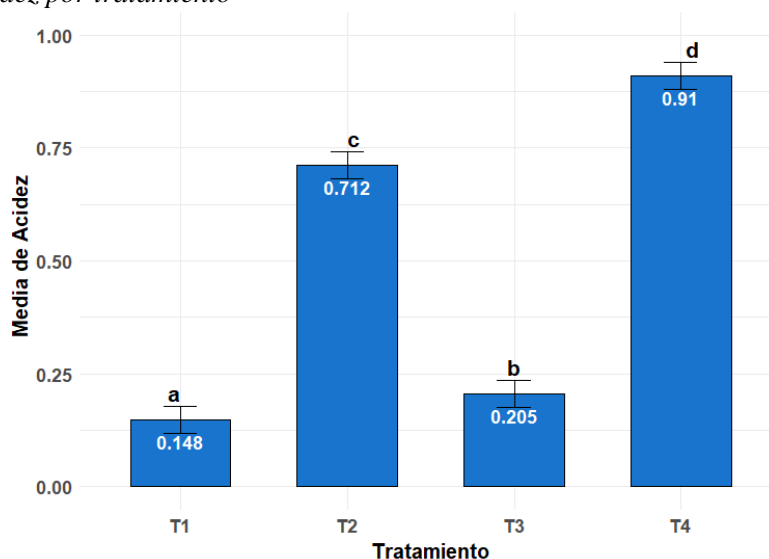
Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	0.0650	0.0650	154.51	$3.26e-08$
Extracción ácida	1	1.6129	1.6129	3832.63	$2e-16$
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	0.0196	0.0196	46.57	$1.84e-05$
Residuos	12	0.0051	0.004		

El tratamiento T4 (ácido cítrico) fue el más ácido, mientras que T1 presentó la menor acidez. Una acidez elevada puede dificultar ciertas aplicaciones del colágeno en matrices alimentarias o

cosméticas. Según Ashraf et al. (2020), los productos con menor acidez son más estables y versátiles. Por tanto, el tratamiento T1 no solo optimiza el rendimiento y la pureza, sino también mejora la calidad funcional del colágeno extraído.

En la Figura 7, el tratamiento T4 muestra el mayor contenido de acidez con respecto a los demás tratamientos, mientras que T1 muestra el valor más bajo. Las diferencias son claramente visibles, lo que refuerza el impacto del ácido cítrico en mantener una acidez residual mayor, y del ácido acético en minimizar.

Figura 7
Acidez por tratamiento



En la Tabla 8 se muestra que, con respecto a la capacidad de retención de agua, la hidrólisis alcalina ($1.45e-15$), la extracción ácida ($2e-16$) y la interacción entre ambos factores ($5,15e-13$) presentaron diferencias significativas, esto sugiere que la extracción ácida tiene mayor efecto que la hidrólisis alcalina o la combinación de ambos.

Tabla 8
Análisis ANOVA de Capacidad de Retención de Agua (CRA)

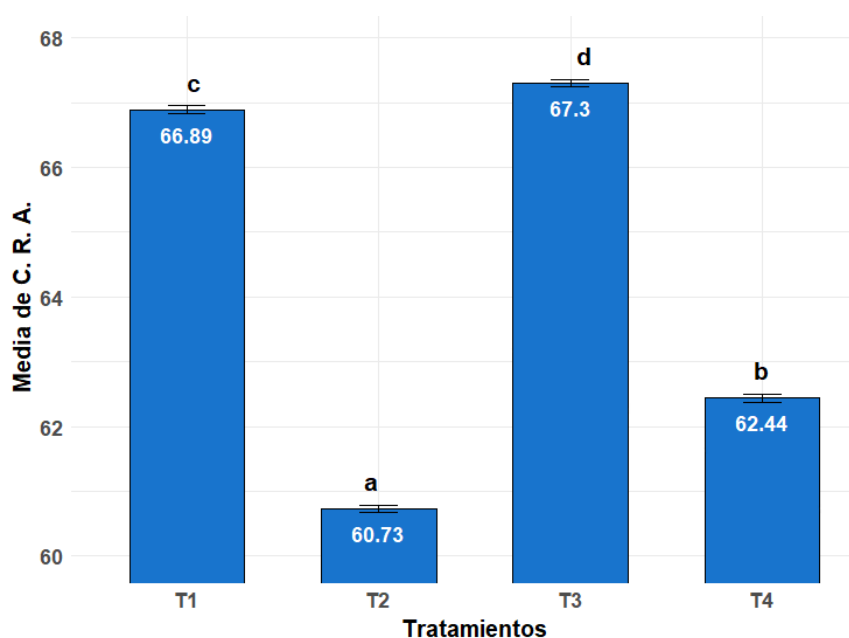
Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	4.49	4.49	2773	$1.45e-15$
Extracción ácida	1	121.55	121.55	74993	$2e-16$
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	1.68	1.68	1035	$5.15e-13$
Residuos	12	0.02	0.00		

El valor más alto de CRA en T3 sugiere que este tratamiento permitió conservar mejor la estructura tridimensional del colágeno, favoreciendo la retención de agua entre las fibras. La combinación de una base alcalina más concentrada y un ácido débil, como el acético, permite mantener la solubilidad de las proteínas colágenas y minimizar la desnaturalización térmica.

Estudios recientes señalan que los colágenos sometidos a tratamientos alcalinos con NaOH de alta concentración presentan una mayor exposición de grupos polares, lo que facilita su interacción con el agua y, por ende, incrementa su capacidad de hidratación. Por su parte, Haque et al. (2026) demostraron que la presencia de residuos de ácido acético durante la obtención de colágeno tipo I en subproductos de tilapia favorece la formación de estructuras más abiertas y con mayor capacidad de hinchamiento, debido a la alteración controlada de los enlaces interfibrilares. De manera complementaria, Han et al. (2023) reportaron que el empleo de ácido acético durante la extracción de colágeno de piel de tilapia contribuye a preservar la organización estructural de las fibrillas y mejora sus propiedades funcionales, promoviendo una mayor accesibilidad de los grupos polares en medio acuoso, lo que finalmente se traduce en una mayor retención de agua.

Figura 8

Capacidad de retención de agua por tratamiento



El tratamiento T3 (NaOH 0.8 N + ácido acético) presentó la mayor capacidad de retención de agua (Figura 8), con resultados consistentes y baja variabilidad entre réplicas. Esto indica que este tratamiento permitió conservar mejor la estructura del colágeno, facilitando su interacción con el agua. En contraste, los tratamientos con ácido cítrico presentaron valores más bajos y dispersos, lo que sugiere una menor estabilidad estructural. En general, se observa que el uso de ácido acético, especialmente combinado con una mayor concentración de NaOH, mejora significativamente la capacidad del colágeno para retener agua.

Tabla 9
Análisis ANOVA Capacidad Emulsificante

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	20.98	20.98	5594	<2e-16
Extracción ácida	1	65.77	65.77	17539	<2e-16
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	5.11	5.11	1362	1e-13
Residuos	12	0.04	0.00		

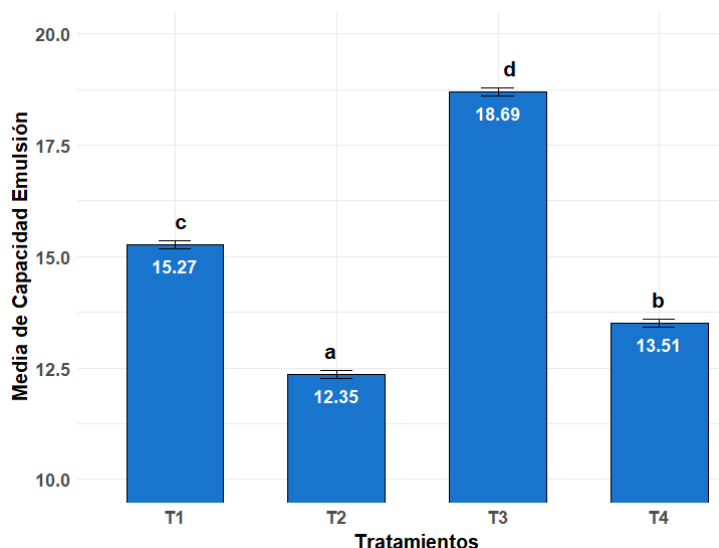
En la Tabla 9 se muestra que, con respecto a la capacidad emulsionante, la hidrólisis alcalina (<2e-16), la extracción ácida (<2e-16) y la interacción entre ambos factores (1e-13) presentaron diferencias significativas (tabla 9), lo que indica que la combinación de una mayor alcalinidad con ácido acético potencia la capacidad emulsificante del colágeno.

Los resultados muestran que T3 alcanzó el mayor valor de capacidad de emulsión (18.69 ml/g). Esta propiedad depende de la integridad de la proteína y su habilidad para ubicarse en la interfase aceite-agua.

De acuerdo con Haque et al. (2026), los colágenos extraídos con ácido acético presentan una mejor capacidad emulsificante, debido a que su tamaño molecular y carga superficial optimizan la distribución eficiente de las proteínas en la interfaz de las emulsiones. Asimismo, Yu et al. (2026) encontraron que los aislados de colágeno que poseen un menor contenido de lípidos residuales y una mayor pureza proteica tienden a formar sistemas emulsionantes significativamente más estables en el tiempo.

En T3, la eliminación efectiva de lípidos y la conservación de las cadenas polipeptídicas permitieron una mejor adsorción en la interfase, aumentando el volumen de emulsión estable. Esto se ve reforzado por el bajo contenido de grasa y la alta proteína reportada en este mismo tratamiento.

Figura 9
Capacidad emulsificante por tratamiento



El tratamiento T3 destacó por alcanzar la mayor capacidad emulsificante, con resultados visualmente superiores y con baja variación entre muestras (Figura 9). Los tratamientos que utilizaron ácido cítrico presentaron valores menores, lo que indica que este ácido podría afectar negativamente las propiedades funcionales del colágeno. El tipo de ácido y la concentración de NaOH influyeron notablemente: el ácido acético y una mayor alcalinidad potenciaron la capacidad del colágeno para formar emulsiones, lo cual es clave para su aplicación en productos alimenticios y cosméticos.

Análisis de rendimiento del colágeno de piel de tilapia (Oreochromis niloticus)

En cuanto al rendimiento de la extracción de colágeno para los distintos tratamientos, la hidrólisis alcalina ($3.62e-13$), la extracción ácida ($2.00e-16$) y la interacción entre ambos factores ($3.23e-10$) presentaron diferencias significativas (Tabla 10), esto sugiere que la extracción ácida tiene mayor efecto que la hidrólisis alcalina o la combinación de ambos.

Tabla 10
Análisis ANOVA del rendimiento

Variable	Df	Sum Sq	Media Sq	Valor F	Pr(>F)
Hidrólisis alcalina	1	10.34	10.34	1098.14	3.62e-13
Extracción ácida	1	120.67	120.67	12820.21	2.00e-16
Hidrólisis alcalina * Extracción ácida	1	0.010	0.010	1.062	3.23e-10
Residuos	12	0.11	0.01		

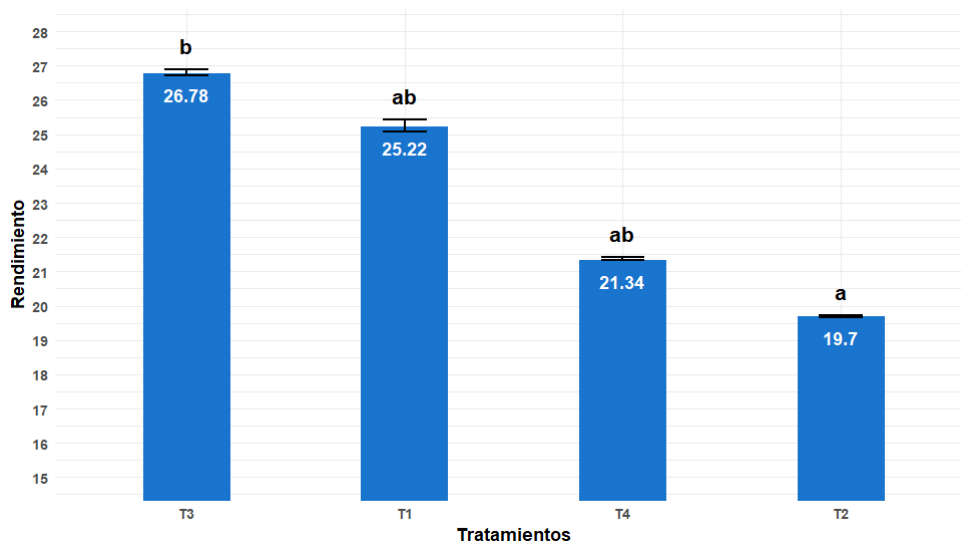
Dado que no se cumplieron los supuestos del ANOVA para el rendimiento, el análisis descriptivo mostró que T3 alcanzó el mayor rendimiento (26.80%). Este resultado es comparable con lo reportado por Almeida y Vieira (2025), quienes lograron rendimientos del 27.8 % en tilapia bajo condiciones similares.

La combinación de una concentración alcalina más fuerte y un ácido moderadamente eficiente como el acético favoreció una extracción más completa, coincidiendo con lo reportado por Han et al. (2023), quienes evidenciaron que el empleo de ácido acético y pretratamientos adecuados optimiza el rendimiento y la calidad del colágeno obtenido a partir de piel de tilapia.

En la Figura 10 se muestra a T3 con la barra más alta, lo cual visualiza claramente su superioridad en extracción de colágeno. La variabilidad entre tratamientos es notoria, y la distribución indica que el tratamiento combinado con NaOH 0.8 N + ácido acético es consistentemente superior, lo que complementa la discusión sin redundancia numérica.

Figura 10

Rendimiento (%) de la extracción de colágeno por tratamiento



Conclusiones

El tratamiento T3 (NaOH 0.8 N + ácido acético 5%) se posicionó como el más eficiente en términos de rendimiento, pureza proteica y propiedades funcionales del colágeno extraído. Este tratamiento logró un equilibrio favorable entre desproteinización, desmineralización y conservación estructural del colágeno tipo I.

La concentración alcalina y el tipo de ácido influyeron significativamente en los resultados. La mayor concentración de NaOH (0.8 N) mejoró la eliminación de componentes no colagénicos y aumentó la eficiencia del proceso, mientras que el ácido acético favoreció la estabilidad estructural y funcional del colágeno extraído.

El análisis bromatológico del colágeno extraído de la piel de tilapia reveló diferencias significativas entre los tratamientos, confirmando la influencia directa de las condiciones de extracción en la calidad. El Tratamiento T3 destacó al presentar el mayor contenido proteico (84.47%) y la menor cantidad de grasa (1.37%), reflejando así un proceso de extracción más selectivo y eficiente. Esta composición de alta pureza sugiere que el método T3 optimiza la remoción de componentes no colagénicos y lípidos, lo que consecuentemente mejora la calidad del producto final.

Desde el punto de vista físico-químico, el tratamiento con ácido acético permitió obtener colágenos con pH más controlado y menor acidez residual, condiciones deseables para su uso en aplicaciones alimenticias, cosméticas o biomédicas. En cambio, los tratamientos con ácido cítrico (T2 y T4) mostraron mayor acidez residual.

Las propiedades funcionales, como la capacidad de retención de agua (CRA) y la capacidad emulsificante (CE), fueron óptimas en el tratamiento T3, lo que demuestra que este proceso permite conservar mejor la estructura tridimensional del colágeno, facilitando su interacción con el agua y su comportamiento interfacial en emulsiones.

Los análisis gráficos reforzaron visualmente los hallazgos estadísticos y descriptivos, mostrando diferencias consistentes y patrones claros a favor de los tratamientos con ácido acético y mayor concentración alcalina. Estas representaciones facilitaron la interpretación de tendencias y confirmaron la superioridad técnica del tratamiento T3.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la aplicación de procesos combinados de hidrólisis alcalina fuerte (NaOH 0.8 N) con ácido acético suave para la obtención de colágeno de alta calidad a partir de residuos de tilapia, promoviendo así una alternativa sostenible y funcional con potencial para la industria alimentaria y cosmética.

Contribución de Autoría CRediT

En el presente estudio, la conceptualización fue llevada a cabo por Paola Delgado y Odalys Blondet quienes propusieron la idea del estudio y definieron los objetivos de la investigación. La metodología fue diseñada por Paola Delgado y Odalys Blondet, quienes tomaron como referencia varios autores como Ormaza y Santos, quien estructuró el proceso de recolección de datos, Paola Delgado y Odalys Blondet se encargaron de implementar los modelos de análisis. La implementación del software estuvo a cargo de Paola Delgado y Odalys Blondet, en conjunto con Diana Cedeño, quien es la tutora dentro de la elaboración del presente artículo, quienes desarrollaron los scripts necesarios para el análisis de datos y realizó pruebas de validación del código.

Paola Delgado y Odalys Blondet asumen la responsabilidad de la validación, asegurando la replicabilidad de los resultados mediante pruebas estadísticas. En cuanto al análisis formal, Paola Delgado y Odalys Blondet aplicaron modelos matemáticos y análisis estadísticos a los datos obtenidos. La investigación fue desarrollada por Paola Delgado y Odalys Blondet quienes realizaron el trabajo de campo y recopilaron las muestras biológicas. Paola Delgado y Odalys Blondet también fueron responsables de gestionar los recursos, asegurando el acceso a laboratorios y equipos necesarios para el estudio.

Paola Delgado y Odalys Blondet se encargaron del procesamiento de datos, organizando, limpiando y documentando la información recopilada para su análisis y futura reutilización. La redacción del borrador original del manuscrito fue realizada por Paola Delgado y Odalys Blondet, mientras que la revisión y edición del documento fue un esfuerzo conjunto entre Paola Delgado, Odalys Blondet y Diana Cedeño quienes revisaron y corrigieron el manuscrito antes de su envío.

En términos de liderazgo, Diana Carolina asumió la supervisión del estudio, proporcionando orientación a los demás autores, además de coordinar el proyecto a través de la administración del mismo. Finalmente, Paola Delgado y Odalys Blondet también fueron las responsables de la adquisición de fondos, gestionando los recursos financieros necesarios para la realización de la investigación.

Declaratoria de uso de inteligencia artificial

Se declara que dentro de este estudio no se utilizaron herramientas de Inteligencia Artificial.

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Disponibilidad de datos

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

Agradecimientos y financiamiento

Este estudio no recibió ninguna subvención específica de ninguna agencia de financiación del sector público, comercial o sin fines de lucro. Los autores declaran que no recibieron financiación externa para la realización de este trabajo.

Referencias

Almeida, M., y Vieira, H. (2025). Marine-Derived Collagen and Chitosan: Perspectives on Applications Using the Lens of UN SDGs and Blue Bioeconomy Strategies. *Marine Drugs*, 23(8), 318. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/md23080318>

- Ashraf, S., Adnan, M., Patel, M., Jamal, A., Sachidanandan, M., Snoussi, M., y Hadi, S. (2020). Bioactivos derivados del pescado como potentes nutraceuticos: explorando la perspectiva terapeutica de los alimentos sostenibles procedentes del mar. *Marine Drugs*, 18(5), 265. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/md18050265>
- CNA, C. N. (2023). Reporte de exportaciones a Estados Unidos. [https://doi.org/ https://www.cna-ecuador.com/estadisticas/](https://doi.org/https://www.cna-ecuador.com/estadisticas/)
- Costa, F. T., Oliveira, T. P., Droval, A. A., Marques, L. M., Fuchs, R. H., y A., C. F. (2022). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas del colágeno de la piel de tilapia del Nilo extraído en medio ácido. *Revista Brasileira de Biología*, 84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1519-6984.255440>
- Furtado, M., Chen, L., Chen, Z., y Cui, W. (2022). Desarrollo del colágeno de pescado en la regeneración de tejidos y la administración de fármacos. *Regeneración diseñada*, 3(3), 217-231. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.05.002>
- Gaikwad, S., y Kim, M. J. (2024). Extracción de colágeno de subproductos de pescado mediante diferentes métodos y su aplicación. *Marine Drugs*, 22(2), 60. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/md22020060>
- Galanakis, C. M. (2021). *Producción y procesamiento sostenible de pescado*. Elsevier. <https://doi.org/https://shop.elsevier.com/books/sustainable-fish-production-and-processing/galanakis/978-0-12-824296-4>
- Gallo, N., Natali, M. L., Quarta, A., Gaballo, A., Terzi, A., Sibillano, T., . . . Salvatore, L. (2022). Colágeno de piel de tilapia derivado de la acuaponía para el desarrollo de biomateriales. *Polymers*, 14(9), 1865. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym14091865>
- Guan, Y., Guo, Y., Lin, L., Zhang, L., CHen, W., y Zhao, C. (2026). Extracción ecológica de compuestos bioactivos de macroalgas marinas: química, actividades farmacológicas y aplicaciones biotecnológicas. *Marine Drugs*, 24(6), 198. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/md24060198>
- Gutiérrez Canul, C. D., Can Herrera, L. A., Ramírez Rivera, E. D., Prinyawiwatkul, W., Sauri Duch, E., Moo Huchin, V. M., y Hernández Núñez, E. (2025). Revisión de los enfoques clásicos y emergentes para la extracción y utilización del colágeno marino. *BioTech*, 14(2), 26. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/biotech14020026>
- Han, Y., Tian, H., Shi, L., Ren, Z., y Weng, W. (2023). Effects of Organic Acids on the Extraction and Properties of Acid-soluble Collagen From Tilapia Skin. *Science and Technology of Food Industry*, 44(22), 169-175. <https://doi.org/https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010156>
- Haque, S. A., Al Jufatlt, S. M., Islam, F., Mahmudul, H., M. M.-L., Mohammad, S. R., y Al-Habsi, N. (2026). Valorización sostenible de los subproductos del procesamiento de pescado mediante enfoques de biorrefinería integrados. *Discovery Food*, 160. <https://doi.org/https://link.springer.com/article/10.1007/s44187-026-00913-0>

- Hoyos, J., Villada, H., Fernández, A., y Ortega, R. (2022). Uso de subproductos de trucha (*oncorhynchus mykiss*) para la producción de alimeno extraído para peces. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(1), 1-11. <https://doi.org/https://rmiq.org/iqfvp/Numbers/V21/No1/Alim2726.pdf>
- Islam, J., Yap, E. E., Krongpong, L., Toppe, J., y Peñarubia, O. R. (2021). Fish waste management – An assessment of the potential production and utilization of fish silage in Bangladesh, Philippines and Thailand. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular No 1216*. Rome, Fao. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb3694en>
- Jafari, H., Lista, A., Siekapen, M. M., Ghaffari-Bohlouli, P., Nie, L., Alimoradi, H., y Shavandi, A. (2020). Fish collagen: Extraction, characterization and applications for biomaterials engineering. *Polymers*, 12(10), 2230. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym1>
- Kuwahara, J. (2021). Extraction of type i collagen from tilapia scales using acetic acid and ultrafine bubbles. *Processes*, 9(2), 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr9020288>
- Méndez, L. M. (2020). *Manual de prácticas de análisis de alimentos*. Universidad Veracruzana: Facultad de Química Farmacéutica Biológica. <https://doi.org/https://www.uv.mx/qfb/files/2020/09/Manual-Analisis-de-Alimentos-1.pdf>
- Mozumder, M. M., Uddin, M. M., Schneider, P., Raiyan, M. H., Trisha, M. G., Tahsin, T. H., y Newase, S. (2022). Utilización sostenible de los residuos pesqueros en Bangladesh: un estudio cualitativo para una iniciativa de bioeconomía circular. *Initiative Fishes*, 7(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fishes7020084>
- Muñoz, K. (2022). *Adicción de hongo agaricus bisporus como sustituto de la carne de cerdo en la calidad del chorizo ahumado tipo I (Tesis de grado, ESPAM MFL)*. https://doi.org/https://repositorio.esпам.edu.ec/bitstream/42000/1761/1/TIC_AI04D.pdf
- Navarro Hortal, M. D., y Battino, M. (2023). *Valorization of wastes/by-products in the design of functional foods/supplements*. Elsevier. <https://doi.org/https://shop.elsevier.com/books/valorization-of-wastes-by-products-in-the-design-of-functional-foods-supplements/guven/978-0-323-95567-6>
- Ormaza, S., y Santos, E. (2024). *Efecto del método de hidrólisis y temperatura de deshidratación en la calidad bromatológica, fisicoquímica y rendimiento de colágeno de patas de pollo (Tesis de grado, ESPAM MFL)*. <https://doi.org/http://repositorio.esпам.edu.ec/handle/42000/2334>
- Oswell, N. J., Gilstrap, O. P., y Pegg, R. B. (2021). Variación en la terminología y las metodologías aplicadas al análisis de la capacidad de retención de agua en la investigación de la carne. *Ciencia de la carne*. *PubLMed*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108510>
- Peñarubia, O., Toppe, J., Ahern, M., y Griffin, M. (2023). Cómo la agregación de valor mediante la utilización de subproductos del procesamiento de tilapia puede mejorar la nutrición humana y el sustento de las personas. *Reviews in Aquaculture*, 15(1), 318-333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/raq.12737>

- Rajabimashhadi, Z., Gallo, N., Salvatore, L., y Lionetto, F. (2023). Collagen Derived from Fish Industry Waste: Progresses and Challenges. *Polymers*, 15(3), 544. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym15030544>
- Ramakrishnan, S. R., Jeong, C. R., Park, J. W., Cho, S. S., y Kim, S. J. (2023). A review on the processing of functional proteins or peptides derived from fish by-products and their industrial applications. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14188>
- Reyes, D. (2022). *Determinación de la capacidad emulsificante de proteína extraída de la arveja (Pisum sativum L.) (Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana)*. <https://doi.org/https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23674>
- Song, W. K., Litu, D., Sun, L. L., Li, B. F., y Hou, H. (2020). Propiedades fisicoquímicas y de biocompatibilidad del colágeno tipo I de la piel de la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) para aplicaciones biomédicas. *Marine Drugs*, 17(3), 137. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/md17030137>
- Susanti, E., Maharani, S., y Ramadanti, S. G. (2024). Optimización del tiempo de pretratamiento con NaOH en la producción de colágeno a partir de escamas de pez lecha. En Actas de la 4ª Conferencia Internacional sobre el Desarrollo Halal (4ª ICHaD 2023). *Atlantts Press*, 162-172. [https://doi.org/ https://doi.org/10.2991/978-2-38476-261-3_15](https://doi.org/https://doi.org/10.2991/978-2-38476-261-3_15)
- Thirukumar, R., Vijay, A., Srinivasan, K., Paranthaman, R., Moses, J., y Anandharamakrishnan, C. (2022). Recuperación de recursos a partir de residuos pesqueros: perspectivas y uso de tecnologías de extracción intensificadas. *Quimosfera*, 299, 134361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134361>
- Yu, F., Yang, Z., Zhang, J., Zhao, L., y Wang, S. (2026). Valorization of aquatic processing by products: Extracttion, structural characteristics, and functional properties of skin collagen from industrial fish species. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2026.100491>