

Efecto de la enzima transglutaminasa microbiana (*Streptomyces mobaraensis*) en la reestructuración de fragmentos de atún (*Thunnus albacares*) cocido

Effect of microbial transglutaminase (*Streptomyces mobaraensis*) on the restructuring of cooked tuna (*Thunnus albacares*) fragments

Josselyn Nicole Miele Quiñónez, José Luis Coloma Hurel

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

Autor de correspondencia: josselyn.miele@pg.uleam.edu.ec

Recibido: 22/07/2025. Aceptado: 14/10/2025.
Publicado el 9 de enero de 2026.

Resumen

El proceso industrial de pescado, especialmente de atún, genera grandes volúmenes de subproductos como fragmentos de carne que, pese a su alto valor nutricional, presentan limitaciones tecnológicas para su aprovechamiento óptimo. Este estudio evaluó el uso de la enzima transglutaminasa microbiana como agente reestructurante para mejorar las propiedades funcionales de los fragmentos de atún cocido. Se analizó el efecto de diferentes concentraciones de transglutaminasa (0,5 % y 1,0 %) sobre las propiedades fisicoquímicas de fragmentos de atún reestructurado durante 7 días de almacenamiento refrigerado. El diseño experimental incluyó cuatro tratamientos (Control sin fragmentación, fragmentos sin enzima, y fragmentos tratados con 0,5 % y 1,0 % de TG). Los análisis incluyeron perfil de textura, estabilidad cromática y capacidad de retención de líquidos, presentándose resultados que demostraron mejoras sustanciales en múltiples propiedades funcionales. En términos de textura, la enzima incrementó significativamente la dureza, cohesividad y gomosidad, comparado con fragmentos no tratados. Paralelamente, la capacidad de retención de agua y aceite mostró incrementos progresivos con la concentración enzimática, alcanzando valores máximos con el tratamiento al 1,0 % ($88,87 \pm 0,01$ % para agua y $87,13 \pm 0,01$ % para aceite). Adicionalmente, la transglutaminasa mitigó las alteraciones cromáticas asociadas con la fragmentación del tejido muscular, preservando la estabilidad visual durante el almacenamiento. La concentración de 0,5 % se identificó como óptima desde el punto de vista funcional, mientras que concentraciones superiores ofrecieron beneficios marginales. Estos hallazgos establecen una base tecnológica para el desarrollo de productos reestructurados confirmando la efectividad de la transglutaminasa microbiana.

Palabras clave: enzimas alimentarias, aprovechamiento proteico, subproductos marinos, propiedades fisicoquímicas, sostenibilidad alimentaria.

Abstract

Industrial fish processing, especially tuna, generates large volumes of by-products such as meat fragments which, despite their high nutritional value, present technological limitations for optimal utilization. This study evaluated the use of microbial transglutaminase as a restructuring agent to improve the functional properties of the cooked tuna fragments. The effect of different enzyme concentrations (0.5 % and 1.0 %) on the physicochemical properties of restructured tuna fragments was analyzed over a 7-day period of refrigerated storage. The experimental design included four treatments (Control without fragmentation, fragments without enzyme, and fragments treated with 0.5 % and 1.0 % TG). Analyses included texture profile, instrumental color stability, and liquid retention capacity. The results demonstrated substantial improvements in multiple functional properties. In textural terms, the enzyme significantly increased hardness, cohesiveness, and gumminess compared to untreated fragments. Simultaneously, water and oil retention capacity showed progressive increases with enzyme concentration, reaching maximum values with the 1.0 % treatment (88.87 ± 0.01 % for water and 87.13 ± 0.01 % for oil). Additionally, transglutaminase reduced chromatic alterations associated with muscle tissue fragmentation, preserving visual stability during storage. The 0.5 % concentration was identified as the most optimal, providing significant improvements in all evaluated properties, while higher concentrations offered marginal benefits. These findings establish a solid technological basis for development of restructured products, confirming the effectiveness of microbial transglutaminase.

Keywords: food enzymes, protein utilization, marine by-products, physicochemical properties, food sustainability.

Introducción

El procesamiento industrial de pescado, especialmente del atún, genera considerables volúmenes de subproductos como fragmentos de carne que, si bien poseen un alto valor nutricional, son comúnmente subutilizados o destinados a productos de bajo valor agregado (Añorve *et al.*, 2019).

Esta problemática se intensifica cuando se considera que la fragmentación del tejido muscular compromete inherentemente las propiedades funcionales de las proteínas, limitando las opciones de procesamiento posterior y reduciendo significativamente el potencial de revalorización de estos materiales.

Tradicionalmente, los enfoques de aprovechamiento, como la elaboración de harinas proteicas o alimentos para acuicultura, si bien son útiles, no maximizan el valor intrínseco de estas proteínas estructurales (Arteaga *et al.*, 2022). Dentro de este contexto, la reestructuración proteica mediante el uso de enzimas se plantea como una alternativa prometedora para transformar estos subproductos fragmentados en productos con propiedades funcionales optimizadas (Valencia *et al.*, 2015).

Entre las alternativas tecnológicas más estudiadas en los últimos años se encuentra el uso de transglutaminasa microbiana (TG), la cual ha demostrado ser eficaz en la revalorización de productos reestructurados debido a su capacidad específica para catalizar la formación de enlaces covalentes γ -glutamil-lisina entre residuos de glutamina y lisina de las proteínas musculares, generando una matriz proteica más cohesiva y estable (Panuncio *et al.*, 2013; Rodríguez Castillejos *et al.*, 2013; Erdem *et al.*, 2020).

La aplicación de la enzima transglutaminasa en productos reestructurados ha sido ampliamente documentada en diversas matrices proteicas, mostrando resultados prometedores en la mejora de propiedades tecnológicas. Por ejemplo, Le *et al.* (2023) evaluaron el efecto de diferentes concentraciones de transglutaminasa (0,25 – 1,0 U/g de proteína) en pasta enriquecida con fibra, observando que la concentración óptima de 0,75 U/g de proteína redujo pérdidas por cocción en un 19 % y mejoró la resistencia de tracción y tasa de elongación en un 15 % y 49 %, respectivamente.

De manera similar, Kaić *et al.* (2021) reportaron que la adición de transglutaminasa (0,2 – 1,0 %) en carne de pollo reestructurada redujo significativamente las pérdidas por cocción en hasta un 15 % y disminuyó la fuerza de corte, mejorando considerablemente la textura del producto.

Adicionalmente, Ardiansyah *et al.* (2020) al trabajar con fragmentos de atún amarillo, determinaron que la concentración de 0,5 % de transglutaminasa en presencia de 1,5 % de sal produjo productos reestructurados con propiedades fisicoquímicas superiores y aceptabilidad sensorial comparable al atún comercial.

Por su parte, Pietrazik *et al.* (2007) demostraron que la transglutaminasa interactúa sinérgicamente con proteínas

no cárnicas como caseinato de sodio y plasma sanguíneo, mejorando significativamente las propiedades de retención de agua y firmeza de geles de cerdo, con incrementos hasta un 80 % en la fuerza del gel cuando se utilizó caseinato de sodio como sustrato.

Sin embargo, la aplicación específica de transglutaminasa en fragmentos de atún cocido, especialmente aquellos provenientes de procesamiento industriales tipo conserva, ha sido escasamente abordada en la literatura científica. A diferencia de los estudios existentes centrados principalmente en matrices crudas o parcialmente cocidas, no se dispone de información suficiente que describa cómo esta enzima actúa sobre subproductos sometidos a desnaturalización térmica avanzada, ni cómo esta interacción afecta simultáneamente las propiedades texturales, cromáticas y funcionales del producto final. Esta carencia representa un vacío de conocimiento significativo que limita el desarrollo de estrategias tecnológicas orientadas a la revalorización de este tipo de materia prima.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de transglutaminasa sobre las propiedades fisicoquímicas de fragmentos de atún cocido reestructurados, con especial énfasis en la caracterización del perfil de textura, estabilidad cromática y capacidad funcional durante el almacenamiento refrigerado, contribuyendo así al conocimiento sobre la revalorización de subproductos marinos y a la generación de nuevas alternativas tecnológicas para su aprovechamiento integral.

Materiales y métodos

Materia prima

Se emplearon fragmentos de carne de atún (*Thunnus albacares*) cocido, obtenidos como subproducto del procesamiento industrial de una pequeña empresa procesadora de conservas de atún en Manta (Ecuador). Los fragmentos correspondían al material excedente del proceso de envasado.

La materia prima había sido previamente cocida mediante tratamiento térmico en agua con sal con concentración del 2,5 % en peso de agua a temperaturas entre 80° – 85 °C durante 45 – 50 minutos, siguiendo los procedimientos estándar de la empresa antes de la adición del líquido de gobierno (Del Mar, 2021). Este procesamiento térmico garantizó la inocuidad microbiológica y desnaturalización parcial de las proteínas musculares, características deseables para este estudio.

Los fragmentos iniciales presentaron dimensiones de 2 – 4 cm de grosor y 6 – 8 cm de largo aproximadamente, con consistencia firme y estructura muscular característica del atún procesado térmicamente. Una porción de estos fragmentos se reservó intacta para utilizarse como muestra control (T0), mientras que el resto fue desmenuzado mecánicamente para obtener fragmentos de menor tamaño destinados a los tratamientos de reestructuración (T1, T2 y T3).

La selección de este tipo de materia prima se fundamentó en su disponibilidad, homogeneidad de procesamiento y representatividad como modelo de subproducto industrial con potencial de revalorización. Las muestras fueron transportadas en condiciones refrigeradas y almacenadas a 4 ± 1 °C hasta su procesamiento dentro de un máximo de 24 horas posteriores a su obtención.

Insumos y reactivos

La enzima utilizada fue transglutaminasa microbiana obtenida de *Streptomyces mobaraensis* bajo la marca Activa RM (Ajinomoto Food Ingredients), un preparado comercial compuesto por la enzima, caseinato de sodio y maltodextrina como estabilizantes, con actividad enzimática de 100 U/g.

Para la disolución de la enzima se empleó agua destilada a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) siguiendo las recomendaciones del proveedor.

Diseño experimental

Se implementó un diseño completamente aleatorizado con estructura factorial mixta 4x2, donde los factores principales fueron la concentración de transglutaminasa y el tiempo de almacenamiento. Para ello, se establecieron cuatro tratamientos: un control (T0) constituido por fragmentos de atún cocido en su forma original sin proceso de desmenuzamiento ni reestructurado, así como tres tratamientos experimentales con fragmentos desmenuzados: sin transglutaminasa (T1), con 0,5 % de transglutaminasa (T2) y con 1,0 % de transglutaminasa (T3). Cabe señalar que las concentraciones enzimáticas se calcularon con base al peso total de la muestra.

Subsecuentemente, cada tratamiento fue analizado en dos tiempos distintos (día 1 y día 7 post-elaboración) con tres repeticiones por combinación, resultando en un total de 24 unidades experimentales.

Análisis estadístico

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software InfoStat versión 2020.

Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza ANOVA con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$, mientras que las comparaciones múltiples entre medias de tratamientos se realizaron mediante la prueba de Tukey. Por otra parte, los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$) y las diferencias estadísticamente significativas se identificaron mediante letras superíndices, donde medias con letras diferentes indicaron diferencias significativas ($p < 0,05$).

Preparación de las muestras

Los fragmentos intactos de atún (2 – 4 cm de grosor x 6 – 8 cm de largo) se cortaron en porciones de 100 g, se envolvieron individualmente en película de plástico de grado alimentario y se almacenaron a 4 ± 1 °C sin ningún tratamiento adicional.

Para cada tratamiento experimental se prepararon lotes de 600 g de fragmentos de atún, que fueron previamente

desmenuzados manualmente hasta obtener fragmentos de aproximadamente de 0,5 – 1,0 cm de grosor y 1,0 – 1,5 cm de largo. El material desmenuzado se dividió en dos sublotes de 300 g correspondientes a los días de evaluación (día 1 y día 7).

La enzima transglutaminasa fue previamente diluida en agua destilada a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) en una proporción de 1:4 p/v, conforme con las recomendaciones del fabricante. La solución enzimática se preparó inmediatamente antes de su uso para mantener la actividad catalítica óptima.

La incorporación de la solución enzimática se realizó siguiendo el procedimiento adaptado de Panuncio *et al.* (2013) con modificaciones propias para optimizar la distribución en fragmentos de atún mediante aspersión uniforme sobre el material desmenuzado, seguida de homogenización manual durante 5 minutos hasta obtener una distribución homogénea de la enzima. Las concentraciones aplicadas fueron 0 % (T1), 0,5 % (T2) y 1,0 % (T3) con base al peso total de la muestra. La selección de estos niveles se fundamentó en estudios previos que han demostrado que concentraciones en rangos de 0,2 % a 1,0 % son eficaces para inducir la formación de enlaces covalentes sin comprometer las características sensoriales ni generar efectos indeseables en la textura (Kaić *et al.*, 2021 y Ardiansyah *et al.*, 2020).

Posteriormente, se pesaron porciones de 100 g de mezcla por réplica. Cada porción fue moldeada utilizando film plástico alimentario, aplicando compresión manual uniforme para eliminar bolsas de aire y asegurar contacto íntimo entre las partículas. Las muestras moldeadas fueron rotuladas según el tratamiento y día de evaluación correspondiente.

Por último, las muestras fueron almacenadas en refrigeración (4 ± 1 °C) durante 12 horas para favorecer la actividad enzimática y la formación de enlaces covalentes. Transcurrido este período de activación, una parte de las muestras fue analizada en el día 1, mientras que el resto se mantuvo bajo refrigeración hasta su evaluación en el día 7.

Perfil de textura

Se empleó el método de Análisis de Perfil de Textura (TPA) estandarizado por Bourne (2002) adaptado específicamente para productos pesqueros de acuerdo con la metodología de Ardiansyah *et al.* (2020), a fin de garantizar la reproducibilidad en los parámetros evaluados.

El equipo texturómetro Shimadzu EZ-LX se configuró con los siguientes parámetros operacionales: velocidad de compresión de 10 mm/s, con sonda cilíndrica de compresión. Las muestras fueron sometidas a dos ciclos de compresión consecutiva hasta el 50 % de deformación de su altura original con un tiempo de relajación entre ciclos.

Se registraron los parámetros de dureza (N), cohesividad (adimensional), gomosidad (N), elasticidad (mm) y masticabilidad (N×mm) utilizando el software Mastication. xml del equipo. Las muestras fueron equilibradas a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) durante 30 minutos antes del análisis para garantizar condiciones uniformes de medición.

Color instrumental

La evaluación de color se realizó con un colorímetro Konica Minolta CR-400 calibrado con placa de calibración blanca estándar y configurado con iluminante estándar D65 a un ángulo de observación de 10°. Las mediciones se realizaron con un ángulo de observación perpendicular a la superficie de la muestra.

Previo al análisis, las muestras fueron sometidas a un corte transversal uniforme para exponer una superficie fresca y homogénea. Se registraron los parámetros L* (luminosidad), a* (coordenadas rojo-verde) y b* (coordenadas amarillo-azul) del sistema CIE Lab* (Valdés *et al.*, 2023). Las lecturas se realizaron en tres puntos diferentes de la superficie expuesta de cada réplica, tanto en el día 1 como en el día 7.

La diferencia total de color (ΔE) se calculó utilizando la Ecuación 1, donde el tratamiento control (T0) se utilizó como referencia para las comparaciones.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

Donde:

ΔL^* : Diferencia en luminosidad entre la muestra y el control.

Δa^* : Diferencia en la coordenada a* entre la muestra y el control

Δb^* : Diferencia en la coordenada b* entre la muestra y el control

Capacidad de retención de agua

Se utilizó el método descrito por Barbut (2024) con ligeras modificaciones. Se pesaron porciones de $5,0 \pm 0,1$ g por réplica y se sumergieron en 10 ml de agua destilada durante 10 minutos a temperatura ambiente (20 ± 2 °C) para alcanzar el equilibrio de absorción.

Posteriormente, las muestras fueron escurridas superficialmente con papel absorbente durante 15 segundos, colocadas en tubos Falcon de 15 ml y refrigeradas a 4 ± 1 °C durante 5 minutos. La centrifugación se llevó a cabo con una centrifuga Sigma 2-16P a 3000 rpm (1389xg) durante 12 minutos. La temperatura inicial de las muestras fue de 4 °C, aumentando ligeramente durante el proceso de centrifugación debido a la naturaleza no refrigerada del equipo. Finalmente, se retiró el remanente de líquido del tubo, se pesó el pellet y se calculó la retención de agua mediante la Ecuación 2:

$$\text{Retención de Agua (\%)} = \left(\frac{P_{\text{pellet}}}{P_{\text{inicial}}} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde:

Ppellet: Peso del pellet después de la centrifugación (g)

Pinicial: Peso inicial de la muestra (g)

Capacidad de retención de aceite

Se siguió el mismo procedimiento descrito para el análisis de retención de agua, reemplazando el medio de inmersión por 10 ml de aceite vegetal comestible (girasol, densidad 0,92 g/ml a 20 °C). Tras la centrifugación bajo las mismas condiciones, se escurrió el remanente de aceite para posteriormente pesar el pellet y calcular la retención de aceite mediante la Ecuación 3:

$$\text{Retención de Aceite (\%)} = \left(\frac{P_{\text{pellet}}}{P_{\text{inicial}}} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

Ppellet: Peso del pellet después de la centrifugación (g)

Pinicial: Peso inicial de la muestra (g)

Resultados

Análisis de perfil de textura

En primer lugar, es importante señalar que el tratamiento T0 corresponde a la materia prima original sin desmenuzar, mientras que T1 hace referencia a la materia prima desmenuzada sin adición de la enzima; por tanto, ambos tratamientos se consideraron como grupos de referencia frente a los tratamientos con transglutaminasa. Con base en ello, la incorporación de transglutaminasa microbiana indujo modificaciones sustanciales en las propiedades mecánicas de los fragmentos de atún reestructurado (Tabla 1).

En términos de dureza, los tratamientos T2 y T3 exhibieron incrementos notables durante el primer día de evaluación, alcanzando valores de $54,15 \pm 2,88$ N y $55,14 \pm 2,87$ N respectivamente, contrastando marcadamente con el tratamiento T1 que registró apenas $26,24 \pm 7,05$ N, denotando una clara diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0,05$).

Esta tendencia se intensificó progresivamente durante el almacenamiento, donde la actividad enzimática residual se manifestó en un fortalecimiento adicional de la matriz proteica, destacando diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$). Particularmente, el comportamiento del tratamiento T3 fue notable, el cual alcanzó $69,43 \pm 4,48$ N en el día 7, evidenciando una actividad enzimática sostenida en la formación de enlaces covalentes entre las proteínas.

En cuanto a la cohesividad, el primer día de evaluación mostró un patrón concordante con la dureza, donde los tratamientos con transglutaminasa (T2 y T3) presentaron valores significativamente superiores ($0,46 \pm 0,02$ y $0,49 \pm 0,02$ respectivamente, $p < 0,05$) comparados con el control ($0,24 \pm 0,04$) y T1 ($0,28 \pm 0,06$). Sin embargo, estas diferencias se atenuaron en el día 7, donde no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$), sugiriendo procesos de reorganización estructural de la red proteica durante la refrigeración.

Tabla 1. Perfil de textura de fragmentos de atún reestructurados con transglutaminasa microbiana durante el almacenamiento

Almacenamiento	Parámetro	Tratamientos			
		T0	T1	T2	T3
Día 1	Dureza (N)	35,15 ± 12,60 ^{ab}	26,24 ± 7,05 ^a	54,15 ± 2,88 ^{bc}	55,14 ± 2,87 ^c
	Cohesión	0,24 ± 0,04 ^a	0,28 ± 0,06 ^a	0,46 ± 0,02 ^b	0,49 ± 0,02 ^b
	Gomosidad (N)	8,80 ± 4,25 ^a	7,50 ± 3,52 ^a	24,78 ± 2,39 ^b	27,17 ± 0,60 ^b
	Elasticidad (mm)	0,96 ± 0,06 ^b	0,80 ± 0,07 ^a	0,71 ± 0,03 ^a	0,71 ± 0,02 ^a
	Masticabilidad (N×mm)	6,63 ± 5,02 ^a	6,14 ± 3,38 ^a	17,59 ± 2,40 ^a	19,25 ± 0,84 ^a
Día 7	Dureza (N)	46,69 ± 3,30 ^b	23,41 ± 5,02 ^a	58,16 ± 5,31 ^{bc}	69,43 ± 4,48 ^c
	Cohesión	0,38 ± 0,04 ^a	0,31 ± 0,09 ^a	0,40 ± 0,09 ^a	0,47 ± 0,02 ^a
	Gomosidad (N)	17,42 ± 3,13 ^{ab}	7,59 ± 3,40 ^a	23,61 ± 7,34 ^{bc}	32,41 ± 3,16 ^c
	Elasticidad (mm)	0,56 ± 0,03 ^a	0,57 ± 0,01 ^a	0,67 ± 0,14 ^a	0,65 ± 0,14 ^a
	Masticabilidad (N×mm)	9,82 ± 2,19 ^{ab}	4,33 ± 2,01 ^a	15,21 ± 3,54 ^{bc}	21,19 ± 6,08 ^c

Nota. Valores expresados como media ± desviación estándar (n = 3). Medias con letras diferentes dentro de la misma fila son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T0 = control; T1 = sin enzima; T2 = 0,5 % TG ; T3 = 1 % TG.

Siguiendo la misma línea de comportamiento, los parámetros de gomosidad y masticabilidad reflejaron las tendencias observadas en la dureza.

Durante la evaluación inicial, T2 y T3 manifestaron valores de gomosidad significativamente superiores ($24,78 \pm 2,39$ y $27,17 \pm 0,60$ N; $p < 0,05$) en comparación con T0 ($8,80 \pm 4,35$ N) y T1 ($7,50 \pm 3,52$ N). Al cabo de una semana de almacenamiento, T3 registró los valores máximos de gomosidad ($32,41 \pm 3,16$ N) y masticabilidad ($21,19 \pm 6,08$ N×mm), confirmando el fortalecimiento progresivo de la matriz proteica reestructurada.

En contraste con estos parámetros de resistencia, la elasticidad exhibió un comportamiento inverso; mientras el control T0 mantuvo la mayor capacidad de deformación elástica ($0,96 \pm 0,06$ mm), los tratamientos con enzima presentaron valores significativamente menores e idénticos ($0,71 \pm 0,03$ mm para T2 y $0,71 \pm 0,02$ para T3; $p < 0,05$), confirmando el efecto homogéneo de la transglutaminasa en la elasticidad independientemente de la concentración aplicada dentro del rango estudiado.

Este comportamiento aparentemente contradictorio refleja la naturaleza específica de los enlaces covalentes formados por la transglutaminasa que, si bien confieren mayor resistencia mecánica, simultáneamente reducen la capacidad de recuperación elástica del gel proteico como ha sido ampliamente documentado por Kuraishi *et al.* (2001) y más recientemente confirmado por Benjakul *et al.* (2007) y Kaić *et al.* (2021) en diversas matrices proteicas; sin embargo, es importante mencionar que después de 7 días de almacenamiento, no se registraron diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$).

Análisis de color instrumental

El análisis instrumental de color proporcionó información importante sobre el impacto visual de los tratamientos enzimáticos (Tabla 2). En términos de luminosidad (L^*), los resultados demostraron una notable estabilidad entre todos los tratamientos evaluados, con valores oscilando entre 59,03 y 61,95 unidades, indicando que la transglutaminasa no influye en el brillo del producto final.

No obstante, un análisis más detallado de las coordenadas cromáticas reveló matices relevantes. Las coordenadas a^* mostraron una reducción sistemática en los tratamientos con enzima, donde el control mantuvo valores de $9,68 \pm 1,25$ unidades en el día 1, mientras que T1, T2 y T3 registraron valores considerablemente menores (entre 6,41 y 7,17 unidades). Esta tendencia se acentuó durante el almacenamiento, particularmente en T1 que experimentó una disminución pronunciada hasta $3,28 \pm 0,53$ unidades en el día 7, sugiriendo que la fragmentación del tejido muscular sin entrecruzamiento enzimático puede acelerar las alteraciones en los pigmentos.

Paralelamente, las coordenadas b^* evidenciaron un desplazamiento hacia tonalidades más amarillas en todos los tratamientos con transglutaminasa, con valores superiores a 14,80 unidades comparados con las $12,21 \pm 1,57$ unidades del control en el día 1. Notablemente, este cambio se mantuvo estable durante todo el periodo de almacenamiento, sugiriendo modificaciones permanentes relacionados con las interacciones específicas entre la enzima y las proteínas musculares.

Para cuantificar objetivamente estas observaciones, el análisis de la diferencia total de color mediante el cálculo del ΔE proporcionó una evaluación integral de los cambios

cromáticos (Valdés *et al.*, 2023). En la evaluación inicial, T1 presentó el mayor valor de ΔE ($5,38 \pm 1,05$), seguido por T3 ($4,43 \pm 0,51$) y T2 ($4,11 \pm 0,57$), clasificados como cambios “perceptibles” (ΔE entre 3,0 – 6,0).

El seguimiento temporal reveló un comportamiento diferencial relevante: mientras T1 incrementó sustancialmente hasta $8,07 \pm 0,56$ unidades en el día 7, alcanzando diferencias “muy evidentes” ($\Delta E = 6,0 - 12,0$), los tratamientos con transglutaminasas se mantuvieron relativamente estables ($3,94 \pm 0,46$ para T2 y $4,40 \pm 1,09$ para T3). De igual manera, el análisis estadístico reveló diferencias significativas entre los tratamientos sin enzima (T1) y aquellos con transglutaminasa (T2 y T3); mientras que entre T2 y T3 no se registraron diferencias estadísticamente significativas al cabo de una semana.

Este comportamiento confirma que la transglutaminasa mitiga las alteraciones cromáticas asociadas con la

fragmentación del tejido muscular, siendo T2 la concentración que mejor demostró preservar el color original.

Capacidad de retención de agua y aceite

Complementando los análisis anteriores, la evaluación de la capacidad funcional demostró mejoras progresivas directamente proporcional a la concentración de transglutaminasa aplicada (Tabla 3). Los tratamientos enzimáticos (T2 y T3) demostraron rendimientos significativamente superiores en comparación con el tratamiento sin enzima (T1), manteniéndose este orden de manera consistente durante ambos períodos de evaluación.

Esta mejora puede atribuirse directamente a la formación de una red tridimensional más eficiente mediante enlaces covalentes que crean espacios intermedios más efectivos para la inmovilización de moléculas tanto hidrofílicas como lipofílicas.

Tabla 2. Parámetro de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) de fragmentos de atún reestructurados con transglutaminasa durante el almacenamiento

Almacenamiento	Parámetro	Tratamientos			
		T0	T1	T2	T3
Día 1	L^*	$59,44 \pm 4,04^a$	$61,95 \pm 2,68^a$	$60,98 \pm 1,26^a$	$60,91 \pm 1,28^a$
	a^*	$9,68 \pm 1,25^b$	$6,41 \pm 0,75^a$	$7,17 \pm 0,08^a$	$6,94 \pm 0,40^a$
	b^*	$12,21 \pm 1,57^a$	$14,81 \pm 1,10^b$	$14,92 \pm 0,17^b$	$15,18 \pm 0,34^b$
	ΔE		$5,38 \pm 1,06^a$	$4,11 \pm 0,57^a$	$4,43 \pm 0,51^a$
Día 7	L^*	$59,91 \pm 1,52^a$	$59,03 \pm 3,49^a$	$61,06 \pm 0,66^a$	$61,64 \pm 0,92^a$
	a^*	$9,96 \pm 0,17^c$	$3,28 \pm 0,53^a$	$7,41 \pm 0,14^b$	$7,04 \pm 0,63^b$
	b^*	$12,27 \pm 0,45^a$	$15,64 \pm 0,63^b$	$14,98 \pm 0,49^b$	$14,97 \pm 0,80^b$
	ΔE		$8,07 \pm 0,55^b$	$3,94 \pm 0,46^a$	$4,40 \pm 1,09^a$

Nota. Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Medias con letras diferentes dentro de la misma fila son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T0 = control; T1 = sin enzima; T2 = 0,5 % TG ; T3 = 1 % TG.

Tabla 3. Retención de agua y aceite de fragmentos de atún reestructurados con transglutaminasa durante el almacenamiento

Almacenamiento	Parámetro	Tratamientos			
		T0	T1	T2	T3
Día 1	Agua (%)	$87,20 \pm 0,01^{bc}$	$76,40 \pm 0,02^a$	$84,80 \pm 0,01^b$	$88,87 \pm 0,01^c$
	Aceite (%)	$84,93 \pm 0,004^b$	$72,40 \pm 0,01^a$	$85,67 \pm 0,003^{bc}$	$87,13 \pm 0,01^c$
Día 7	Agua (%)	$86,93 \pm 0,01^{bc}$	$76,27 \pm 0,02^a$	$84,80 \pm 0,01^b$	$88,40 \pm 0,01^c$
	Aceite (%)	$85,33 \pm 0,01^b$	$73,47 \pm 0,01^a$	$85,27 \pm 0,01^b$	$87,07 \pm 0,003^c$

Nota. Valores expresados como media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Medias con letras diferentes dentro de la misma fila son significativamente diferentes ($p < 0,05$). T0 = control; T1 = sin enzima; T2 = 0,5 % TG ; T3 = 1 % TG.

Discusión

Los hallazgos de este estudio confirman el potencial transformador de la enzima transglutaminasa microbiana como agente reestructurante para fragmentos de atún cocido, estableciendo una base sólida para la revalorización tecnológica de subproductos de la industria atunera. La coherencia entre los resultados del presente estudio e investigaciones previas realizadas en diferentes matrices proteicas marinas valida la aplicabilidad de esta tecnología enzimática, mientras que las mejoras específicas observadas en propiedades texturales y funcional abren perspectivas prometedoras para aplicaciones industriales inmediatas.

Aunado a ello, esta contribución particular radica en haber demostrado la efectividad de la transglutaminasa en fragmentos de atún cocidos provenientes del proceso industrial, un material con características fisicoquímicas particulares debido a la desnaturalización proteica parcial experimentada durante el tratamiento térmico previo. A diferencia de estudios anteriores que se enfocan principalmente en materia prima cruda o precocida, el presente trabajo aporta información sobre la valorización de subproductos provenientes de la industria de conservas, lo que incrementa significativamente su relevancia práctica y potencial industrial.

Análisis de perfil de textura

El incremento progresivo en la dureza observada con las concentraciones crecientes de transglutaminasa refleja directamente la eficiencia del mecanismo catalítico específico de esta enzima, la cual facilita la formación de enlaces covalentes γ -glutamil-lisina entre residuos de glutamina y lisina de las proteínas miofibrilares (Aguilar-Zárete *et al.*, 2012; Kolotylo *et al.*, 2023; Vasić *et al.*, 2023).

Los valores de dureza obtenidos en este estudio ($54,15 \pm 2,88$ N para T2 y $55,14 \pm 2,87$ N para T3 en día 1) son consistentes con los reportados por Ardiansyah *et al.* (2020) en atún amarillo reestructurado, quienes documentaron incrementos similares en la firmeza del producto final utilizando concentraciones enzimáticas comparables, pasando de 26,4 N (Control) a 54,2 N (Tratamiento con 0,5 % de transglutaminasa).

De manera similar, los hallazgos de Kaić *et al.* (2021) en pollo reestructurado confirman el efecto fortalecedor de la enzima al aplicar transglutaminasa en concentraciones de 0,2 – 1,0 % en diferentes matrices proteicas, con incrementos de dureza de 65,5 N con 0,2 % de transglutaminasa y hasta 78,5 N con 1,0 % de transglutaminasa en comparación con sus muestras control (37,4 N).

En contraste, Pietrasik *et al.* (2007) documentaron incrementos superiores en la fuerza del gel en productos cárnicos (de 45,6 N a 82,0 N), diferencias que pueden atribuirse a variaciones en la matriz proteica y la presencia de proteínas adicionales como caseinato de sodio en sus formulaciones.

En cuanto a la cohesividad, esta experimentó mejoras sustanciales con la aplicación de transglutaminasa, donde los tratamientos T2 y T3 alcanzaron valores de $0,46 \pm 0,02$ y $0,49 \pm 0,02$ respectivamente en el día 1, contrastando significativamente con los valores de T0 ($0,24 \pm 0,04$) y T1 ($0,28 \pm 0,06$).

Estos resultados confirman la capacidad de la enzima para mejorar la cohesión interna de la matriz proteica, hallazgo consistente con las observaciones de Erdem *et al.* (2020) en albóndigas de carne, quienes reportaron incrementos de 0,32 a 0,45 – 0,50 con concentraciones de transglutaminasa entre 0,5 – 1,5 %, demostrando un efecto similar en matrices cárnicas distintas. No obstante, la normalización de los valores de cohesividad al día 7, donde no se observaron diferencias significativas entre tratamientos, sugiere procesos de reorganización estructural durante el almacenamiento que homogenizan las propiedades de cohesión de la red proteica (Erdem *et al.*, 2020).

Paralelamente, los parámetros de gomosidad y masticabilidad reflejaron las tendencias observadas en dureza y cohesividad. La gomosidad mostró incrementos significativos, evolucionando desde $7,50 \pm 3,52$ N en T1 hasta $27,17 \pm 0,60$ N en T3 durante el día 1; esta mejora se intensificó durante el almacenamiento, alcanzando valores máximos de $32,41 \pm 3,16$ N en T3 al día 7. Estos valores son comparables con los reportados por Le *et al.* (2023) en pasta enriquecida con fibra tratada con transglutaminasa, donde también se observaron mejoras significativas en las propiedades de resistencia mecánica.

De manera similar, la masticabilidad siguió un patrón progresivo, culminando en $21,19 \pm 6,08$ N×mm para T3 al día 7. Este comportamiento confirma el fortalecimiento continuo de la matriz proteica reestructurada mediante la actividad enzimática residual (Setiadi *et al.*, 2018).

Por el contrario, la elasticidad exhibió un comportamiento inverso. Mientras el control T0 mantuvo la mayor capacidad de deformación elástica ($0,96 \pm 0,06$ mm), los tratamientos con enzima presentaron valores significativamente menores ($0,71 \pm 0,03$ mm para T2 y $0,71 \pm 0,02$ para T3). Esta reducción simultánea en la elasticidad observada en los tratamientos enzimáticos representa un comportamiento inherente en el entrecruzamiento proteico, donde la formación de enlaces covalentes irreversible reduce la capacidad de deformación elástica del gel (Kaić *et al.*, 2021).

Sin embargo, este comportamiento, lejos de constituir un limitante, refleja la naturaleza irreversible de los enlaces γ -glutamil-lisina, los cuales priorizan la resistencia mecánica sobre la deformación elástica (Benjakul *et al.*, 2007).

Finalmente, la cinética temporal observada durante el almacenamiento refrigerado reveló patrones diferenciados entre los parámetros texturales. Mientras que la dureza y gomosidad mostraron tendencias de incremento progresivo, particularmente evidentes en T3, la elasticidad experimentó

una homogenización gradual entre los tratamientos hacia el día 7. Este fenómeno sugiere que la transglutaminasa no solo actúa como agente reestructurante, sino que establece un proceso de consolidación progresiva que maximiza las propiedades mecánicas del producto final durante las primeras etapas de almacenamiento (Setiadi *et al.*, 2018).

Análisis de color instrumental

Los cambios observados en las coordenadas a^* y b^* del espacio cromático proporcionan evidencia consistente sobre las interacciones complejas entre la transglutaminasa y los complejos pigmento-proteína en el músculo del atún. En este sentido, la reducción sistemática en tonalidades rojas y el incremento en amarillas, reportadas previamente por Valencia *et al.* (2015) en productos reestructurados de pescado, puede explicarse debido a las modificaciones de disposición espacial de las proteínas portadoras de pigmentos y su accesibilidad a procesos oxidativos.

Por otro lado, el análisis cuantitativo mediante ΔE reveló un hallazgo de particular importancia tecnológica y comercial: la transglutaminasa ejerce un efecto protector sobre los pigmentos musculares durante el almacenamiento refrigerado.

Específicamente, mientras que la fragmentación sin tratamiento enzimático (T1) resultó en alteraciones cromáticas progresivas que alcanzaron niveles “muy evidentes” ($\Delta E = 8,07 \pm 0,55$ al día 7), los tratamientos con transglutaminasa mantuvieron diferencias de color en rangos “perceptibles”, pero comercialmente aceptables ($3,94 \pm 0,46$ para T2 y $4,40 \pm 1,09$ para T3). De manera particular, esta estabilización cromática, especialmente notable en el tratamiento T2, sugiere que la enzima ejerce un efecto protector indirecto al minimizar la exposición de grupos cromóforos a condiciones oxidativas, posiblemente mediante el encapsulamiento de estos complejos dentro de la matriz proteica reestructurada (Kolotylo *et al.*, 2023; Valdés *et al.*, 2023).

Adicionalmente, la preservación de la luminosidad (L^*) en todos los tratamientos confirma que las modificaciones enzimáticas no comprometen la percepción visual general del producto, manteniendo así la apariencia característica del atún procesado que resulta crucial para la aceptación del consumidor. Esta observación, concordante con los hallazgos de Le *et al.* (2023) en productos reestructurados de pasta enriquecida con fibra, valida la viabilidad comercial de la tecnología propuesta desde la perspectiva sensorial.

Capacidad de retención de agua y aceite

Los incrementos significativos en la retención tanto de agua ($88,87 \pm 0,01$ %) como de aceite ($87,13 \pm 0,01$ %) observados en T3 representan una mejora tecnológica de particular relevancia industrial. Estos resultados equiparan y en algunos casos superan los reportados por Le *et al.* (2023) en pasta enriquecida con fibra, donde se observaron mejoras del 10 % en la capacidad de retención de agua con concentraciones similares de enzima. La eficiencia superior observada en

el presente estudio puede atribuirse a las características específicas de las proteínas del atún, que presentan una concentración elevada de residuos de glutamina y lisina disponibles para el entrecruzamiento enzimático.

De igual manera, la capacidad dual de retención mejorada para componentes hidrofílicos y lipofílicos constituye un hallazgo de especial interés tecnológico, respaldado por las observaciones de Pietrasik *et al.* (2007) sobre la formación de redes tridimensionales que encapsulan eficientemente moléculas de diferente polaridad. En el contexto de productos pesqueros, donde la pérdida de líquidos durante el procesamiento puede afectar tanto el rendimiento como las características sensoriales, esta mejora funcional representa una ventaja competitiva para la implementación industrial, donde la correlación directa entre concentración enzimática y capacidad de retención establece un gradiente de funcionalidad que permite optimizar las formulaciones según los requerimientos específicos de cada aplicación.

Conclusiones

La presente investigación muestra la efectividad de la transglutaminasa microbiana como herramienta para la revalorización de fragmentos de atún cocido, demostrando su capacidad para transformar subproductos industriales de bajo valor en productos reestructurados con propiedades funcionales superiores. Los resultados confirmaron que esta enzima no solo resuelve limitaciones técnicas inherentes al material fragmentado, sino que además optimiza características funcionales clave para aplicaciones industriales.

La caracterización instrumental reveló que la transglutaminasa induce mejoras multidimensionales en las propiedades del producto final. En términos de propiedades mecánicas, la enzima incrementó significativamente la dureza, cohesividad y gomosidad comparada con fragmentos no tratados, generando una matriz proteica más resistente y estable. Asimismo, la capacidad de retención de líquidos experimentó mejoras sustanciales, con incrementos progresivos tanto para agua como para aceite que se correlacionaron directamente con la concentración enzimática aplicada.

Desde la perspectiva de calidad sensorial evaluada instrumentalmente, los análisis de color demostraron que la transglutaminasa ejerce un efecto estabilizador sobre los pigmentos musculares, mitigando efectivamente las alteraciones cromáticas asociadas con la fragmentación del tejido. Esta preservación de la apariencia visual, combinada con las mejoras funcionales, valida la viabilidad comercial de la tecnología propuesta.

El general, la aplicación de transglutaminasa al 0,5 % proporcionó mejoras significativas en todas las propiedades evaluadas, mientras que concentraciones superiores ofrecieron beneficios marginales que no justifican el incremento de su implementación.

Del mismo modo, el comportamiento temporal durante el almacenamiento refrigerado confirmó la estabilidad de las propiedades funcionales y la consolidación progresiva de la matriz proteica, indicando que el producto reestructurado mantiene sus características mejoradas durante periodos relevantes. Finalmente, cabe señalar que, aunque los cambios en elasticidad y coordenadas de color representan comportamientos esperables, estos no comprometen la calidad general del producto.

Estos resultados contribuyen significativamente al desarrollo de tecnologías sostenibles para el aprovechamiento integral de subproductos de la industria atunera, proporcionando una alternativa viable para la transformación de fragmentos tradicionalmente destinados a usos de bajo valor agregado en productos con propiedades funcionales optimizadas y de mayor potencial comercial.

Referencias bibliográficas

- Aguilar-Zárete, P., Aguilar-Zárete, M., Carrillo Inungaray, M. L. y Portilla Rivera, O. M. (2012). Importancia de la producción de transglutaminasa microbiana para su aplicación en alimentos. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 4(8), 1-17. <https://bit.ly/4pDMjXJ>
- Añorve, A. A., Escalona-Buendía, H. B., Luna-Rodríguez, L., Pérez-Chabela, M. L., Ponce-Alquicira, E., Soriano-Santos, J. y Vargas-Romero, J. M. (2019). Reestructurados de pescado: una buena alternativa de proteína utilizando especies de bajo valor comercial o recortes. *Nacameh*, 13(1), 12-24. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7103351>
- Ardiansyah, A., Sahubawa, L. y Ustadi. (2020). Restructuring steak from flakes of yellowfin tuna meat using low salt microbial transglutaminase (MTGase). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 404, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/404/1/012073>
- Arteaga, M., Merchán, D., Mendoza, L. y Ochoa, M. (2022). Residuos de pescado: impacto ambiental y utilización. *Pro Ciencias: Revista de Producción. Ciencias E Investigación*, 6(42), 445-452. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol6iss42.2022pp445-452>
- Barbut, S. (2024). Measuring water holding capacity in poultry meat. *Poultry Science*, 103(5)1-8. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103577>
- Benjakul, S., Visessangua, W., Phatchrat, S. y Tanaka, M. (2007). Chitosan affects transglutaminase-induced surimi gelation. *Journal of Food Biochemistry*, 27(1), 53-66. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2003.tb00266.x>
- Bourne, M. C. (2002). Chapter 1 - Texture, Viscosity, and Food. En Elsevier eBooks (pp. 1-32). <https://doi.org/10.1016/b978-012119062-0/50001-2>
- Del Mar. (2021). Manual de procesos para la elaboración de conservas de atún. Documento interno. Manta, Ecuador.
- Erdem, N., Babaoğlu, A. S., Poçan, H. B. y Karakaya, M. (2020). The effect of transglutaminase on some quality properties of beef, chicken, and turkey meatballs. *Journal Of Food Processing and Preservation*, 44(3), 1-8. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14815>
- Kaić, A., Janjčić, Z., Žgur, S., Šikić, M. y Potočnik, K. (2021). Physicochemical and sensory attributes of intact and restructured chicken breast meat supplemented with transglutaminase. *Animals*, 11(9), 1-8. <https://doi.org/10.3390/ani11092641>
- Kolotylo, V., Piwowarek, K. y Kieliszek, M. (2023). Microbiological transglutaminase: biotechnological application in the food industry. *Open Life Science*, 18(1), 1-22. <https://doi.org/10.1515/biol-2022-0737>
- Kuraishi, C., Yamazaki, K. y Susa, Y. (2001). Transglutaminase: its utilization in the food industry. *Food Reviews International*, 17(2), 221-246. <https://doi.org/10.1081/fri-100001258>
- Le, N. P., Tran, T. T. T., Ton, N. M. N., & Le, V. V. M. (2023). Effects of transglutaminase treatment on cooking quality, textural properties, and overall acceptability of high fibre pasta incorporated with pennywort residue. *International Food Research Journal*, 30(6), 1572-1581. <https://doi.org/10.47836/ifrj.30.6.19>
- Panuncio, A., Cardeza, L., Quintero, M., Solé, M. L., Barrios, S. y Gámbaro, A. (2013). Efecto de la incorporación de transglutaminasa microbiana en las propiedades sensoriales de hamburguesas de desmenuzado de merluza (*Merluccius hubbsi*). *INNOTECH*, 8, 39-43. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=606166713005>
- Pietrasik, Z., Jarmoluka, A. y Shand, P. J. (2007). Effect of non-meat proteins on hydration and textural properties of pork meat gels enhanced with microbial transglutaminase. *LWT - Food Science and Technology*, 40 (5). 915-920. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.03.003>
- Rodríguez Castillejos, G. C., Téllez, S. J., Vázquez Vázquez, M., Lois, J. y Ramírez de León, J. A. (2013). Producción de transglutaminasa microbiana y sus aplicaciones potenciales en México. En Plaza y Valdés (Eds.), *Avances de ciencia y tecnología alimentaria en México* (pp. 557-577). Plaza y Valdés, S. A. de C. V. <https://bit.ly/4nesTad>
- Setiadi, Sah, W. I. y Alisha, N. (2018). The Influences of transglutaminase enzyme dosage on the meat characteristic from restructuring the animal and vegetable protein sources. *EDP Sciences*, 67, 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703043>

- Valdés Restrepo, M., Delgado Ospina, J., Londoño-Hernández, L. y Rodríguez Restrepo, R. A. (2023). Sistema de medición del color como parámetro de calidad en la industria de alimentos. *Temas Agrarios*, 28(1), 69-81. <https://doi.org/10.21897/rta.v28i1.3200>
- Valencia, E., González, S., Quevedo, R. y Leal, M. (2015). Aplicación de la enzima transglutaminasa en salmón, reineta y pulpo. *Información Tecnológica*, 26(3), 3-8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000300002>
- Vasić, K., Knez, Ž. y Leitgeb, M. (2023). Transglutaminase in foods and biotechnology. *Internacional Journal of Molecular Sciences*, 24(15), 1-23. <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/15/12402>

