

Artículo científico

Efecto de la transglutaminasa en las características de quesos frescos semiduros caprinos y bovinos

Viviana María Castillo-Chaves¹, Marcia Cordero-García², Alejandro Chacón-Villalobos³

RESUMEN

El estudio evaluó el efecto de la enzima transglutaminasa sobre las características físicas y sensoriales del queso fresco semiduro elaborado con leche bovina y caprina, así como su combinación al 50%. Se llevó a cabo en San José, Costa Rica, durante el año 2024. Para establecer de manera instrumental la calidad de la leche, se estandarizó un proceso de elaboración del queso, generando seis tratamientos que consideraron los factores: matriz láctea (bovina, caprina y mezcla) y uso de enzima (uso a 0,3 g/L leche o no uso). Se midió el pH, el rendimiento y la calidad microbiológica como criterios de control. Se evaluó instrumentalmente el análisis de perfil de textura (dureza, elasticidad, cohesividad, masticabilidad) y la colorimetría (CIELab para las coordenadas a*, b*, L*, C* y h°). Se determinó el agrado sensorial general utilizando una escala hedónica híbrida de 10 cm con 104 panelistas. Se conceptualizó un diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial de dos factores 3x2 efectuando un análisis de varianza factorial univariado para los parámetros físicos;

¹Universidad de Costa Rica, Escuela de Tecnología de Alimentos, San José, Costa Rica. Correo electrónico: viviana.castillochaves@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0009-0006-6411-6020>).

²Universidad de Costa Rica, Escuela de Tecnología de Alimentos, San José, Costa Rica. Correo electrónico: marcia.cordero_g@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-7933-8535>).

³Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. Estación Experimental Alfredo Volio Mata. La Unión, Cartago. Autor de correspondencia: alejandro.chacon@ucr.ac.cr. (<https://orcid.org/0000-0002-8454-9505>).

Recibido: 14 julio 2025 **Aceptado:** 21 enero 2026

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas 4.0.



y para el agrado general un diseño irrestricto aleatorio con seis niveles, analizando por Clusterización Aglomerativa Jerárquica de Ward. El efecto de la transglutaminasa en los parámetros depende de la matriz láctea. La enzima puede influir en la aceptación de algunos consumidores, pero esto no es generalizado. La afinidad previa del consumidor con el producto y el tipo de leche juegan un papel en la respuesta sensorial. Los resultados sugieren una posible mejora en los quesos caprinos semiduros con la adición de esta enzima, lo que debe estudiarse a futuro.

Palabras Clave: Productos lácteos, leche de cabra, leche de vaca, calidad, enzima, industria.

ABSTRACT

Effect of Transglutaminase on the Characteristics of Fresh Semi-Hard Goat and Cow Cheeses. The study evaluated the effect of the enzyme transglutaminase on the physical and sensory characteristics of fresh semi-hard cheese made from bovine and goat milk, as well as their 50% mixture. The study was conducted in San José, Costa Rica, during the year 2024. To instrumentally establish milk quality, a standardized cheese-making process was developed, generating six treatments that considered the factors: milk matrix (bovine, goat, and blend) and enzyme use (use at 0.3 g/L of milk or no use). The pH, yield, and microbiological quality were measured as control criteria. Instrumental evaluation included texture profile analysis (hardness, elasticity, cohesiveness, chewiness) and colorimetry (CIELab for coordinates a^* , b^* , L^* , C^* , and h°). Overall sensory liking was determined using a 10 cm hybrid hedonic scale with 104 panelists. A randomized complete block design with a 3x2 factorial arrangement was employed, performing a univariate factorial analysis of variance for physical parameters. For overall liking, an unrestricted random design with six levels was applied, analyzed using Ward's hierarchical

agglomerative clustering. The effect of transglutaminase on the parameters depends on the milk matrix. The enzyme may influence acceptance among some consumers, but this effect is not generalized. Prior consumer affinity with the product and the type of milk plays a role in the sensory response. Results suggest a potential improvement in semi-hard goat cheeses with the addition of this enzyme, which should be further studied in the future.

Keywords: Dairy products, goat milk, cow milk, quality, enzyme, industry.

INTRODUCCIÓN

Nutricionalmente, la leche es un alimento valioso para las personas que no tienen restricciones de salud relacionadas con su consumo, dadas las cantidades que contiene de proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales. La producción de leche y sus derivados desempeña un papel clave en el desarrollo económico y social de diversos países (Chauhan et al., 2021). Por ello, el mejoramiento técnico en la producción de lácteos en términos de diversificación, rendimientos, eficiencia e inocuidad representa siempre una ventaja competitiva para la industria (Ching-Miranda, 2016).

Aunque en el mundo occidental la leche de vaca es la más comúnmente industrializada en las grandes empresas, leches como la caprina y bufalina encuentran un nicho en las pequeñas e incluso medianas industrias, siendo importantes en áreas en vías de desarrollo (Malavassi et al., 2023). Datos de la FAO (2025) sugieren que la producción de leche a nivel mundial proviene en un 81% de vacas, 15% de búfalas, 2% de cabras, 1% de ovejas y 0,4% de camellas. La leche de cabra, a pesar de ser la tercera en producción detrás de las fuentes primarias por un amplio margen, es muy importante en las áreas rurales de muchos países al poseer los caprinos una notable tolerancia al ambiente y una alta rusticidad en cuanto a sus necesidades nutricionales, lo que las convierte en una fuente viable de ingresos y en una herramienta de seguridad alimentaria (Skapetas y Bampidis, 2016).

Alrededor de un 95% de la población caprina reside en países en vías de desarrollo (Park y Haenlein, 2013; Bidot-Fernández, 2017). De allí que cualquier ensayo de mejoramiento técnico en la industria de los lácteos caprinos posee importancia particular. Dado que la leche de cabra no siempre se produce en grandes cantidades, y que el sabor de sus derivados no siempre es ampliamente conocido y aceptado en la población general (Sant'Ana et al., 2013), la sustitución parcial con leche de vaca al elaborar productos lácteos es una alternativa que se ha venido ensayando (Barquero y Chacón, 2022; Campos, 2023; Quirós et al., 2023).

Entre la amplia diversidad de productos, el queso en todas sus formas es uno de los productos lácteos más relevantes, el cual registra altos volúmenes de producción orientados a satisfacer una demanda constantemente creciente en el mercado (Coetzee, 2014). Su relevancia cultural, y su importante valor sensorial y nutricional (Ferreiro y Rodríguez-Otero, 2018; Zhi et al., 2017), lo convierte en el producto lácteo más demandado después de la leche (OECD y FAO, 2019).

La obtención del queso se lleva a cabo con la transformación de la leche líquida a una masa sólida que se denomina cuajada, siendo la coagulación enzimática con cuajo la más común, aunque también se emplean la coagulación ácida o mixta (García-Gómez et al., 2019). La coagulación ácida suele generar un producto con mayor humedad, menor cantidad de proteína y de calcio, así como un pH más bajo, lo que deriva en una textura generalmente más suave y en una vida útil más corta (Fox et al., 2016). En Costa Rica y otros países latinoamericanos, predomina el consumo de queso fresco; un queso blanco y fresco semiduro usualmente contiene un porcentaje de humedad sin materia grasa (HSMG) entre un 54% y 69% en conformidad con el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA, 2017).

La baja retención de proteínas es un factor clave en el rendimiento del queso, en torno a lo cual, el empleo de la enzima transglutaminasa (MTGasa) mejora la recuperación de proteína que se pierde en el suero (Cadavid et al., 2020), lo que es económicamente valioso. La adición de la MTGasa se ha asociado con un aumento en el rendimiento del queso en hasta un 15% al lograr entrecruzamientos de cadenas peptídicas, así como la incorporación de aminos, esto al

formar enlaces covalentes entre la lisina y residuos del ácido glutámico, lo que además podría mejorar las características reológicas y sensoriales (García-Gómez et al., 2019; El-Kiyat et al., 2021). Diversas proteínas lácteas, como las caseínas (α s1, α s2, β y κ) y las proteínas del suero, son susceptibles a experimentar dichos entrecruzamientos, siendo particularmente reactivas las caseínas β y κ (Gharibzahedi et al., 2018). Estos cambios estructurales pueden traducirse en una mejora de la textura y de la capacidad de retención de agua de los productos lácteos, presumiblemente sin afectar de manera significativa sus características sensoriales y nutricionales (Gaspar y Pedroso de Góes-Favoni, 2015; Romeih y Walker, 2017).

La mayoría de la investigación existente en torno al uso de la MTGasa en quesos se ha enfocado en aspectos de rendimiento, por lo que el presente estudio desea aportar información en torno a otros aspectos menos abordados por la literatura, como es el caso de la textura, el color y el agrado sensorial, parámetros que pueden presentar importantes impactos derivados de este proceso industrial. Por ello, este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del uso de transglutaminasa en la elaboración de queso fresco mediante coagulación enzimática, empleando diferentes proporciones de leche de vaca y cabra, y su impacto en las características de color, textura y aceptación general del producto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

El presente estudio se realizó a lo largo del año 2024, entre los meses de enero y diciembre, en Costa Rica, América Central.

La materia prima láctea provino de la Finca Agroecológica Biamonte, localizada en el cantón de Vázquez de Coronado, provincia de San José. Los análisis de composición de la leche bovina y caprina se llevaron a cabo en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata de la Universidad de Costa Rica (EEAVM), localizada en el cantón de La Unión, provincia de Cartago. La medición

del pH, acidez titulable y gravedad específica de las leches se realizó por su parte en la Escuela de Tecnología de Alimentos de la misma Universidad (ETA), localizada en la Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, provincia de San José. En esta misma escuela se efectuó la evaluación de color, el pH, los análisis sensoriales y la textura de los quesos. Finalmente, en el Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA), también ubicado en la Ciudad Universitaria, se manufacturaron los quesos y se les realizaron los análisis microbiológicos.

Análisis inicial de la calidad de la leche

Con la intención de caracterizar la matriz de trabajo y garantizar el uso de una materia prima apropiada que no generara fuentes no deseadas de variación en el agrado sensorial o en el proceso de manufactura, se analizó la composición y calidad inicial de la leche bovina y caprina que se utilizó en cada lote experimental. Para la elaboración de los quesos frescos se utilizaron cinco lotes distintos de leche de vaca y seis lotes de leche de cabra. Estos lotes de leche se tomaron directamente de los tanques de almacenamiento de la empresa proveedora, pasadas menos de 12 h después del ordeño. La leche se vació en lecheras previamente lavadas y desinfectadas directamente de los tanques, al abrir la llave de drenado de los mismos. Las leches se manejaron en todos los casos en una cadena de frío a 4 °C desde el momento de su ordeño y hasta su análisis o uso en los procesos de manufactura.

Empleando el equipo MILKoscan FT2 marca Foss se realizó una determinación de proteínas, grasa, sólidos totales, lactosa y punto crioscópico (Pauta, 2015). Asimismo, se efectuó la medición del pH por medio de un pHmetro calibrado con electrodo de vidrio, según método AOAC 981.12. (AOAC, 2023); y la determinación del peso específico por medio de un lactodensímetro, según describe Draaiyer et al. (2009). Los análisis se realizaron por triplicado en todos los casos.

Elaboración del queso para los tratamientos experimentales

Se elaboraron quesos frescos semiduros, donde las diferentes proporciones de leche caprina y bovina (100% de leche de vaca, 100% de leche caprina y una mezcla al 50% de ambas leches),

así como la utilización o no de la enzima transglutaminasa en la formulación, fueron las variables de cruzamiento. Se utilizó una cantidad total de 5 litros de leche (fraccionada según mezcla/tratamiento) para elaborar los lotes de queso destinados a las pruebas fisicoquímicas, mientras que se usaron 15 litros de leche según mezcla para la elaboración de los diferentes tipos de queso destinados al panel sensorial. El proceso de elaboración común para los seis tratamientos se resume en la Figura 1. Las materias primas utilizadas, además de la leche, fueron cloruro de calcio en disolución comercial para la elaboración de quesos al 50%; cultivo lácteo comercial termófilo ácido láctico (cepas de *Streptococcus thermophilus*), transglutaminasa comercial en polvo proveniente de *Streptomyces mobaraensis*, quimosina comercial al 100% como promotor de la coagulación y sal refinada común. En la Figura 1 es necesario comprender que solo para la formulación 50%:50% se mezclan ambas leches, y se procede con una u otra en las formulaciones correspondientes al 100%.

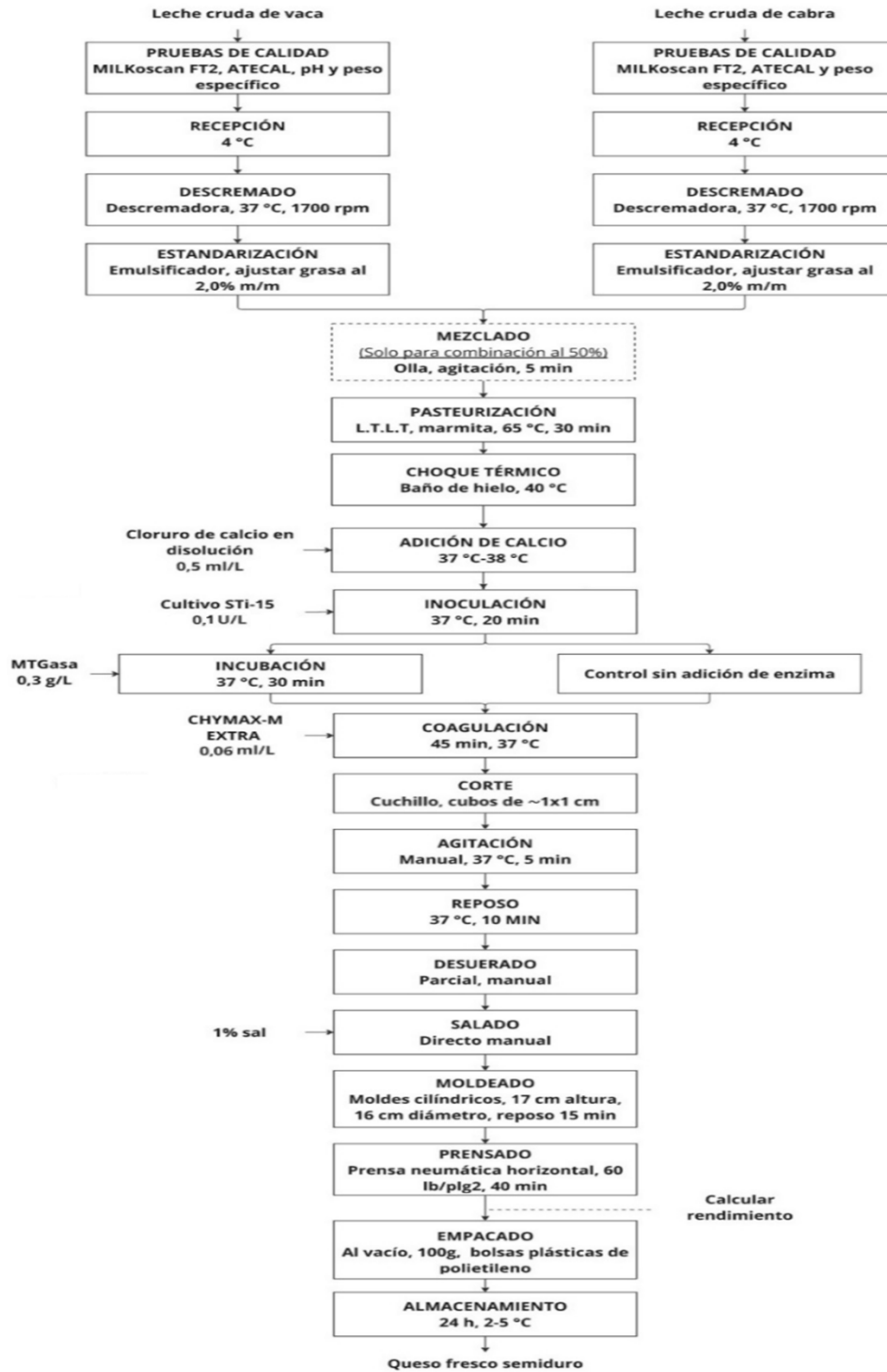


Figura 1. Diagrama de flujo de proceso para la elaboración de queso fresco semiduro a partir de leche bovina y caprina con adición de transglutaminasa.

Adaptado de: Cadavid et al., 2020; Rodríguez y Vargas, 2016; Pacheco, 2018.

El descremado de la leche hasta alcanzar un contenido residual de grasa de 0,1% se realizó utilizando un equipo Alfa Laval, modelo 29AC, operado a una velocidad de 1700 rpm. Previo al proceso de descremado, la leche fue calentada hasta 37 °C mediante una marmita de vapor marca Cobybsa.

Una vez realizado el descremado, la leche fue estandarizada mediante un emulsificador marca Silverson, modelo AXR, hasta ajustar el contenido de grasa a 2,0% (m/m) (Rodríguez y Vargas, 2016). Para ello, se efectuó un balance de masa a partir de estimaciones realizadas mediante el método del cuadrado de Pearson (Santana et al., 2015). La pasteurización se llevó a cabo en la marmita de vapor previamente descrita, mediante un proceso de baja temperatura y largo tiempo (L.T.L.T., por sus siglas en inglés), calentando la leche hasta 65 °C y manteniéndola a dicha temperatura durante 30 minutos. Posteriormente, se aplicó un choque térmico en un baño de hielo hasta reducir la temperatura de la leche a 40 °C.

El cloruro de calcio, el cultivo lácteo, la transglutaminasa y la quimosina comercial al 100% se utilizaron de acuerdo con las recomendaciones de los respectivos fabricantes. En el caso del cloruro de calcio en disolución, se añadió en una proporción equivalente al 0,05% del volumen de leche a procesar. El cultivo lácteo liofilizado se inoculó en la leche a una dosis de 0,1 U/L, permitiéndose su acción durante 20 minutos a una temperatura de 37 °C. La enzima transglutaminasa se aplicó a una concentración de 0,3 g/L de leche, con un tiempo de acción de 30 minutos a 36 °C (Cadavid et al., 2020; Rodríguez y Vargas, 2016). La quimosina comercial al 100% se empleó a razón de 0,06 mL/L de leche a procesar. Para cada lote, la cantidad correspondiente fue previamente diluida diez veces en agua potable fría libre de cloro, dejándose actuar a 37 °C durante 45 minutos, conforme a las indicaciones del fabricante consignadas en el etiquetado comercial.

El corte de la cuajada se efectuó en trozos de 1 cm³, permitiéndose 15 minutos para que ocurriese la sinéresis (Arce, 2011; Pacheco, 2018). La cuajada desuerada se saló a razón de 1 g de sal por cada 100 g de cuajada obtenida, y se depositó en moldes cilíndricos de 17 cm de altura y 16 cm de diámetro, prensándose por 40 minutos con prensa neumática a 413,69 kPa.

El queso resultante se empacó utilizando una empacadora al vacío marca Hualian modelo D2-600/5, empleando bolsas de polietileno, y almacenándose después el producto entre 2 °C y 5 °C. Terminado el proceso, se documentó el rendimiento de cada uno de los quesos según lo indicado por Abou-Soliman et al. (2020) para efectos de caracterización y control del proceso. Este se expresó como un porcentaje de la relación entre el queso producido y la leche requerida para dicho proceso.

Análisis de los quesos elaborados

-Evaluaciones del pH

Para efectos de control de proceso, la evaluación del pH se realizó después de un tiempo de almacenamiento de 24 h a una temperatura de 4-5 °C con la intención de corroborar un proceso de acidificación normal sin implicaciones sensoriales o reológicas adversas. La medición del pH se llevó a cabo por medio de un pHmetro con electrodo de vidrio y de referencia, empleando el método AOAC 981.12 (AOAC, 2023), donde 100 g de muestra se homogeneizó previamente en 20 mL de agua grado 3 libre de CO₂ a temperatura estándar de 25 °C.

-Evaluaciones físicas de textura y color

Para los quesos, se efectuó un análisis de perfil de textura (TPA) por medio de un texturómetro TA.XTPlus de Stable Micro Systems, según los procedimientos detallados por Nájera (2019). Esta evaluación se ejecutó una semana después de almacenado el producto (Granados y Álvarez, 2007). Se utilizaron los siguientes parámetros: velocidad de preensayo de 2 mm/s, 1,0 mm/s de ensayo y postensayo de 3 mm/s con sonda cilíndrica de 5 cm, una distancia de compresión de 10 mm, con un tiempo de 5 segundos entre compresiones y una fuerza de disparo de 20.

La muestra consistió en cubos de 2 cm de arista y el análisis se realizó por sextuplicado. Este se llevó a cabo siete días después de la elaboración de los quesos, dado que Ibrahim et al. (2017) reportaron que, tras este periodo mínimo, la enzima transglutaminasa genera cambios significativos perceptibles en el producto.

La evaluación colorimétrica empleó un colorímetro ColorFlex EZ, con el equipo previamente calibrado con un estándar negro, blanco y verde. Las escalas utilizadas fueron CIELab para las coordenadas cromáticas de rojo y verde (a^*), amarillo y azul (b^*) y la intensidad de luminosidad (L^*). Se recurrió a un iluminante D65, un ángulo de apertura del observador de 10° y una geometría $45^\circ/0^\circ$. Los parámetros de croma (C^*) y tono (h°) se estimaron matemáticamente a partir de los resultados según lo descrito por Schloss et al. (2017).

-Evaluación Sensorial

Antes de la evaluación sensorial, se realizó un análisis microbiológico para verificar la inocuidad de los productos destinados al panel. Se tomaron 30 g de muestra de cada queso tras un día de almacenamiento en refrigeración, y se analizaron coliformes totales, termotolerantes y *Escherichia coli* mediante el método de "número más probable" (NMP), según Camacho et al. (2009).

El análisis se efectuó tras 7 días de refrigeración, siguiendo lo reportado por Vergara-Álvarez et al. (2018) y Bravo et al. (2017), quienes establecen una vida útil sensorial de 14 días para el queso fresco. Así, la evaluación se realizó a la mitad de este período para simular su vida media en anaquel. Solo las muestras sin presencia de microorganismos de riesgo fueron utilizadas en la evaluación sensorial.

Se llevó a cabo una prueba de agrado general con la participación de 104 panelistas no entrenados, consumidores habituales de productos lácteos, que no presentaban intolerancia a la lactosa ni alergia a las proteínas lácteas. El procedimiento se realizó siguiendo lo descrito por Abou-Soliman et al. (2020) y Nájera (2019), utilizando una escala hedónica híbrida de 10 cm, en la cual los panelistas indicaron su nivel de agrado general. La escala contó con valores ancla en los extremos, correspondientes a las leyendas "Me agrada" y "Me desagrada", y un ancla central con la leyenda "Indiferente".

Diseño experimental y análisis estadístico

La evaluación de los parámetros físicos se conceptualizó en un diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial de dos factores 3×2 : la proporción usada de leche en tres niveles

(leche bovina, caprina y su mezcla), y la adición de la enzima transglutaminasa como tratamiento experimental y su no inclusión como tratamiento control. Se produjeron tres lotes de cada combinación, y cada lote representó una repetición. Se analizaron las siguientes variables respuesta: parámetros asociados al perfil de textura (TPA) y parámetros colorimétricos. Las muestras de cada lote se evaluaron por triplicado para el análisis colorimétrico y sextuplicado para el perfil de textura (TPA). Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza factorial univariado para evaluar el efecto de cada factor y determinar interacciones significativas. Pruebas de comparación de medias de Tukey o Scheffé se emplearon, según la paridad de los datos, para identificar diferencias significativas utilizando un nivel de significancia del 5%.

El análisis sensorial implicó un diseño irrestricto aleatorio con 6 niveles de medición, donde las variables independientes correspondieron a la proporción de leche bovina y caprina por un lado, y la adición de la enzima transglutaminasa por otro. Los datos de la prueba sensorial se analizaron mediante un análisis de Clusterización Aglomerativa Jerárquica (CAJ) por el método de Ward para segmentar las respuestas de los panelistas en subgrupos con comportamiento similar. Posteriormente, se aplicó un ANDEVA a los subgrupos y se realizó una prueba LSD con un nivel de significancia del 5%.

Se propuso el siguiente modelo lineal general univariado:

$$Y_{ijl} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \rho_l + \varepsilon_{ijl}$$

Donde:

μ es la media general.

τ_i es el efecto del tipo de leche.

β_j es el efecto de la enzima.

$(\tau\beta)_{ij}$ es la interacción entre leche y enzima.

ρ_l es el efecto del lote.

ε_{ijl} es el error aleatorio experimental.

Se utilizaron, para todos los análisis descriptivos e inferenciales, los paquetes informáticos estadísticos XLSTAT 2024.3 (Lumivero, 2024) y SPSS versión 25 (IBM Corporation, 2017).

RESULTADOS

Parámetros de monitoreo

En el Cuadro 1 se recopilan los valores paramétricos de composición obtenidos para la leche tanto bovina como caprina empleadas en la elaboración de los quesos experimentales.

Cuadro 1. Valores medios e incertidumbre analítica para los parámetros fisicoquímicos de la leche bovina y caprina utilizada en la elaboración de los quesos frescos semiduros.

Parámetro	Leche caprina	Leche bovina
Grasa (%)	3,3 ± 0,7	5,0 ± 1,0
Proteína (%)	3,1 ± 0,2	3,6 ± 0,2
Lactosa (%)	4,7 ± 0,1	4,4 ± 0,1
Sólidos totales (%)	11,6 ± 0,7	13,7 ± 1,0
Sólidos no grasos (%)	8,4 ± 0,2	8,7 ± 0,1
pH	6,6 ± 0,1	6,8 ± 0,1
Peso específico	1,030 ± 0,001	1,028 ± 0,003
Punto de congelación (°C)	-0,49 ± 0,02	-0,47 ± 0,01
Humedad (%)	88,4 ± 0,7	86,3 ± 1,0

Para efectos de caracterización se estableció que el pH medio de los quesos control sin transglutaminasa fue de 6,6 ± 0,3 para el queso bovino, 6,6 ± 0,1 para el caprino y 6,5 ± 0,2 para la mezcla. En el caso de los quesos con transglutaminasa estos fueron de 6,6 ± 0,3 para el queso bovino, 5,9 ± 0,2 para el caprino y 6,3 ± 0,4 para la mezcla. Por otro lado, el rendimiento medio de los quesos control sin transglutaminasa fue de 13,0 ± 2,0% para el bovino, 11,0 ± 2,0% para el caprino y 12,0 ± 1,0% para la mezcla. En el caso de los quesos con transglutaminasa estos fueron de 15,0 ± 2,0% para el queso bovino, 12,0 ± 3,0% para el caprino

y $14,0 \pm 3,0\%$ para la mezcla. Desde el punto de vista microbiológico, los quesos obtenidos presentaron resultados negativos para todos los patógenos evaluados.

Evaluaciones físicas de textura y color

En el Cuadro 2 se presentan los valores promedio de las variables de color del queso elaborado según la diferente proporción de leche de vaca y de cabra, con o sin inclusión de enzima transglutaminasa, junto al resultado de la prueba de medias Tukey.

Cuadro 2. Valores medios e incertidumbre analítica para los parámetros colorimétricos del queso según la proporción láctea y empleo de la enzima transglutaminasa.

Enzima	Base láctea	Parámetro de color				
		L*	a*	b*	C*	h°
Sin inclusión	Bovina 100%	$86,0^{ab} \pm 2,0$	$0,3^a \pm 0,2$	$16,0^{ab} \pm 2,0$	$16,0^{ab} \pm 2,0$	$89,0^c \pm 0,1$
	Mezcla 50%:50%	$87,0^a \pm 2,0$	$-0,7^b \pm 0,6$	$16,0^{ab} \pm 3,0$	$16,0^{ab} \pm 2,0$	$93,0^b \pm 2,0$
	Caprina 100%	$85,0^b \pm 1,0$	$-1,9^c \pm 0,6$	$12,0^c \pm 1,0$	$12,0^c \pm 1,0$	$99,0^a \pm 3,0$
Con inclusión	Bovina 100%	$88,0^a \pm 2,0$	$0,4^a \pm 0,3$	$18,0^a \pm 2,0$	$18,0^a \pm 2,0$	$88,8^c \pm 0,8$
	Mezcla 50%:50%	$87,0^a \pm 1,0$	$-0,4^b \pm 0,2$	$15,2^b \pm 0,6$	$15,2^b \pm 0,6$	$91,4^{bc} \pm 0,9$
	Caprina 100%	$86,0^{ab} \pm 2,0$	$-1,8^c \pm 0,5$	$11,0^c \pm 1,0$	$12^c \pm 1$	$99,0^a \pm 3,0$

Nota: los promedios reportados con letras distintas en cada columna presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Los parámetros mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las muestras al considerar la formulación; sin embargo, al tener en cuenta el factor de inclusión de la enzima, no se observaron diferencias ($p > 0.05$). Adicionalmente, ninguna variable presentó interacción entre los factores formulación*inclusión de enzima ($p > 0.05$). En el Cuadro 3 se muestran los resultados experimentales asociados al análisis texturométrico.

Cuadro 3. Valores medios e incertidumbre analítica para los parámetros de perfil de textura del queso según la proporción láctea y empleo de la enzima transglutaminasa.

Enzima	Base láctea	Parámetros de perfil de Textura			
		Dureza (N)	Elasticidad (mm)	Cohesividad	Masticabilidad (N.m)
Sin inclusión	Bovina 100%	13,000 ^b ± 3,000	8,500 ^{ab} ± 0,300	0,350 ^c ± 0,060	0,038 ^c ± 0,009
	Mezcla 50%:50%	15,00 ^{ab} ± 4,00	8,30 ^b ± 0,30	0,50 ^a ± 0,07	0,06 ^{ab} ± 0,02
	Caprina 100%	13,00 ^b ± 3,00	8,60 ^{ab} ± 0,30	0,42 ^{abc} ± 0,09	0,05 ^{bc} ± 0,01
Con inclusión	Bovina 100%	17,00 ^a ± 3,00	8,90 ^a ± 0,30	0,38 ^c ± 0,07	0,06 ^b ± 0,02
	Mezcla 50%:50%	15,000 ^{ab} ± 2,000	8,600 ^{ab} ± 0,700	0,410 ^{bc} ± 0,070	0,052 ^{bc} ± 0,009
	Caprina 100%	18,00 ^a ± 6,00	8,60 ^{ab} ± 0,30	0,50 ^{ab} ± 0,10	0,07 ^a ± 0,03

Nota: los promedios reportados con letras distintas en cada columna presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Al estudiar la formulación de los quesos, únicamente la dureza no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) entre muestras experimentales, evidenciándose dichas diferencias para las variables elasticidad (mm), cohesividad y masticabilidad (N.m). Al analizar la inclusión o no de la enzima transglutaminasa como factor, las variables dureza, elasticidad y masticabilidad mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), a diferencia de la cohesividad que no resultó ser estadísticamente significativa ($p > 0.05$). Todas las variables, a excepción de la elasticidad, presentaron una interacción significativa entre los factores formulación*inclusión de enzima ($p \leq 0.05$).

Evaluación sensorial

En el Cuadro 4 se muestran los valores promedio para el agrado sensorial según el análisis estadístico de conglomerados, que estableció un conglomerado 1 que abarcó a un 44,23% de los panelistas y un conglomerado 2 que representó un 55,77% de ellos.

Cuadro 4. Valores medios de agrado general según conglomerados del queso según la proporción láctea y empleo de la enzima transglutaminasa.

Enzima	Base láctea	Agrado general	
		Conglomerado 1	Conglomerado 2
Sin inclusión	Bovina 100%	8 ^{abc} ± 1	6 ^a ± 2
	Mezcla 50%:50%	8 ^d ± 2	5 ^d ± 3
	Caprina 100%	7 ^d ± 2	5 ^{bc} ± 2
Con inclusión	Bovina 100%	9 ^{ab} ± 1	7 ^a ± 2
	Mezcla 50%:50%	8 ^{cd} ± 2	6 ^a ± 2
	Caprina 100%	8 ^{bcd} ± 2	5 ^b ± 2

Nota: promedios reportados con letras distintas en una misma columna presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

Parámetros de monitoreo

Los resultados de composición y propiedades físicas de la leche caprina y bovina presentados en el Cuadro 1 evidenciaron que ambos sustratos no solo mostraron las características y variaciones típicamente reportadas en la literatura (Barquero y Chacón, 2022; Malavassi et al., 2023), sino que, además, cumplieron con los parámetros comúnmente establecidos para la leche destinada al procesamiento industrial. En consecuencia, fue posible emplearlas como materia prima para la elaboración de los quesos experimentales del presente estudio.

Si bien el tratamiento caprino con enzima presentó un descenso en el pH (5,9) respecto a su control (6,6), este comportamiento difiere de la tendencia general observada en los demás tratamientos, donde no se evidenciaron variaciones técnicamente significativas atribuibles al uso de la transglutaminasa. Lo anterior podría ser atribuible a una mayor actividad circunstancial del cultivo en dicha unidad experimental. No obstante, los resultados obtenidos se encuentran dentro de lo esperable, según los valores reportados por Ramírez y Vélez (2012) para quesos frescos y blancos, por lo que esta variación no se consideró un defecto técnico en la calidad final del producto. La literatura, por su parte, no reporta evidencia de que la transglutaminasa produzca una alteración en el pH del queso (Razeghi y Yazdanpanah, 2020; Özer et al., 2013). A lo anterior se suma que la ausencia de patógenos permitió establecer un parámetro de inocuidad apropiado para la ejecución de las evaluaciones sensoriales.

En cuanto al rendimiento del queso obtenido, este se reportó como un criterio de monitoreo del proceso y como parte del rigor en la caracterización del producto. Considerando las variaciones reflejadas en la incertidumbre asociada a los datos, los valores de rendimiento se encontraron dentro de los rangos esperables para el tipo de queso elaborado y bajo las condiciones de proceso aplicadas (Sant'Ana et al., 2013; Monsalve et al., 2022).

Las características de la leche utilizada, junto con los distintos criterios de monitoreo evaluados, sugieren que la elaboración del queso se llevó a cabo mediante un proceso y con materias primas que no presentaron no conformidades capaces de afectar los resultados analíticos inferenciales.

Parámetros colorimétricos

En torno al parámetro L, existió una ligera luminosidad menor entre el queso elaborado con un 100% leche de cabra y sin la inclusión de la enzima transglutaminasa ($L^* = 85 \pm 1$) con respecto a los demás tratamientos. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Miloradovic et al. (2018), al comparar la luminosidad de quesos bovinos y caprinos tipo quark. No obstante, es importante considerar que, al estar este valor por encima de 85 en todos los tratamientos evaluados, ninguno puede definirse como opaco, considerándose a todos como brillantes.

En las formulaciones elaboradas con una mezcla de leches al 50%, así como en aquellas obtenidas a partir de leche bovina al 100%, las diferencias significativas en luminosidad no se manifestaron. Esto sugiere que la menor luminosidad observada estaría asociada a un alto grado de pureza en el uso de leche caprina, particularmente cuando no se emplea la enzima transglutaminasa. En este contexto, el efecto aglutinante de la transglutaminasa sobre las proteínas y otros compuestos nitrogenados de la leche de cabra, cuya fracción proteica difiere de la leche bovina, podría influir directamente en la luminosidad del producto. Así, la compactación del entramado proteico inducida por la enzima, junto con las diferencias en la naturaleza de la fracción proteica y grasa según el tipo de leche utilizada, podría explicar los cambios observados en el brillo y la luminosidad del queso (Darnay et al., 2017). En este sentido, resulta pertinente que futuros estudios profundicen en el efecto de la transglutaminasa sobre la luminosidad de quesos elaborados exclusivamente con leche caprina.

En cuanto al parámetro a^* , que representa el componente verde-rojo de la escala de color, se observó un efecto significativo del tipo de leche empleada ($p < 0.05$), mientras que la inclusión de transglutaminasa no mostró influencia significativa ($p > 0.05$), por lo que no constituye un factor determinante en la formulación. Así, los quesos elaborados con leche bovina al 100% tendieron a una coloración más neutra, mientras que los caprinos presentaron una mayor tendencia hacia tonalidades verdosas, en concordancia con lo reportado para productos similares (Kaczyński, 2024). De manera interesante, los quesos elaborados con una mezcla 50:50 no mostraron valores intermedios, sino que se asemejaron a los observados en los quesos bovinos.

Con respecto a la coordenada b^* , que representa el componente amarillo–azul de la escala de color, los resultados fueron los esperados, dado que existe una diferencia basal marcada entre la leche bovina y la caprina. Los quesos elaborados con leche de vaca presentaron valores significativamente más altos que los caprinos ($p \leq 0.05$), reflejando el mayor tono amarillento asociado a su contenido de carotenoides (Stephenson et al., 2021). En el caso de las mezclas, sin la adición de transglutaminasa, los quesos al 50% no se diferenciaron significativamente de los elaborados exclusivamente con leche bovina, lo que coincide con lo observado en los parámetros de color previos y refuerza el efecto dominante de la leche de vaca en la colorimetría del producto. No obstante, con la inclusión de la enzima, se sugiere un posible impacto sobre la coordenada b^* , particularmente en los quesos de mezcla, lo que podría relacionarse con modificaciones en la estructura del queso y su interacción con la luz reflejada (Darnay et al., 2017).

El análisis del parámetro C^* , que refleja la pureza o intensidad del color, vuelve a poner en evidencia el efecto predominante del tipo de leche utilizada, sin aportar resultados concluyentes respecto a la influencia de la enzima transglutaminasa. En este sentido, los quesos mostraron una mayor saturación del color conforme aumentó la proporción de leche bovina en la formulación. Por su parte, el ángulo h° presentó diferencias significativas en los quesos elaborados exclusivamente con leche caprina, independientemente del uso de la enzima ($p < 0.05$), lo que refuerza el efecto distintivo de este tipo de leche frente a la bovina y su influencia marcada incluso en mezclas en partes iguales. Asimismo, estos resultados sugieren que la transglutaminasa no desempeña un papel relevante sobre este parámetro. En términos cromáticos, los quesos bovinos y sus mezclas exhibieron valores más bajos de h° , asociados a tonalidades cercanas al rojo–amarillo, mientras que los valores más altos observados en los quesos caprinos se relacionaron con tonalidades verde–azuladas. En conjunto, el tipo de leche se perfila como el factor determinante de las características colorimétricas, por encima del posible efecto de la transglutaminasa (Ferraz et al., 2024).

En conjunto, la evidencia indica que, si bien la transglutaminasa podría influir en algunos componentes del color, es el tipo de leche el factor que define principalmente las características colorimétricas del queso.

La literatura reporta que las tonalidades verdosas características del queso caprino se atribuyen principalmente al perfil de ácidos grasos de la leche, mientras que valores más elevados de la coordenada b^* en quesos elaborados con leche bovina se asocian con procesos de proteólisis y la reacción de Maillard, los cuales favorecen la formación de compuestos de pardeamiento y una disminución de la luminosidad (L^*) (Queiroga et al., 2013). Por su parte, Darnay et al. (2017) describen, en quesos semiduros, un aumento del componente amarillo asociado a la encapsulación de carotenoides dentro de una red proteica más compacta, lo cual resulta pertinente para el presente estudio; sin embargo, este efecto sería relevante principalmente en quesos bovinos o en mezclas. Asimismo, dicho estudio no reporta efectos significativos de la transglutaminasa sobre otras componentes de color, por lo que adopta una postura cauta respecto a la influencia de la enzima en la variación cromática del queso.

Parámetros de perfil de textura

El análisis instrumental evidenció una tendencia al aumento de la dureza de las muestras con la adición de MTGasa, siendo este efecto menos marcado en las mezclas de leches. Este comportamiento se refleja en el incremento de la dureza al comparar los quesos control con sus contrapartes tratadas, lo que explica la significancia estadística observada ($p \leq 0.05$). Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura para quesos tratados con MTGasa (Aaltonen et al., 2014; Darnay et al., 2017) y se atribuyen principalmente a la formación de enlaces covalentes durante el entrecruzamiento proteico inducido por la enzima dentro de la micela, más que a la adición de proteína extramicelar (Özer et al., 2013). Asimismo, los quesos elaborados con leches puras al 100% y con transglutaminasa presentaron valores de dureza significativamente superiores a los de sus contrapartes sin enzima, mientras que en las mezclas de leches no se observaron diferencias apreciables, independientemente del uso de la enzima. Este comportamiento ha sido documentado previamente por otros autores (Chacón-Villalobos et al., 2015; Álvarez-Figueroa et al., 2022; Barquero y Chacón, 2022; Campos, 2023; Malavassi et al., 2023; Quirós et al., 2023).

En este sentido, los resultados del presente trabajo se suman al cuerpo de evidencia que indica que, en la elaboración de productos lácteos, surgen características *sui generis* en aquellos derivados de mezclas de leche caprina y bovina, las cuales no responden necesariamente a un comportamiento intermedio entre ambas leches.

La elasticidad, que se relaciona con la capacidad de recuperación de la muestra a la deformación, no parece arrojar resultados que permitan evidenciar alguna inferencia de importancia práctica entre las muestras evaluadas, o que sugiera que el uso de la enzima tenga un papel en esta característica. En este último sentido, en la literatura, la elasticidad suele ser más asociada al porcentaje de grasa (Castro et al., 2014). García-Gómez et al. (2019) sugieren que el uso de MTGasa en quesos de coagulación enzimática intensifica hasta en un 9% la elasticidad, esto debido al incremento en la fuerza y número de los enlaces de proteína; sin embargo, no fue posible corroborarlo en el presente estudio.

Al igual que la elasticidad, la cohesividad se relaciona con el grado de deformación previo a la ruptura del producto. Aunque se observaron diferencias significativas en los valores medios ($p < 0.05$), estas no permiten establecer una tendencia clara atribuible al tipo de formulación o al uso de la enzima, evidenciándose más bien una interacción entre ambos factores. No obstante, los resultados sugieren, de forma sutil, una menor cohesividad en los quesos elaborados exclusivamente con leche bovina, independientemente del uso de la enzima. Estudios previos indican que la cohesividad tiende a aumentar con una mayor proporción de leche caprina y que factores como la composición de la red proteica y la dispersión de la grasa influyen de manera determinante en este parámetro (Ramírez y Vélez, 2012). En este contexto, el tipo de leche podría considerarse el factor de mayor influencia sobre la cohesividad.

Por otro lado, la masticabilidad se relaciona con la cohesividad y el tiempo requerido para transformar la muestra en un producto listo para la deglución. La literatura sugiere que la incorporación de leche de cabra al queso aumenta la masticabilidad (Sant'Ana et al., 2013), de la misma manera que lo hace la inclusión de la enzima transglutaminasa hasta en un 19% debido al aumento en la dureza (García-Gómez et al., 2019). A grandes rasgos, los resultados

obtenidos reflejan ambas tendencias y, a la vez, permiten inferir una interacción significativa entre el uso de la enzima y el tipo de matriz láctea.

En este contexto, los resultados también contribuyen al cuerpo de evidencia disponible, considerando que el efecto de la transglutaminasa sobre la textura, y particularmente sobre la dureza, continúa siendo un aspecto controvertido, con reportes heterogéneos según el tipo de producto lácteo evaluado (Gharibzahedi et al., 2018).

Evaluación Sensorial

El conglomerado 1 agrupa a panelistas con un elevado nivel de agrado hacia los quesos evaluados, con valores medios iguales o superiores a 8, presentándose diferencias significativas en todos los casos, con excepción del queso elaborado con leche caprina al 100% sin transglutaminasa. De manera interesante, los quesos elaborados exclusivamente con leche bovina, con y sin inclusión de la enzima, así como el queso elaborado con leche caprina al 100% con transglutaminasa, presentaron los valores más altos de agrado ($p < 0.05$). En este conglomerado, el agrado hacia los productos elaborados con mezclas de leches no mostró diferencias significativas, independientemente del uso de la enzima ($p > 0.05$). Para este grupo de consumidores, la inclusión de transglutaminasa no parece ser un factor determinante en el agrado, con excepción del queso elaborado exclusivamente con leche caprina. Asimismo, el menor agrado sensorial asociado a productos elaborados con leche caprina en comparación con aquellos derivados de mezclas o de leche bovina ha sido ampliamente documentado en la literatura, particularmente en contextos como el costarricense, donde el consumo de productos caprinos no es habitual y su perfil sensorial resulta claramente diferenciable respecto a los derivados de leche bovina (Chacón-Villalobos y Mora-Valverde, 2017; 2019).

Resulta de interés destacar que la inclusión de la enzima transglutaminasa parece tener un efecto positivo, reflejado en un aumento significativo del agrado en el queso elaborado exclusivamente con leche caprina para este grupo de panelistas ($p < 0.05$). No obstante, como se discutirá en los resultados correspondientes al conglomerado 2, este efecto podría estar

siendo percibido o valorado principalmente por consumidores con mayor afinidad hacia el queso, posiblemente debido a una mayor familiaridad con las sutilezas de sus atributos sensoriales. En este sentido, la literatura señala que la incorporación de transglutaminasa, al mejorar la capacidad de retención de agua y las propiedades reológicas del producto, puede contribuir a una mejora del agrado sensorial, perceptible para ciertos grupos de consumidores (Romeih y Walker, 2017; Miwa, 2020; Razeghi y Yazdanpanah, 2020).

El segundo conglomerado, integrado por un mayor número de panelistas, correspondió a consumidores con un menor agrado general hacia los quesos evaluados. Aun así, los quesos elaborados exclusivamente con leche bovina presentaron los valores de agrado significativamente más altos dentro del grupo ($p < 0.05$), sin diferencias entre ellos. En un segundo nivel se ubicaron los quesos elaborados con leche caprina al 100%, cuyos valores de agrado tampoco difirieron entre sí ($p > 0.05$). Un resultado destacable se observó en las mezclas, donde la formulación con inclusión de transglutaminasa alcanzó un agrado sensorial indistinguible del de los quesos 100% bovinos. La literatura indica que la transglutaminasa puede mejorar atributos sensoriales como la textura, la sensación en boca y la cremosidad, incrementando el agrado general del producto (Gharibzahedi et al., 2018; García-Gómez et al., 2020), lo cual podría explicar la diferencia observada entre las mezclas en este conglomerado. No obstante, en este grupo de consumidores, menos afín al queso, el tipo de matriz láctea parece ser el principal determinante del agrado, mientras que el efecto de la enzima podría pasar desapercibido en el resto de las formulaciones. En términos generales, las calificaciones obtenidas se ubicaron alrededor de la mitad de la escala utilizada, lo que sugiere una actitud de relativa indiferencia más que de rechazo hacia los productos evaluados.

Es evidente, dados los conglomerados obtenidos, que los efectos que la transglutaminasa pueda tener en el apartado sensorial no son tan categóricos como para generar una respuesta generalizada en una población de comensales, así como que estos no parecen ser más determinantes que la propia matriz láctea ni que el grado de afinidad sensorial previamente mostrado por los panelistas. De la mano con las mejoras sensoriales atribuidas al efecto de la transglutaminasa, la literatura también señala que existen posibles cambios no tan positivos en

algunos productos, sugiriendo que la naturaleza de la matriz proteica base sigue siendo el factor predominante en la respuesta del consumidor (Gharibzahedi et al., 2018; García-Gómez et al., 2020).

La literatura reporta mejoras significativas en el desempeño sensorial de una amplia gama de productos lácteos al emplear transglutaminasa, aunque también documenta casos en los que no se observa una mejora perceptible; por ello, el efecto de la matriz láctea debe considerarse un factor determinante en el resultado final (Gharibzahedi et al., 2018). Más allá de posibles efectos sobre el sabor u olor, se presume que el impacto de la transglutaminasa se manifiesta principalmente en el cuerpo, la textura y la sensación en boca del producto, como consecuencia tanto del entrecruzamiento de cadenas peptídicas como de la mayor retención de agua inducida por la enzima (Ahmed et al., 2015). En este sentido, estudios previos sobre quesos caprinos y sus mezclas con leche bovina han reportado resultados relevantes en términos de retención de agua (Chacón-Villalobos et al., 2015; Álvarez-Figueroa et al., 2022; Barquero y Chacón, 2022; Campos, 2023; Malavassi et al., 2023; Quirós et al., 2023), lo cual podría reflejarse nuevamente en el presente estudio mediante el uso de transglutaminasa.

CONSIDERACIONES FINALES

El efecto de la inclusión de transglutaminasa sobre las propiedades colorimétricas y de textura del queso fresco semiduro se encuentra, en la mayoría de los casos en que resulta significativo, estrechamente asociado con la naturaleza de la matriz láctea empleada. En este sentido, el tipo de leche se perfila como el principal factor modulador de la respuesta del producto frente al uso de la enzima.

En el ámbito sensorial, este comportamiento se mantiene, incorporando además la consideración de que, aun cuando puedan existir efectos perceptibles de la transglutaminasa sobre el agrado, estos no resultan lo suficientemente consistentes como para ser valorados de manera generalizada por los consumidores. En este contexto, tanto la naturaleza de la matriz

láctea como el grado de afinidad sensorial previa de los comensales hacia el producto emergen como factores determinantes de la respuesta sensorial.

Finalmente, los resultados del presente estudio sugieren indicios de una posible mejora en la calidad de los quesos semiduros frescos elaborados con leche caprina mediante la inclusión de transglutaminasa en la formulación. En consecuencia, se considera pertinente el desarrollo de estudios multiparamétricos más específicos y detallados centrados en esta matriz láctea, los cuales podrían contemplar la evaluación del efecto de la enzima mediante su incorporación simultánea con la renina, el ensayo de diferentes niveles de concentración y la realización de estudios longitudinales a lo largo de la vida útil del producto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean extender un agradecimiento tanto a la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM), como a la Escuela de Tecnología de Alimentos (ETA) y al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA), todas unidades de la Universidad de Costa Rica, cuyo apoyo material hizo posible la realización del presente estudio. Asimismo, se agradece de manera especial a la Dra. Marianela Cortés Muñoz, de la Universidad de Costa Rica (CITA/PROINNOVA-UCR), por su valioso apoyo.

LITERATURA CITADA

Aaltonen, T., Huuonen, I. y Myllärinen, P. (2014). Controlled transglutaminase treatment in Edam cheese-making. *International Dairy Journal*, 38, 179-182.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.12.004>

- Abou-Soliman, N. H., Awad, S. y El-Sayed, M. I. (2020). The impact of microbial transglutaminase on the quality and antioxidant activity of camel-milk soft cheese. *Food and Nutrition Sciences*, 11, 153-171. <https://doi.org/10.4236/fns.2020.113012>
- Ahmed, M.A., El-Nimer, A.M.M., Mostafa M.A. y Omar, H. (2015). Effect of fat replacer or transglutaminase on the quality of low-fat gouda-like cheese. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, 10 (2), 170-180 <https://doi.org/10.5829/idosi.wjdfs.2015.10.2.10220>
- Akal, H. C. (2023). Transglutaminase induced whey cheese production: Impact of different ratios on yield, texture, and sensory properties. *Mljekarstvo*, 73(4), 225–235. <https://doi.org/10.15567/mljekarstvo.2023.0402>
- Álvarez-Figueroa, M. L., Pineda-Castro, M. L., Chacón-Villalobos, A. y Cubero-Castillo, E. (2022). Características fisicoquímicas y sensoriales de leches caprinas y bovina enteras, descremadas y deslactosadas. *Agronomía Mesoamericana*, 33 (2), 47039. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47039>
- AOAC (Association of Official Analytical Chemists) International. 2023. Official Methods of Analysis. 22nd Edition, The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, USA.
- Arce, J. R. (2011). Incorporación de proteína de suero en la elaboración de un queso blanco y valoración del efecto provocado en su rendimiento, agrado general y contenido de triptófano. Tesis Grado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/2535>
- Barquero, L. M., y Chacón, A. (2022). Características fisicoquímicas y sensoriales de leches saborizadas elaboradas con leche caprina y bovina. *Agronomía Mesoamericana*, 33 (1), 46743. <https://doi.org/10.15517/am.v33i1.46743>
- Bidot-Fernández, A. (2017). Composición, cualidades y beneficios de la leche de cabra: Revisión bibliográfica. *Revista de Producción Animal*, 29 (2), 32–41. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-79202017000200005&lng=es&tlng=es.

- Bravo, B. J., Araujo, D. M. y Plácido, R. H. (2017). Estimación de la vida útil sensorial del queso fresco de leche de bovino (*Bos taurus*) utilizando el método de riesgos de Weibull. Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/2919>
- Cadavid, A. M., Bohigas, L., Toldrà, M., Carretero, C., Parés, D. y Saguer, E. (2020). Improving quark-type cheese yield and quality by treating semi-skimmed cow milk with microbial transglutaminase. *Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109756>
- Camacho, A., Giles, M., Ortegón, A., Palao, M., Serrano, B. y Velázquez, O. (2009). Técnicas para el análisis microbiológico de alimentos (2ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México.
- Campos, A. (2023). Evaluación del efecto de distintas proporciones de leche bovina y caprina sobre las características fisicoquímicas, microbiológicas y sensoriales del kéfir de leche con sabor a fresa. Tesis Grado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/22544>
- Castro, A. C., Novoa, C.F., Algecira, N. y Buitrago, G. (2014). Reología y textura de quesos bajos en grasa. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 16 (22), 58-66 <https://www.redalyc.org/pdf/3826/382679034009.pdf>
- Chacón-Villalobos, A., Pineda-Castro, M.L. y Jiménez-Goebel, C. (2015). Características fisicoquímicas y sensoriales de helados de leche caprina y bovina con grasa vegetal. *Agronomía Mesoamericana*, 27 (1), 19-36. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v27i1.21875>
- Chacón-Villalobos, A. y Mora-Valverde, D. (2017). Caracterización sectorial de la caprinocultura en Costa Rica. *Nutrición Animal Tropical*, 11 (2), 23-60. <https://doi.org/10.15517/nat.v11i2.31653>
- Chacón-Villalobos, A. y Mora-Valverde, D. (2019). Caracterización técnica, productiva y comercial de las MYPYMES lácteas caprinas en Costa Rica. *Nutrición Animal Tropical*, 13 (2), 20-53. <https://doi.org/10.15517/nat.v13i2.38751>

- Chauhan, S., Powar, P. y Mehra, R. (2021). A review on nutritional advantages and nutraceutical properties of cow and goat milk. *International Journal of Applied Research*, 7 (10), 101–105. <https://doi.org/10.22271/allresearch.2021.v7.i10b.9025>
- Ching-Miranda, M. (2016). Propuesta de un plan de mercadeo para la línea de productos de limpieza y sanitización para la industria lechera, Milky Clean. Tesis Maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/f9161618-4349-4c20-9e23-26fcf1836bb1/content>
- Coetzee, K. (2014). The World Dairy Situation. *The Dairy Mail*, 21 (1), 15–17.
- Darnay, L., Králik, F., Oros, G., Koncz, Á. y Firtha, F. (2017). Monitoring the effect of transglutaminase in semi-hard cheese during ripening by hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 196, 123-129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.020>
- Draaiyer, J., Dugdill, B., Bennett, A. y Mounsey, J. (2009). Milk testing and payment systems: resource book, a practical guide to assist milk producer groups. Food and Agriculture Organization. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i0980e>
- El-Kiyat, W., Laurenthia, E., Michaela, J. y Pari, R. (2021). Recent advances in the use of transglutaminase in cheese production. *Journal on Science & Technology for Development*, 38 (2), 83–88. <https://doi.org/10.29037/ajstd.675>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2025. Portal lácteo. <https://www.fao.org/dairy-production-products/production/dairy-animals/es>
- Ferraz, A. R., Pintado, C. S., y Serralheiro, M. L. (2024). A global review of cheese colour: Microbial discolouration and innovation opportunities. *Dairy*, 5(4), 768-785. <https://doi.org/10.3390/dairy5040056>
- Ferreiro, T. y Rodríguez-Otero, J. L. (2018). Evolution and distribution of phospholipids in cheese and whey during the manufacturing of fresh cheese from cows' milk. *International Journal of Dairy Technology*, 71 (3), 820–823. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12499>

- Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M. y McSweeney, P. L. (2016). *Fresh Cheese Products: Principles of Manufacture and Overview of Different Varieties*. En *Fundamentals of Cheese Science* (Capítulos 14 y 16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7681-9_16
- García-Gómez, B., Vázquez-Odériz, L., Muñoz-Ferreiro, N., Romero-Rodríguez, Á., y Vázquez, M. (2019). Interaction between rennet source and transglutaminase in white fresh cheese production: Effect on physicochemical and textural properties. *Food Science and Technology*, 113, 108279. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108279>
- García-Gómez, B., Vázquez-Odériz, L., Muñoz-Ferreiro, N., Romero-Rodríguez, Á., y Vázquez, M. (2020). Rennet type and microbial transglutaminase in cheese: Effect on sensory properties. *European Food Research and Technology*, 246, 513–526. <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03418-6>
- Gharibzahedi, S. M. T., Koubaa, M., Barba, F. J., Greiner, R., George, S., y Roohinejad, S. (2018). Recent advances in the application of microbial transglutaminase crosslinking in cheese and ice cream products: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 2364–2374. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.115>
- Gaspar, A.L.C. y Pedroso de Góes-Favoni S. (2015). Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: a review. *Food Chemistry*, 171, 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.019>
- Granados, L. y Álvarez, C. (2007). Estudio técnico de la denominación de origen del queso Turrialba. Disponible en: <https://www.fao.org/fileadmin/templates/olq/documents/costarica/ppp/Miercoles/documentacion/EstudioTecnico.pdf>
- Ibrahim, O. A., Nour, M. M., Khorshid, M. A., El-Hofi, M. A., El-Tanboly, E. S. E. y Abd-Rabou, N. S. (2017). UF-white soft cheese cross-linked by rosemary transglutaminase. *International Journal of Dairy Science*, 12 (1), 64–72. <https://doi.org/10.3923/ijds.2017.64.72>
- IBM (International Business Machines) Corporation. 2017. IBM SPSS Statistics (25) (Software). <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>

- Kaczyński, Ł. K. (2024). Analysis of water activity and gloss of stored goat cheeses according to consumer preferences and tastes. *Foods*, 13(23), 3789. <https://doi.org/10.3390/foods13233789>
- Lumivero. (2024). XLSTAT 2024.3 (Software). <https://www.xlstat.com/es/>
- Malavassi, P., Chacón, A., Víquez, D. y Cordero, M. (2023). Características fisicoquímicas y sensoriales del dulce de leche caprino con inclusión de amaretto. *Agronomía Mesoamericana*, 34 (2), 51879. <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51879>
- Miloradovic, Z., Miocinovic, J., Kljajevic, N., Tomasevic, I., y Pudja, P. (2018). The influence of milk heat treatment on composition, texture, colour and sensory characteristics of cows' and goats' quark-type cheeses. *Small Ruminant Research*, 169, 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.09.012>
- Miwa, N. (2020). Innovation in the food industry using microbial transglutaminase: Keys to success and future prospects. *Analytical Biochemistry*, 597. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2020.113638>
- Monsalve, R., Sanchez-Soto, K., Chica, J., Camaño, J. y Vega-Castro, O. (2022). Interaction between phospholipase and transglutaminase in the production of semi-soft fresh cheese and its effect on the yield, composition, microstructure, and textural properties. *LWT- Food Science and Technology*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112722>
- Nájera, R. X. (2019). Evaluación del efecto de la concentración de proteína en la materia prima para la elaboración de queso fresco sobre las características fisicoquímicas, la percepción sensorial de los consumidores y el rendimiento del producto final a nivel piloto e industrial. Tesis Grado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/10197>
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) y FAO (Food and Agriculture Organization). (2019). Dairy and dairy products. https://www.fao.org/3/CA4076EN/CA4076EN_Chapter7_Dairy.pdf

- Özer, B., Hayaloglu, A., Yaman, H., Gürsoy, A. y Sener, L. (2013). Simultaneous use of transglutaminase and rennet in white-brined cheese production. *International Dairy Journal*, 33 (2), 129-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.02.001>
- Pacheco, M. (2018). Determinación de la concentración mínima de cloruro de sodio que se puede reducir en un queso fresco sin que sea perceptible para los consumidores utilizando un umbral de diferencia y su efecto sobre el desuerado y perfil de textura. Tesis Grado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/5974>
- Park, Y. W. y Haenlein, G. F. W. (2013). *Milk and Dairy Products in Human Nutrition: Production, Composition and Health*. Wiley-Blackwell. <https://www.wiley.com/en-us/Milk+and+Dairy+Products+in+Human+Nutrition%3A+Production%2C+Composition+and+Health-p-9781118534205>
- Pauta, A. S. (2015). Calibración y validación del equipo Milkoscan FT1 para la determinación de parámetros fisicoquímicos en leche cruda en la Industria de Lácteos San Antonio C.A. Tesis Grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c63fdaf4-b3a5-425d-8bd5-cc33d606672c/content>
- Pham, T.-H., Pham, K. C., Huynh, A. T., Le Thi, N. U., y Trinh, K. S. (2021). Effect of transglutaminase on quality properties of fresh cheese. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 8(4), 44–53. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.04.006>
- Queiroga, R., Santos, B., Gomes, A., Monteiro, M. J., Teixeira, S. M., De Souza, E. L., Pereira, C. J. y Pintado, M. M. (2013). Nutritional, textural and sensory properties of Coalho cheese made of goats', cows' milk and their mixture. *LWT - Food Science and Technology*, 50 (2), 538–544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.011>
- Quirós, M. C., Chacón, A., Pineda, M. L. y Alfaro-Álvarez, I. (2023). Características fisicoquímicas y sensoriales de chocolates de leche caprina y bovina. *Agronomía Mesoamericana*, 34 (1), 49092. <https://doi.org/10.15517/am.v34i1.49092>

- Ramírez, C. y Vélez J.F. (2012). Quesos frescos: propiedades, métodos de determinación y factores que afectan su calidad. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 2 (6), 131-148.
- Razeghi, F. y Yazdanpanah, S. (2020). Effects of free and encapsulated transglutaminase on the physicochemical, textural, microbial, sensorial, and microstructural properties of white cheese. *Food Science and Nutrition*, 8 (7), 3750-3758. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1663>
- Rodríguez, Y. y Vargas, D. (2016). Efecto de la adición de la enzima transglutaminasa en el rendimiento del queso fresco semiduro. Tesis Grado, Universidad Técnica Nacional, Atenas, Costa Rica. <https://repositorio.utn.ac.cr/items/c51a51ce-2cc8-4b10-b520-7171c48feb3>
- Romeih, E. y Walker, G. (2017). Recent advances in microbial transglutaminase and dairy application. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.015>
- RTCA (Reglamento Técnico Centro Americano). (2017). Alimentos. Criterios Microbiológicos para la Inocuidad de los Alimentos. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 67.04.50:17. 1ra Revisión.
- Santana, A. A., Pernía, L. A. y Santana, D. A. (2015). Bases matemático-nutricionales e históricas del Cuadro de Pearson como método de ajuste de raciones para rumiantes. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49 (3), 279-288. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2079-34802015000300002
- Sant'ana, A., Bezerril, F., Madruga, M., Batista, A., Magnani, M., Souza, E. y Queiroga, R. (2013). Nutritional and sensory characteristics of Minas fresh cheese made with goat milk, cow milk, or a mixture of both. *Journal of Dairy Science*, 96, 7442-7453. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6915>
- Schloss, K. B., Lessard, L., Racey, C. y Hurlbert, A. C. (2017). *Modeling color preference using color space metrics*. Vision Research, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.07.001>

- Skapetas, B. y Bampidis, V. (2016). Goat production in the World: Present situation and trends. *Livestock Research for Rural Development*, 28, 200. <http://www.lrrd.org/lrrd28/11/skap28200.html>
- Stephenson, R. C., Ross, R. P., y Stanton, C. (2021). Carotenoids in milk and the potential for dairy-based functional foods. *Foods*, 10(6), 1263. <https://doi.org/10.3390/foods10061263>
- Vergara-Álvarez, W., Arteaga-Márquez, M. y Hernández-Ramos, E. J. (2018). Sensory acceptance and shelf life of fresh cheese made with dry bromelain extract as coagulating agent. *Revista DYNA*, 86 (210), 270-275. <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.76949>
- Zhi, N., Zong, K., Thakur, K., Qu, J., Shi, J., Yang, J. y Wei, Z. (2017). Development of a dynamic prediction model for shelf-life evaluation of yogurt by using physicochemical, microbiological, and sensory parameters. *CyTA - Journal of Food*, 16 (1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1336572>