

# EVALUACIÓN DE LA ACIDIFICACIÓN CON ÁCIDOS ORGÁNICOS Y CULTIVOS LÁCTICOS EN LA ELABORACIÓN DE QUESO OAXACA: UN ESTUDIO EXPLORATORIO

## EVALUATION OF ACIDIFICATION WITH ORGANIC ACIDS AND STARTER CULTURES IN OAXACA CHEESE PRODUCTION: AN EXPLORATORY STUDY

López Méndez, E. M.<sup>1\*</sup>, Diego Estudillo, O.<sup>1</sup>, Bravo Aguirre, A. G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Tecnología de Alimentos, Prolongación Reforma 168, Izúcar de Matamoros, C.P. 74420, teléfono: 243 436 3896. Puebla, México.

\*Autor de correspondencia: ericklopez.mendez@gmail.com

**Recibido:** 30/abril/2026

**Aceptado:** 19/junio/2026

### RESUMEN

El queso Oaxaca es un queso de pasta filata que requiere una acidificación controlada para desarrollar su textura característica. El proceso tradicional (6-8 h) es lento y limita su productividad. El objetivo fue evaluar la efectividad de la acidificación con ácidos orgánicos (acético, láctico, cítrico) y de cultivos lácticos en leche pasteurizada, en comparación con el proceso natural en leche cruda, como alternativas para estandarizar su elaboración. Se analizaron el pH, la acidez titulable (°D), el tiempo de proceso, el rendimiento y la capacidad de estirado (escala 0.0 a 4.0). La acidificación natural alcanzó pH 5.11 y 38°D en 6.4 h, obteniendo un queso elástico con rendimiento del 10% y estirado 4.0/4.0. Los cultivos lácticos redujeron el tiempo a 4 h, con calidad aceptable (estirado 3.0/4.0) pero con menor rendimiento (5%). Los ácidos orgánicos redujeron drásticamente la acidificación (<1h), pero no lograron un queso con capacidad elástica; el ácido láctico al 0.30% mostró un rendimiento aceptable (8%) pero estirado deficiente (1.0/4.0). Se concluye que la acidificación natural sigue siendo el método más confiable para obtener queso Oaxaca tradicional, aunque con mayor tiempo de proceso. Los cultivos lácticos son una alternativa viable para la leche pasteurizada, pero requieren optimización. La acidificación directa con ácidos

orgánicos compromete de manera irreversible la estructura de la caseína, lo que impide la formación de hebras, independientemente del rendimiento obtenido. La velocidad de acidificación se confirma como un factor crítico de calidad.

**Palabras clave:** *Pasta filata, Acidificación, Ácidos orgánicos, Cultivos lácticos, Calcio.*

## ABSTRACT

Oaxaca cheese is a pasta filata cheese that requires controlled acidification to develop its characteristic texture. The traditional process (6-8 h) is low and limits productivity. This study evaluated the effectiveness of acidification using organic acids (acetic, lactic, citric) and of starter cultures in pasteurized milk, compared to the natural process in raw milk, as alternatives to standardize its production. pH, titratable acidity ( $^{\circ}\text{D}$ ), processing time, yield, and stretching capacity (0 to 4 scale) were analyzed. Natural acidification reached pH 5.11 and  $38^{\circ}\text{D}$  in 6.4 h, producing an elastic cheese with 10% yield and a stretching score 4.0/4.0. Starter cultures reduced processing time to 4 h, yielding acceptable quality (stretching 3.0/4.0) but lower yield (5%). Organic acids drastically reduced acidification time ( $<1$  h) but failed to produce an elastic cheese; 0.30% lactic acid showed acceptable yield (8%) but poor stretching capacity (1.0/4.0). It is concluded that natural acidification remains the most reliable method for obtaining traditional Oaxaca cheese, although with longer processing time. Starter cultures are a viable alternative for pasteurized milk but require optimization. Direct acidification with organic acids irreversibly compromises casein structure, which prevents strand formation, regardless of the yield obtained. Acidification rate is confirmed as a critical quality factor.

**Key words:** *Pasta filata, Acidification, Organic acids, Starter cultures, Calcium.*

## INTRODUCCIÓN

El queso Oaxaca es un queso mexicano de pasta filata (hilada) caracterizado por una textura fibrosa y elástica (Villegas de Gante, 1993; González-Córdova, 2016). La elaboración tradicional de este tipo de queso utiliza la leche cruda (sin pasteurizar) que se mantiene en reposo por un periodo de 6 a 8 horas a temperatura ambiente, generalmente, para obtener una acidificación natural donde la microbiota nativa de la leche reduce gradualmente el pH hasta alcanzar valores de 5.1-5.4,

condición necesaria para que la cuajada adquiriera plasticidad y pueda estirarse formando hebras (Villatoro-Juárez, 1999; Aguilar-Uscanga et al., 2006; De Oca-Flores et al., 2009; Mayen, 2025). La microbiota nativa de la leche bronca utilizada en la elaboración artesanal de queso Oaxaca está dominada por bacterias ácido-lácticas de las cuales se han identificado 72.1% que corresponden al género *Lactococcus* y el 27.9% a *Lactobacillus* con alta capacidad acidificante (Castro-Castillo et al., 2013). Estudios recientes han aislado y caracterizado estas cepas, proponiendo su uso como cultivos iniciadores para producción industrial (Caro et al., 2020; Coelho et al., 2022). Dias-Morales et al. (2023) evaluaron un queso doble crema colombiano y encontraron que la adición de cultivo autóctono redujo significativamente el crecimiento de coliformes prolongando la vida útil sin afectar la aceptación sensorial. Esto respalda la viabilidad de emplear cultivos lácticos estandarizados en la elaboración de queso Oaxaca (Gürmeriç et al., 2024). A pH ligeramente ácido (6.4-6.2) la red de partículas de paracaseína en la cuajada está muy abierta, pero con pH bajos (5.8 a 5.1) aumenta la fusión de partículas de paracaseína, produciendo una red tridimensional cerrada que favorece el fundido de la hebra (Aguilar-Uscanga et al., 2006). Este proceso gradual permite una desmineralización controlada de la caseína, generando la plasticidad necesaria para el estirado y formación de hebras (Fox, 2017). El tipo de ácido orgánico empleado puede afectar significativamente la composición química, textura, sabor y color, obteniendo quesos con alto contenido de humedad (Aguilar-Uscanga et al., 2006). Este queso, junto con el Mozzarella, el Asadero y el Provolone, pertenece a la familia de quesos que requieren un proceso de acidificación controlada para desarrollar su funcionalidad característica (Villegas de Gante, 2004).

Si bien este método produce un queso de alta calidad, su prologado tiempo de proceso (10-15 h) limita la productividad a nivel industrial y artesanal (Morales-Celaya et al., 2012). Como alternativa, se han propuesto dos estrategias principales: el uso de cultivos lácticos estandarizados (que aceleran en menor grado el proceso) y la acidificación directa con ácidos orgánicos que, reducen drásticamente los tiempos (Villatoro-Juárez, 1999; Aguilar-Uscanga et al., 2006). Aldo-Hernández et al., (2010) exploraron el uso de leches ácidas previamente fermentadas para la elaboración de quesos de pasta hilada, obteniendo resultados prometedores en la reducción del tiempo de proceso. Sin embargo, existe evidencia limitada sobre el impacto de estos métodos en las características finales del queso Oaxaca, particularmente en su capacidad de estirado y rendimiento (Aguilar-Uscanga et al., 2006).

A pesar de que en la literatura se reportan resultados contradictorios sobre la efectividad de los ácidos orgánicos para producir quesos de pasta dilata (Guinee et al., 2002; Ramírez-Navas et al., 2010), existen pocos estudios comparativos sistemáticos que evalúan estos métodos específicamente para queso Oaxaca. Morales-Celaya et al. (2012) documentaron el efecto de la pasteurización y el método de acidificación en la microestructura del queso, pero no profundizaron en el impacto sobre la capacidad de estirado y el rendimiento. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar, en condiciones de taller, la acidificación con ácidos orgánicos (acético, láctico y cítrico) y/o con cultivos lácticos frente a métodos tradicionales, analizando no solo la eficiencia del proceso sino, la calidad y funcionalidad del producto final.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materias primas

Para la elaboración del queso Oaxaca se utilizó leche cruda de vaca proveniente de 2 productores locales del municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla. Se empleó cuajo microbiano Cuamix ® (CHR Hansen, México), cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) y como acidulantes: ácido acético (99%; Meyer, México), ácido láctico (88%; Hebbe, México), ácido cítrico (Baker, México). Para la fermentación láctica se emplearon cultivos lácticos de inoculación directa 5 DCU (Danisco, CHOOZIT®, MA 4002, *Lactococcus lactis subsp. lactis*, *Lactococcus cremoris subsp. cremoris*, *Streptococcus salivarius subsp. thermophilus*).

### Diseño experimental

Se implementó un diseño experimental completamente al azar para evaluar el efecto de acidificación sobre las variables de respuesta. Cada tratamiento se realizó por duplicado ( $n=2$ ), con una unidad experimental de 1 L de leche para cada ensayo. El Cuadro 1 resume los tratamientos evaluados.

Se evaluó un total de 10 condiciones experimentales con 2 réplicas cada una a temperatura de 30°C para el tratamiento natural y 35°C para los demás ensayos. Los ácidos orgánicos se agregaron a la leche a diferente volumen de solución (1 a 10 ml) dependiendo del ácido y su concentración hasta alcanzar un pH ácido objetivo. Para el empleo de los cultivos lácticos (CL), se pesó una cantidad entre 0.025 y 0.027 g y se disolvió en una solución madre de 50 ml de leche pasteurizada a 40°C. Posteriormente, las soluciones madres fueron incubadas por media hora a 40 min antes de agregar a la unidad experimental.

**Cuadro 1.** Tratamientos de acidificación evaluados.

Grupo	Tratamiento	Concentraciones evaluadas	Código
Control positivo	Natural (leche bronca)	—	LBNP
Control biológico	Cultivo láctico	5 DCU	LPCL
Ácidos orgánicos	Ácido acético	0.16, 5.0, 10.0% (v/v)	LPAA-016, LPAA-5 y LPAA-10
	Ácido cítrico	0.14, 0.16, 0.33% (p/v)	LPAC-014, LPAC-016 y LPAC-033
	Ácido láctico	0.30, 0.40% (v/v)	LPAL-030 y LPAL-040

**Fuente:** elaboración propia.

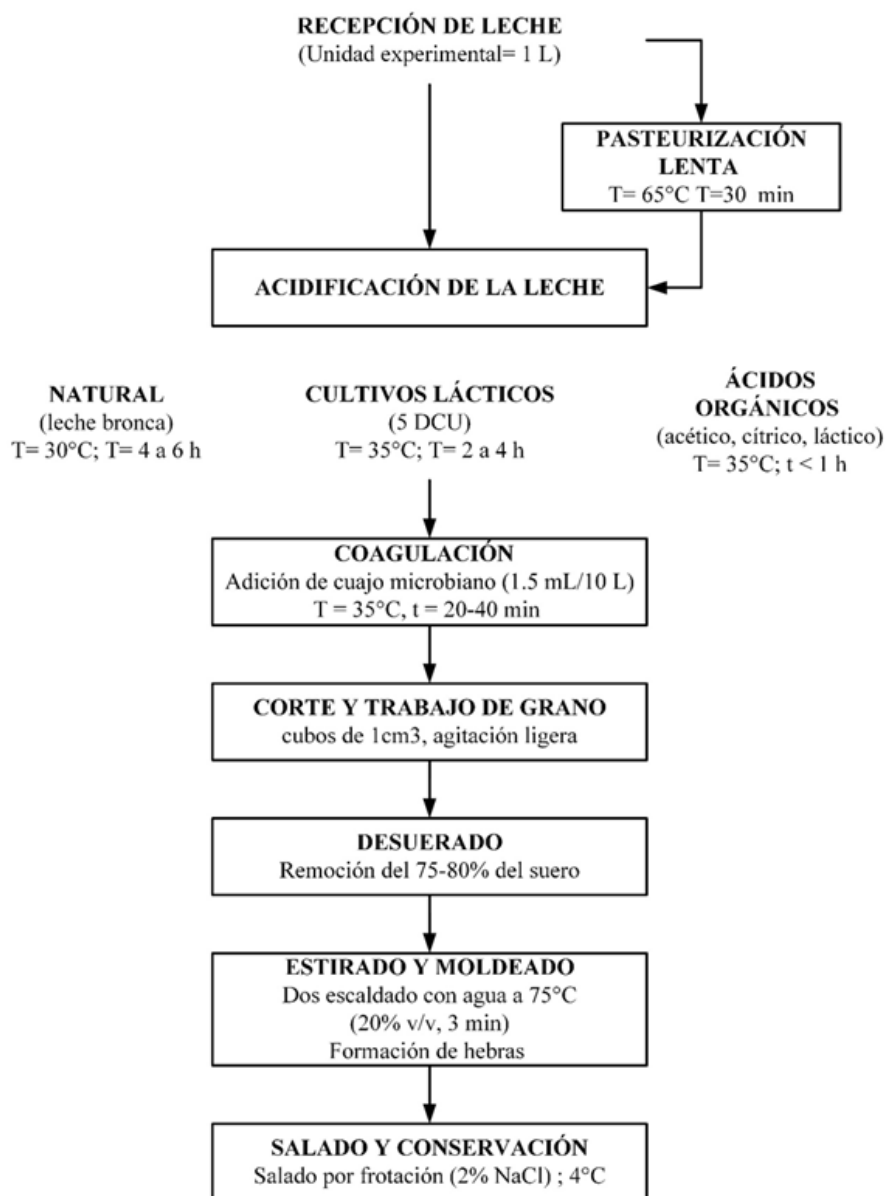
### Proceso de elaboración del queso Oaxaca

Se siguió el diagrama de flujo estandarizado para queso Oaxaca (Figura 1), basado en adaptaciones de métodos tradicionales y reportes previos (Aguilar-Uscanga et al., 2006; De Oca-Flores et al., 2009; Morales-Celaya et al., 2012). Para todos los tratamientos, excepto LBNP (Leche Bronca No Pasteurizada), se aplicó pasteurización lenta (63°C/30 min). A la leche pasteurizada se agregó CaCl<sub>2</sub> (0.02% p/v) para restaurar el equilibrio mineral. Los ácidos orgánicos se diluyeron en 100 ml de agua destilada y se añadieron gradualmente bajo agitación constante hasta alcanzar el pH objetivo (5.1 a 5.4). Para la coagulación se utilizó cuajo microbiano (1.5 mL/10 L leche) a 35°C. El estirado se realizó mediante tres inmersiones en agua a 75 °C (20% v/v, 3 min cada una) amasando la pasta hasta su total integración para después estirlarla poco a poco hasta alcanzar una longitud  $\geq$  a 30 cm sin que se rompa. La tira de queso obtenida se deja enfriar en agua helada por unos 10-20 min. El salado fue por frotación (2% NaCl p/p).

### Determinaciones analíticas

Se evaluó el pH y acidez titulable (ácido láctico como principal ácido) antes y después de la coagulación. El pH se determinó con el uso de un potenciómetro portátil (TEKCOPLUS, China) a  $27 \pm 4$  °C. La acidez titulable medida en grados Dornic se determinó por el método descrito por Villegas de Gante (2009) utilizando solución NaOH al 0.1 N y fenolftaleína como indicador hasta un color rosado tenue persistente. La cantidad de muestra utilizada fue de 9 ml. Todas las determinaciones fueron realizadas por duplicado. Los métodos se basaron en la normativa nacional aplicable NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018 y NMX-F-/33-COFOCALEC-2013 como referencia para queso Oaxaca, y en la ISO 26323:2009 para la medición de la actividad acidificante de los cultivos lácticos.

**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso de elaboración de queso Oaxaca empleando en el estudio.



*Fuente. Elaboración propia.*

Las variables de respuesta fueron: el tiempo establecido desde la adición del acidulante/cultivos lácticos hasta alcanzar el punto óptimo de estirado (después del desuerado). En el caso de LBNP, desde que se deja en reposo. El rendimiento, que se calculó como  $(\text{kg queso} / \text{kg de leche}) * 100$ . La capacidad de estirado se evaluó cualitativamente por personal del taller de lácteos y cárnicos mediante una escala de 0 a 4 donde 0 = nulo, sin hebra y 4 = excelente, hebra >30 cm elástica.

### Análisis estadístico

Los datos se analizaron con el software Minitab versión 21. Se realizó un ANOVA de una vía para cada variable de respuesta, considerando el tratamiento como factor independiente. Las diferencias entre medias se identificaron con la prueba *post-hoc* de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). Se verificaron los supuestos de normalidad (Anderson-Darling) y homogeneidad de variantes (Levene).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento general de los tratamientos

Se evaluaron ocho tratamientos de acidificación representativos (Cuadro 2), seleccionados a partir de los diez tratamientos iniciales después de eliminar aquellos con comportamientos redundantes o extremos; los Tratamientos con Leche Pasteurizada y Ácido Acético como acidulante (LPAA-014 y LPAA0160). El Cuadro 2 resume los parámetros fisicoquímicos clave, el rendimiento y la calidad de estirado para cada tratamiento.

**Cuadro 2.** Resultados de la determinación de parámetros fisicoquímicos, rendimiento y calidad de estirado por tratamiento (media  $\pm$  DE).

Clave <sup>1</sup>	Tiempo (min)	pH acidificación	Rendimiento (%)	Calidad de estirado (0-4)
LBNP	382.5 $\pm$ 7.5 a	5.11 $\pm$ 0.0 c	10 $\pm$ 1.0 a	4.0 $\pm$ 0.0 a
LPCL	245 $\pm$ 7.1 b	5.30 $\pm$ 0.1 b	5.0 $\pm$ 0.4 b	3.0 $\pm$ 0.0 a
LPAA-016	42.5 $\pm$ 3.5 c	5.00 $\pm$ 0.0 c	2.0 $\pm$ 0.3 c	0.0 $\pm$ 0.0 b
LPAA-5	20 $\pm$ 1.4 de	5.67 $\pm$ 0.0 a	3.0 $\pm$ 0.6 bc	0.0 $\pm$ 0.0 b
LPAA-10	21 $\pm$ 1.4 d	5.26 $\pm$ 0.0 b	2.0 $\pm$ 0.4 c	0.0 $\pm$ 0.0 b
LPAC-033	3 $\pm$ 0.0 f	3.94 $\pm$ 0.0 d	2.0 $\pm$ 0.4 c	0.0 $\pm$ 0.0 b
LPAL-030	6.5 $\pm$ 2.1 def	5.25 $\pm$ 0.0 b	8.0 $\pm$ 0.8 a	1.0 $\pm$ 0.5 b
LPAL-040	4.5 $\pm$ 0.7 ef	5.03 $\pm$ 0.0 c	5.0 $\pm$ 0.6 b	0.0 $\pm$ 0.0 b

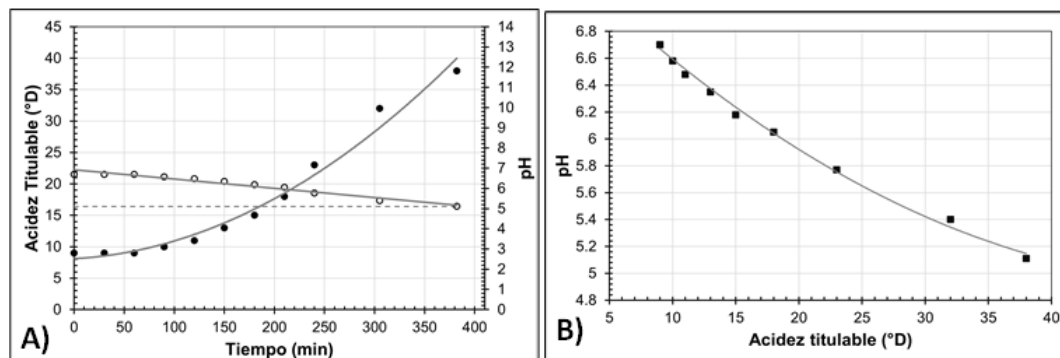
**Nota:** <sup>1</sup>LBNP= Leche bronca no pasteurizada; LPCL= Leche pasteurizada con cultivos lácticos; LPAA= Leche pasteurizada con ácido acético (0.16, 5 y 10%); LPAC=Leche pasteurizada con ácido cítrico (0.33%); LPAL= Leche pasteurizada con ácido láctico (0.30 y 0.40%). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas (Tukey,  $p<0.05$ ). **Fuente:** *Elaboración propia.*

### Cinéticas de acidificación del método tradicional

La Figura 2 muestra la evolución del pH y la acidez durante la acidificación natural (LBNP). Se observa una disminución gradual del pH desde 6.7 a 5.11 en aproximadamente 6.4 h; acompañada de un incremento paralelo de la acidez desde 11 a 38°D. Este comportamiento gradual es

característico de la fermentación láctica por la microbiota nativa y representa el perfil “ideal” que los demás tratamientos no lograron replicar.

**Figura 2.** Curvas promedio de acidificación: A) Evolución del pH (◦) y de la acidez titulable



Nota: (◦) en función del tiempo. B) Comparación del pH contra la acidez titulable del tratamiento natural de acidificación. La línea punteada horizontal indica el rango de pH óptimo para el estirado (5.1-5.4) y las líneas continuas representan el modelo aplicado a los datos. Fuente: Elaboración propia.

### Análisis estadístico del proceso de acidificación para queso Oaxaca.

El Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía reveló diferencias significativas entre tratamientos para todas las variables de respuesta ( $p < 0.001$ ). El Cuadro 3 resume los resultados del ANOVA para las variables más relevantes.

**Cuadro 3.** Resumen del Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía para variables de respuesta clave.

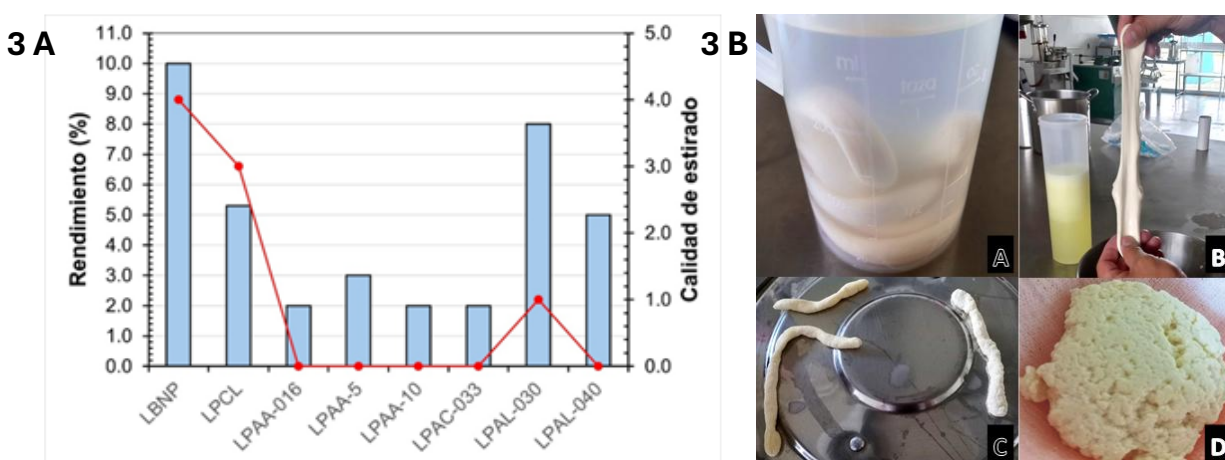
Variable de respuesta	Valor - F	Valor- p	R <sup>2</sup> (%)
Tiempo de acidificación (min)	1825.81	< 0.001	99.93
pH antes coagulación	271.57	< 0.001	99.59
Rendimiento (%)	54.16	< 0.001	98.00
Calidad de estirado (0-4)	40.89	< 0.001	97.35

**Nota:** Un valor mayor de R<sup>2</sup> (>97%) indica que el tipo de tratamiento explica la mayor parte de la variabilidad observada en los datos. **Fuente:** elaboración propia.

### Comparación de rendimiento y calidad de estirado.

La Figura 3A presenta una comparación visual entre el rendimiento (%) y la calidad de estirado (escala 0-4) para los diferentes tratamientos. Se observa una alta correlación entre ambas variables ( $r \approx 0.85$ ), lo que indicaría que el rendimiento es buen predictor de la funcionalidad del queso. En la Figura 3B se muestra el aspecto visual de los quesos obtenidos con algunos de los tratamientos. Las diferencias en textura y capacidad de estirado son evidentes.

**Figura 3.** 3A) Comparación de rendimiento y calidad de estirado por tratamiento, 3B) Productos finales obtenidos con diferentes métodos de acidificación.



*Nota:* 3A) barras azules: rendimiento (%). Línea roja con puntos: calidad de estirado (0-4). 3B) (A) LBNP: Queso Oaxaca tradicional. Hebra elástica >30 cm, color amarillo pálido. (B) LPCL: Queso Oaxaca de calidad aceptable. Hebra >20 cm, ligeramente quebradiza. (C) LPAL-030: Queso tipo fresco, hebra <10 cm, quebradizo, sin elasticidad. (D) LPAA-016: Queso tipo fresco. Sin capacidad de estirado, textura porosa. Fuente. Elaboración propia.

### Acidificación natural como método de referencia

La cinética de acidificación observada en el tratamiento natural (LBNP) muestran una correlación casi perfecta entre el tiempo de proceso y la disminución del pH ( $R^2 > 0.99$ ), lo que indica un comportamiento predecible y reproducible. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Fox et al. (2017) quienes señalan que la fermentación láctica natural, mediada por bacterias ácido-lácticas (BAL) autóctonas, producen un perfil de acidificación más suave y uniforme en comparación con la acidificación química directa. Asimismo, Villegas de Gante (1993) documentó que los quesos mexicanos de pasta hilada (Oaxaca y Asadero), requieren una acidificación lenta y controlada para desarrollar su textura característica. Este proceso gradual, que ocurre típicamente

en un periodo de 6 horas a temperatura ambiente, permite que el fosfato de calcio coloidal se solubilice progresivamente, debilitando la estructura micelar de manera controlada y facilitando el posterior amasado y estirado durante el escaldado (Ramírez-Navas et al., 2010). Por su parte, Oppen et al. (2024) demostraron que el procesamiento termo mecánico intensivo -necesario para el hilado- requiere una integridad estructural de la micela que solo se preserva con cinéticas lentas. Sus hallazgos confirman que la desmineralización controlada del calcio es un factor más determinante que el valor de pH aislado, coincidiendo con lo observado en el presente estudio.

### **Viabilidad del uso de cultivos lácticos**

Los cultivos lácticos (LPCL) representan una alternativa viable en leche pasteurizada, ya que logran una calidad de estirado aceptable (3.0/4.0) con valores de pH y acidez ( $5.3 \pm 0.1$  y  $30.5 \pm 1.6$  °D) aunque con un rendimiento menor (5%). Estos últimos valores son comparables con uno de los tratamientos realizados por Öründü & Tarakçı, en el 2021, donde utilizan cultivos lácticos antes del escaldado de la mazada de queso y después de 15 días de maduración (pH  $\approx 5.3-5.4$ ). Ello sugiere que la cinética de acidificación con cultivos lácticos fue efectiva, aunque a tiempo reducido (LPCL contra LBNP) pudo haber limitado la desmineralización completa de la caseína, afectando el rendimiento final. El bajo rendimiento al usar los cultivos lácticos puede explicarse, también, por efecto de la pasteurización de la leche sobre la retención de calcio. Morales-Celaya et al., (2012) reportaron que la pasteurización de la leche seguida de acidificación con cultivos lácticos produce un queso Oaxaca con microestructura similar al tradicional, pero, con menor contenido de calcio y rendimiento reducido, coincidiendo con lo observado en el presente estudio. La adición de  $\text{CaCl}_2$  (0.02%) en este estudio pudo no ser suficiente para compensar completamente esta pérdida. Además, Guinee et al. (2002) demostraron que la velocidad de acidificación influye directamente en la retención de humedad y grasa en quesos de pasta filata y que, acidificaciones más rápidas pueden provocar una mayor sinéresis durante el desuerado, arrastrando sólidos lácteos y reduciendo el rendimiento. Este fenómeno explicaría porque el tratamiento LPCL a pesar de alcanzar valores de pH y acidez similares a LBNP, presentó un rendimiento inferior.

A pesar del bajo rendimiento, LPCL demostró ser el único tratamiento alternativo, capaz de producir un queso con hebra (calidad 3.0/4.0), lo que lo posiciona como la mejor opción para productores que requieren pasteurizar la leche por razones de inocuidad, siempre que se optimicen las condiciones de proceso (dosis, tiempo de maduración y adición de  $\text{CaCl}_2$ ).

### **Ventajas del uso de ácidos orgánicos y subsecuente pérdida de funcionalidad**

El hallazgo más relevante de este estudio es que ninguno de los ácidos evaluados produjo un queso Oaxaca con capacidad de estirado adecuada (calidad  $\leq 1.0$  de 4.0). Aunque redujeron drásticamente el tiempo de acidificación (de 382.5 min en LBNP a 5-40 min), el producto final fue invariablemente un queso fresco, sin hebra y con textura quebradiza y/o porosa. Este comportamiento se explica por el fenómeno de desmineralización acelerada de la micela de caseína. Guinee et al. (2002) demostraron que, en queso de pasta filata, la plasticidad de la cuajada requiere una pérdida controlada de calcio coloidal, que ocurre de manera óptima cuando el pH disminuye gradualmente hasta 5.1 a 5.4. Cuando esta acidificación es demasiada rápida (como ocurre con la adición directa de ácidos orgánicos), el calcio se solubiliza de manera abrupta y masiva, provocando una desestabilización irreversible de la micela que impide la formación de la red proteica cohesiva necesaria para el estirado (Morales -Celaya et al., 2012) y formando agregados amorfos de gran tamaño (Nogueira et. al., 2023). Feng et al. (2025) señalan que la formación de fibras en quesos de pasta filata requieren no solo de un pH adecuado (5.1 a 5.4), sino también una aplicación controlada de fuerzas de cizalladura que alineen las micelas de caseína en la dirección del flujo. Esto explica, la incapacidad de formar hebras en los tratamientos con ácidos orgánicos, independientemente de la temperatura del agua (75°C) y del tiempo de amasado.

Ramírez-Navas et al. (2010), en su estudio sobre la elaboración de un quesillo colombiano (queso de pasta filata similar al Oaxaca), concluyeron que la relación entre el pH y el contenido de calcio es crítica para la capacidad de hilado. Valores de pH inferiores a 4.8 o superiores a 5.5, combinados con una pérdida de calcio, imposibilitan la formación de hebras, lo que explica el fracaso de tratamientos como AC-033 (pH = 3.98) y AA-016 (pH = 5.80) después del desuerado, en el presente estudio. Con el uso de ácido cítrico a altas concentraciones (LPAC-033) se produjo una precipitación isoeléctrica de las caseínas (pH  $\approx 4.6$ ), lo que resultó en una leche “cortada” sin posibilidad de formar cuajada funcional.

El ácido láctico a concentraciones menores de 0.3% puede ser una alternativa para este tipo de queso con un rendimiento favorable ( $\geq 10\%$ ), pero mejorando la integración de las caseínas y por ende la calidad de estirado y textura. El ácido láctico al ser un ácido orgánico fisiológicamente presente en la fermentación láctica podría tener una mayor afinidad con la caseína o un efecto menos disruptivo sobre la micela en comparación con los otros ácidos. Fox y Cogan (2004) señalaron que el ácido láctico, a diferencia de ácidos orgánicos, participa en el equilibrio mineral de

la leche de manera más compatible con la estructura micelar nativa. No obstante, el rendimiento obtenido con este ácido no es un indicador suficiente de la calidad funcional del queso Oaxaca. Villatoro-Juárez (1999) propuso la acidificación mixta (combinación de cultivos lácticos con dosis bajas de ácido láctico y estabilizantes) como una estrategia prometedora para reducir tiempos sin comprometer la calidad de queso Oaxaca.

### **Comparación con estudios previos, limitaciones y perspectivas para la optimización con ácidos orgánicos**

Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura especializada. Morales-Celaya et al. (2012) reportaron que la acidificación directa con ácidos orgánicos genera una red de caseína más frágil y porosa, incompatible con el estirado. Villegas de Gante (2004) documentó que intentos de acelerar el proceso de acidificación del queso Oaxaca con ácidos orgánicos generalmente resultan en productos de baja calidad. Las condiciones ambientales del taller (25-35°C) durante la elaboración del queso Oaxaca pudieron influir en la cinética de acidificación. Estudios recientes en quesos tipo Oaxaca han demostrado que las condiciones de calor afectan negativamente las características de la leche y el rendimiento final (Aquino et al., 2024).

En el presente estudio se presentan limitaciones que deben considerarse, entre ellas el reducido tamaño de muestra (n=2 por tratamiento) y la falta de control exhaustivo de factores como la composición de la leche cruda y la carga microbiana inicial. Futuros estudios deberían explorar el uso de citrato de sodio como estabilizante del pH y la textura (Villegas de Gante & Messner Guillen, 2015), así como el efecto de la ultrasonificación de la leche como pretratamiento para mejorar la retención de calcio y el rendimiento (Huerta-Jiménez et al., 2022).

Estrategias complementarias podrían mejorar la calidad del queso Oaxaca. Una aproximación consiste en el uso de sales fundentes como el citrato de sodio y el hexametáfosfato de sodio que, al quelar el calcio de manera controlada, favorece la desmineralización gradual de la micela de caseína, condición necesaria para la plasticidad durante el hilado (Jana et al., 2017). En el trabajo de Mizuno & Lucey (2005) demostraron que un queso de pasta filata elaborado mediante acidificación directa con la adición de citrato de sodio al 1% mejoró significativamente la capacidad de estirado. Este efecto se atribuye a una disminución controlada de los enlaces de fosfato de calcio coloidal, lo que promueve una desmineralización gradual de la micela de caseína, un requisito crítico para la plasticidad durante el hilado. Los mismos autores (Mizuno & Lucey,

2005), advierten de no usar concentraciones superiores al 3% de citrato de sodio debido a efectos contraproducentes como la disminución de la capacidad de estirado. Esta estrategia ya ha sido explorada en México; en la elaboración del queso Asadero (otro queso de pasta filata), la adición de citrato de sodio demostró ser un factor clave para obtener las características de textura deseada (Villegas de Gante & Messner Guillen, 2015).

Una segunda vía de optimización sería la incorporación de hidrocoloides, como la goma xantana o la carboximetilcelulosa (CMC). Estos biopolímeros interactúan con las micelas de caseína, y su aplicación en productos lácteos tiene como objetivo principal mejorar las propiedades físicas como la reducción de la sinéresis (pérdida de agua), la capacidad de gelificación y la estabilidad reológica, lo que podría compensar la fragilidad de la red proteica inducida por la acidificación rápida (Yousefi & Jafari, 2019).

## CONCLUSIONES

La acidificación natural sigue siendo el método de referencia para la elaboración de queso Oaxaca con características tradicionales, rendimiento adecuado (10%) y excelente capacidad de estirado (4.0/4.0). Pero, habrá que considerar un mayor tiempo de proceso (6.4 h) y una vida de anaquel limitada en su elaboración.

Los cultivos lácticos son una alternativa viable a utilizar con leche pasteurizada aun con un bajo rendimiento (5%). Se requiere una optimización de este tratamiento mediante ajuste en la dosis de cuajo, tiempo de maduración o suplementación con calcio.

No se descartan por completo el uso de ácidos orgánicos para la elaboración de queso Oaxaca. La acidificación directa reduce drásticamente el tiempo de proceso ( $< 1h$ ), pero compromete la capacidad de estirado debido a una desmineralización acelerada de la caseína. El ácido láctico al 0.30% mostró un rendimiento prometedor (8.0%) sin lograr la funcionalidad deseada (1.0/4.0). Futuros estudios deberían evaluar la combinación de este ácido con sales fundentes (como citrato de sodio) o hidrocoloides (como goma xantana), los cuales han demostrado mejorar la textura y retención de humedad en quesos de pasta filata, así como, restaurar el equilibrio mineral de la leche pasteurizada.

La velocidad de acidificación es el factor crítico que determina la calidad final del queso Oaxaca: procesos lentos ( $> 5 h$ ) preservan la integridad de la caseína mientras que, acidificaciones rápidas ( $< 2h$ ) la comprometen irreversiblemente.

## REFERENCIAS

- Aguilar-Uscanga, B. R., Montero-Lagunes, M., De la Cruz, J., Solís-Pacheco, J. R., & García, H. S. (2006). Uso de suero fermentado para reducir el tiempo de acidificación del queso Oaxaca. *Agrociencia*, 40(5), 569-575.
- Caro, I., Quinto, E. J., Fuentes, L., Alessandria, V., Cocolin, L. S., Redondo-del-Río, M. P., Mayo, B., Flórez, A.B., & Mateo, J. (2020). Characterization of *Lactococcus* strains isolated from artisanal Oaxaca cheese. *LWT*, 122, 109041. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109041>
- Castro-Castillo, G., Martínez-Castañeda, F. E., Martínez-Campos, Á. R., & Espinoza-Ortega, A. (2013). Caracterización de la microbiota nativa del queso Oaxaca tradicional en tres fases de elaboración. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 33(2), 105-109.
- Coelho, M. C., Malcata, F. X., & Silva, C. C. (2022). Lactic acid bacteria in raw-milk cheeses: From starter cultures to probiotic functions. *Foods*, 11(15), 2276.
- De Oca-Flores, E. M., Castelán-Ortega, O. A., Estrada-Flores, J. G., & Espinoza-Ortega, A. (2009). Oaxaca cheese: Manufacture process and physicochemical characteristics. *International Journal of Dairy Technology*, 62(4), 535-540. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2009.00533.x>
- Díaz-Morales, L. J., Sepulveda-Valencia, J. U., Valdes-Duque, B. E., Osorio-Tobon, J. F., & Durango-Zuleta, M. M. (2023). Effect of the autochthonous starter culture on physicochemical, microbiological, and sensory characteristics of traditional colombian double-cream cheese: A kinetic approach. *LWT*, 185, 115163.
- Feng, R., Yu, M. J., & Ye, P. F. (2025). Advances in thermal-mechanical treatment and shear-induced multiscale alterations of pasta-filata cheese, *Food Science of Animal Products*, 3, 9240116.
- Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. (2017). *Fundamentals of Cheese Science*. Springer.
- González-Córdova, A. F., Yescas, C., Ortiz-Estrada, Á. M., Hernández-Mendoza, A., & Vallejo-Cordoba, B. (2016). Invited review: artisanal Mexican cheeses. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3250-3262. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-10103>
- Guinee, T.P., Feeney, E.P., Auty, M.A.E. and Fox, P.F. (2002). Effect of pH and calcium concentration on some textural and functional properties of Mozzarella cheese. *Journal of Dairy Science*, 85:1655-1669. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74238-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74238-0)

- Gürmeriç, H. E., Şengül, M., & Erkaya-Kotan, T. (2024). Assessment of the antioxidant and ACE-inhibitory activities and some quality characteristics of Kaşar cheese produced by probiotic *Lactobacillus acidophilus*. *Food Bioscience*, 59, 103812.
- Hernández, A., Rodríguez, S., & Díaz, J. A. (2010). Utilización de leches ácidas en la elaboración de un queso fresco tipo pasta hilada. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 20(3), 23-27. <https://revcitecal.iiia.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/624>
- Hernández-Aquino, S., González-Maldonado, J., Flores-Garivay, R., Sosa-Gordillo, J.F., & Valdés-García, Y. S. (2024). Relationship of season with milk characteristics, yield, and shelf life of cheese in a hot climate. *AgroProductividad*. 61-67. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i10.2851>
- Huerta-Jiménez, M., Herrera-Gómez, B., Domínguez-Ayala, E. A., Chavez-Martinez, A., Juárez-Moya, J., Felix-Portillo, M., ... & Carrillo-Lopez, L. M. (2022). Properties of Oaxaca cheese elaborated with ultrasound-treated raw milk: physicochemical and microbiological parameters. *Foods*, 11(12), 1735. <https://doi.org/10.3390/foods11121735>
- ISO 26323:2009. Milk products – Determination of the acidification activity of dairy cultures by continuous pH, measurement (CpH). International Organization for Standardization, Geneva.
- Jana, A., Padhiyar, D., & Chavan, R. S. (2017). Role of emulsifying salts in cheese products. In *Dairy Engineering* (pp. 53-77). Apple Academic Press.
- Mayen Tolentino, N. (2025). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de quesos Oaxaca producidos en Tulancingo de Bravo, Hidalgo. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Mizuno, R., & Lucey, J. A. (2005). Effects of two types of emulsifying salts on the functionality of nonfat pasta filata cheese. *Journal of dairy science*, 88(10), 3411-3425.
- Morales-Celaya, M. F., Lobato-Calleros, C., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E. J. (2012). Effect of milk pasteurization and acidification method on the chemical composition and microstructure of a Mexican pasta filata cheese. *LWT-Food Science and Technology*, 45(2), 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.015>
- NMX-F-733-COFOCALEC-2013. Sistema Producto Leche – Alimentos - Lácteos – Queso Oaxaca – Denominación, especificaciones y métodos de prueba. COFOCALEC, México.
- Nogueira, M. H., Scudeler, L. A., Humblot, L., Doumert, B., Henriet, M., Violleau, F., Lesur, C., Delaplace, G., & Peixoto, P. P. (2023). Assessment of structures in phosphocaseinate

dispersions by A4F, NMR and SAXS: The impact of demineralization and heat treatment on viscosity. *Food Hydrocolloids*, 137, 108366.

NOM-223-SCFI/SAGARPA-2018. Queso – Denominación, especificaciones, información comercial y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación.

Oppen, D., Schmidt, F., Braitmaier, S. H., Hinrichs, J., & Weiss, J. (2024). Modelling of dynamic mastication physics of cheese/casein gels as function of milk-fat distribution and intensity of thermo-mechanical treatment. *Food Research International*, 192, 114694.

Öründü, S., & Tarakçı, Z. (2021). Effects of different starter culture applications pre-and post-scalding on the biochemical and sensory properties of pasta filata type cheeses. *LWT*, 136, 110288.

Ramírez-Navas, J. S., Londoño, M., & Rodríguez, A. E. (2010). Quesillo: queso colombiano de pasta hilada. *Tecnología Láctea Latinoamericana*, 60(1), 63-67.

Villatoro-Juárez, M. A. (1999). Elaboración de queso Oaxaca con leche pasteurizada y acidificación mixta. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Chapingo]. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México.

Villegas de Gante, A. (1993). Los quesos mexicanos. CIESTAAM. México.

Villegas de Gante, A. (2004). Dos famosos quesos de pasta hilada (filata): el Oaxaca y el Mozzarella. *Revista Carnilac Industrial*. Oct.-Nov.

Villegas de Gante, A. (2009). *Tecnología de alimentos de origen animal: manual de prácticas*. Editorial Trillas. México.

Villegas de Gante, A., & Messner Guillen, D. (2015). Use of sodium citrate in Asadero cheese-making. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7, 35-47. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.04.003>

Yousefi, M., & Jafari, S. M. (2019). Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 468-483.