

## MODELADO DEL CRECIMIENTO DE BACTERIAS ALTERANTES EN QUESO COSTEÑO SOMETIDO A TERMOSONICACIÓN

### MODELING THE GROWTH OF SPOILAGE BACTERIA IN COSTEÑO CHEESE SUBJECTED TO THERMOSONICATION

**González Cuello, Rafael<sup>1\*</sup>, Ortega Toro, Rodrigo<sup>1</sup>, Taron Dunoyer, Arnulfo<sup>2</sup>**

<sup>1\*</sup>University of Cartagena. Faculty of Engineering. Food Packaging and Shelf Life research group (FP&SL). PhD.  
Programa de Ingeniería de Alimentos. Cartagena. Colombia

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2674-2876> . Correo electrónico: [rgonzalezc1@unicartagena.edu.co](mailto:rgonzalezc1@unicartagena.edu.co)

<sup>1</sup>University of Cartagena. Faculty of Engineering. Food Packaging and Shelf Life research group (FP&SL). PhD.  
Programa de Ingeniería de Alimentos. Cartagena. Colombia

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0815-5317> . Correo electrónico: [rortegap1@unicartagena.edu.co](mailto:rortegap1@unicartagena.edu.co)

<sup>3</sup>University of Cartagena. Faculty of Engineering. Biotechnology, Food and Education Research Group (GIBAE).  
MSc. Food Engineering Program. Cartagena. Colombia.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6942-4480> . Correo electrónico: [atarond@unicartagena.edu.co](mailto:atarond@unicartagena.edu.co)

**Recibido: Noviembre 07 de 2023; Aceptado: Diciembre 15 de 2023**

#### RESUMEN

Se investigó el efecto de la termosonación a tres temperaturas en el crecimiento de bacterias alterantes en el queso Costeño. Se ajustaron recuentos bacterianos a modelos primarios como Gompertz, Huang y Buchanan. Se utilizaron ecuaciones polinómicas para describir el efecto de la termosonación en la tasa de crecimiento específico ( $\mu$ ). El error cuadrático medio (ECM), el factor de sesgo (Bf) y el factor de precisión (Af) se emplearon para evaluar el rendimiento de los modelos predictivos. El tratamiento más severo aplicado en este estudio fue la termosonación a 40 kHz a 60°C, lo que resultó en una fase de latencia aumentada ( $\lambda$ ) y una disminución de  $\mu$  de las

bacterias alterantes analizadas. Los valores de  $\mu$  obtenidos de los modelos de Gompertz y Buchanan se utilizaron para construir ecuaciones polinómicas. Estos modelos secundarios tenían factores de sesgo y factores de precisión cercanos a uno, lo que indica que los modelos polinómicos fueron capaces de describir el crecimiento microbiano en el queso. Estos resultados podrían contribuir a iniciar la aplicación de la termosonación para prolongar la vida útil del queso Costeño.

**Keywords:** Ecuación polynomial, microbiología predictiva, modelos primaries, termosonicación.

#### **ABSTRACT**

The effect of thermosonication at three temperatures on the growth of spoilage bacteria in Costeño cheese was investigated. Bacterial counts were fitted to primary models such as Gompertz, Huang, and Buchanan. Polynomial equations were used to describe the effect of thermosonication on the specific growth rate ( $\mu$ ). The mean square error (MSE), bias factor (Bf), and accuracy factor (Af) were used to evaluate the performance of predictive models. The most severe treatment applied in this study was thermosonicated at 40 kHz at 60°C, which led to an increased latency phase ( $\lambda$ ) and a decreased  $\mu$  of the spoilage bacteria analyzed. The  $\mu$  values obtained from the Gompertz and Buchanan models were employed to construct polynomial equations. These secondary models had bias factors and accuracy factors close to one, indicating that the polynomial models were able to describe microbial growth in cheese. These results could likely contribute to initiating the application of thermosonication to extend the shelf-life of Costeño cheese

<sup>3</sup>*Corresponding autor.*

[rgonzalezc1@unicartagena.edu.co](mailto:rgonzalezc1@unicartagena.edu.co)

**Keywords:** polynomial equations, predictive microbiology, primary models, thermosonication.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha habido una creciente demanda de productos alimenticios procesados que mantengan sus características sensoriales y nutricionales originales. Esta demanda ha llevado a los investigadores a explorar tecnologías alternativas, como el calentamiento óhmico, la radiación ionizante, la alta presión hidrostática, los campos electromagnéticos y la tecnología de ultrasonidos (Shen Cai et al., 2021). Los ultrasonidos, definidos como ondas sonoras con frecuencias que superan el límite de audición del oído humano, suelen producir ciclos de compresión y expansión, generando fenómenos de cavitación responsables de los efectos antimicrobianos (Huang et al., 2017). Desde el punto de vista de los costes, la tecnología de ultrasonidos es relativamente asequible en comparación con otros equipos, lo que la convierte en una opción rentable y respetuosa con el medio ambiente. Los ultrasonidos de alta potencia pueden combinarse con el calor (termo sonicación) para mejorar la inactivación microbiana y conservar los

atributos nutricionales de los productos alimenticios (Jalilzadeh et al., 2018).

El queso Costeño (CC) es un producto lácteo comercializado principalmente en la región del Caribe. Este producto se elabora tradicionalmente mediante coagulación enzimática sin ningún tratamiento térmico, por lo que su consumo es inmediato (Gutiérrez et al., 2017). Debido a su pH y alto contenido de humedad, el CC es susceptible a la contaminación microbiana, por lo que es esencial estudiar sus parámetros microbiológicos para determinar su vida útil. La microbiología predictiva se centra en comprender el impacto de los factores intrínsecos y extrínsecos, como la temperatura, el pH y la actividad del agua ( $A_w$ ), en el crecimiento/inactivación de los patógenos transmitidos por los alimentos. También puede aplicarse para predecir la vida útil microbiológica de los alimentos (Cayre et al., 2005). La modelización predictiva ofrece un medio rápido y rentable de obtener estimaciones fiables del crecimiento y la supervivencia bacterianos. Numerosos investigadores han empleado este enfoque para predecir parámetros de

crecimiento, como el aumento logarítmico de la población microbiana, la tasa de crecimiento específica ( $\mu$ ) y la fase de latencia ( $\lambda$ ) de la curva de crecimiento del microorganismo.

Los modelos predictivos han demostrado ser muy valiosos para describir el comportamiento de los microorganismos durante el proceso de fabricación de alimentos y optimizar la producción de alimentos (Possas et al., 2017). Las ecuaciones sigmoidales se utilizan con frecuencia para describir el crecimiento microbiano y ofrecen un excelente ajuste para las curvas de crecimiento microbiano. Índices estadísticos como el error cuadrático medio (ECM), el factor de sesgo (Fd) y el factor de precisión (Fa) han resultado eficaces para evaluar la calidad del ajuste del modelo (Geitenes et al., 2013; Slongo et al., 2009). La microbiología

predictiva emplea con frecuencia modelos primarios y secundarios. Los modelos primarios describen las fluctuaciones de las células microbianas a lo largo del tiempo, mientras que los secundarios dilucidan las respuestas de los parámetros de crecimiento a los cambios en las condiciones ambientales (Panikov, 2023).

El uso de la microbiología predictiva para modelizar el crecimiento microbiano en el queso costeño procesado mediante termo sonicación podría ser fundamental para evaluar los efectos de la tecnología en la vida útil del producto alimentario. Sin embargo, pocas investigaciones han empleado modelos predictivos para este fin. En consecuencia, este estudio pretende modelizar el impacto de los ultrasonidos combinados con el tratamiento térmico sobre las bacterias alterantes en el queso costeño.

## MATERIALES AND METODOS

### Preparación del inóculo

El queso Costeño (CC) se elaboró según la metodología desarrollada por Acevedo et al., (2014). Las muestras de CC se cortaron en lonchas. A continuación, los quesos en lonchas se introdujeron en bolsas de plástico estériles y se sometieron a termo sonicación utilizando un procesador de ultrasonidos Labscient Modelo KSL5120-5 (Frecuencia 40 kHz, alta potencia 120 w,

Alemania) acoplado con un sonotrodo Modelo Ezodo con una precisión:  $\pm 1,5$  dB (94 dB ref @ 1 kHz). El intervalo de temperatura osciló entre 30 y 60 °C. La tasa de crecimiento específica ( $\mu$ ) se utilizó como respuesta variable. Como control se utilizó una muestra no tratada (sin termo sonicación).

### Determinación del crecimiento

A intervalos de tiempo predeterminados, 11 g de muestras de queso se diluyeron en agua de peptona hasta  $10^{-3}$ . Las células se enumeraron por el método de recuento en placa utilizando el recuento en placa estándar (SPC) de agar. El efecto de la termosonicación se observó trazando el crecimiento de Log CFU frente al tiempo. Para garantizar la reproducibilidad de los resultados, cada experimento se realizó al menos tres veces por duplicado

### Ajuste de la curva de crecimiento

Las curvas de crecimiento se construyeron trazando el logaritmo del número de microorganismos frente al tiempo a diferentes temperaturas (30, 40, 50 y 60 °C). Se emplearon los modelos de Huang, Gompertz y Buchanan para ajustar el crecimiento de las bacterias de deterioro en CC y obtener los parámetros de crecimiento utilizados como variable de respuesta.

Para el ajuste de la curva de crecimiento, se utilizó el modelo de Gompertz:

$$\left[ Y = y_0 + (y_{max} - y_0) * \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{\mu_{max}^e}{y_{max} - y_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \right] \quad [1]$$

Donde  $y_0$ ,  $y_{max}$ , y  $y(t)$  son el logaritmo natural de la concentración bacteriana inicial, máxima y en el tiempo  $t$ ;  $\mu_{max}$  es la tasa de crecimiento y  $\lambda$  es la duración de la fase de latencia.

El modelo de Huang fue el siguiente

$$\left[ Y(t) = y_0 + y_{max} - \ln \{ e^{y_0} + [e^{y_{max}} - e^{y_0}] e^{-\mu_{max} B(t)} \} \right]$$

$$\left[ B(t) = t + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 + e^{-\alpha(t-\lambda)}}{1 + e^{-\alpha\lambda}} \right] \quad [2]$$

Donde  $y_0$ ,  $y_{max}$  y  $y(t)$  son los logaritmos naturales de la concentración bacteriana inicial, máxima y en el tiempo  $t$ ;  $\mu_{max}$  es la tasa de crecimiento y  $\lambda$  es la fase de latencia. El coeficiente de la fase de latencia es  $\alpha$  4.

La siguiente ecuación define el modelo Buchanan:

$$\left[ y = y_0, si t < \lambda \right]$$

$$\left[ y = Y y_0 + k(t - \lambda), si \lambda \leq t < t_{max} \right]$$

$$\left[ y = y_{max}, si t \geq t_{max} \right] \quad [3]$$

Donde  $t_{max}$  es el tiempo en el cual  $y$  es equivalente a  $y_{max}$

### Desarrollo del modelo secundario

Se evaluó el modelo polinómico para describir  $\mu_{max}$  en función de la temperatura de sonicación. La ecuación era la siguiente:

$$\ln(x) = a + b * T + c * T^2 \quad [4]$$

En  $x$  es el logaritmo natural de la  $\mu_{max}$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  son factores de ajuste y  $T$  es la temperatura (° C).

## Evaluación de la fiabilidad del modelo cinético de supervivencia de *L. delbrueckii*

La validación matemática del modelo polinómico construido se realizó calculando el factor de sesgo (Bf), el factor de precisión (Af) y el error cuadrático medio (MSE) (Abou-zeid et al., 2009; Ross, 1996; González et al., 2020). El Af se utilizó para evaluar el rango de variación de los valores predichos, mientras que el Bf se empleó para identificar las diferencias entre los valores predichos y medidos. Las fórmulas específicas para Af, Bf y MSE se proporcionan en las ecuaciones (5), (6) y (7), respectivamente.

$$\left[ A_f = 10^{\left( \sum \left| \frac{\log \log \mu_{predictive}}{\log \log \mu_{observed}} \right| / n \right)} \right] \quad [5]$$

$$\left[ Bf = 10^{\left( \sum \log \left( \frac{\mu_{observed}}{\mu_{predictive}} \right) / n \right)} \right] \quad [6]$$

$$\left[ MSE = \frac{\sum (observed - predicted)^2}{n} \right] \quad [7]$$

Donde, n corresponde al número de observaciones, las variables obs y pred son los valores observados y predichos respectivamente.

### Análisis de datos

Todas las curvas microbianas se realizaron por triplicado para obtener los parámetros de crecimiento. Para el ajuste de las curvas se utilizó el programa GraphPad PRISM. Las diferencias entre los parámetros de crecimiento se calcularon mediante análisis normal de varianza (ANOVA- one way) empleando el software SPSS.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Curvas de crecimiento microbiano - Modelización primaria

Se obtuvieron curvas de crecimiento de bacterias alterantes en CC sometidas a termosonicación a diferentes temperaturas (30-60°C), tal como se describe en la sección Materiales y métodos. Estas curvas se ajustaron a modelos predictivos primarios como Gompertz, Huang y Buchanan para determinar los parámetros de crecimiento: población celular inicial (Y0), población máxima (Ymax), fase de

latencia ( $\lambda$ ) y tasa de crecimiento específica ( $\mu$ ). Estos parámetros son cruciales para optimizar los procesos de fermentación microbiana. Las fases  $\lambda$  y exponencial son especialmente significativas para los microbiólogos alimentarios porque el deterioro de los alimentos suele producirse antes de que las bacterias alcancen la fase estacionaria (Cubero et al., 2019).

Y0 es un parámetro que puede controlarse ajustando el número de microorganismos incorporados a un producto alimentario

(González et al., 2020). Sin embargo, en este caso,  $Y_0$  corresponde a bacterias alterantes presentes de forma natural en la CCC, lo que provoca diferencias significativas entre los modelos y las temperaturas analizadas. La Tabla 1 ilustra los parámetros de crecimiento, revelando diferencias estadísticas entre los modelos. En particular, a medida que aumenta la temperatura, los valores de  $Y_0$  se modifican, lo que resulta especialmente evidente para los modelos de Gompertz y Buchanan. Por el contrario, no se observaron diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) entre las muestras de control (sin termosonificación) (1,03 log UFC) y las tratadas a 30, 40, 50 y 60°C cuando se empleó el modelo de Huang.

Los valores  $\lambda$  representan el tiempo que tardan los microorganismos en adaptarse a un nuevo medio de cultivo. Por lo tanto, este parámetro es útil para reducir el tiempo de fermentación en diversos alimentos fermentados. En un proceso de fermentación, el objetivo principal es potenciar el crecimiento microbiano y disminuir el tiempo de fermentación. De ahí que la ausencia o los valores bajos de  $\lambda$  sean deseables. Sin embargo, merece la pena destacar los valores negativos que aparecen en la Tabla 1 para las bacterias alterantes cultivadas a 30°C y modelizadas mediante los modelos de Gompertz y Buchanan (-12,443 min y -123,642 min,

respectivamente). Estos valores indican que ambos modelos eran inadecuados para modelizar el crecimiento microbiano con valores bajos o ausencia de  $\lambda$ .

Por el contrario, cuando se aplicó el modelo de Huang a la curva UFC vs. tiempo, se observó un aumento de los valores  $\lambda$ . Por ejemplo, entre las muestras tratadas, el valor  $\lambda$  más bajo (8,163 min) se encontró en las muestras de queso sometidas a 30°C, mientras que el valor más alto (125,58 min) se observó en las muestras tratadas a 60°C. Esto demuestra que la temperatura desempeña un papel importante en el deterioro bacteriano, siendo  $\lambda$  dependiente de la temperatura. No obstante, es esencial tener en cuenta que los ultrasonidos pueden dañar las paredes celulares y las membranas citoplasmáticas, causando disrupción (Wu et al., 2015), y pueden afectar a los componentes intracelulares (Kon et al., 2005). Una combinación de tratamiento térmico y ultrasonidos puede ser más eficaz que el tratamiento térmico o ultrasónico por sí solo (Mani et al., 2022). Gao et al., (2014) descubrieron que las suspensiones de *Enterobacter aerogenes* son más sensibles a la ultrasonificación durante la fase de crecimiento exponencial que en la fase estacionaria.

Los valores  $Y_{max}$  oscilaron entre 7,528 y 7,262 (log UFC), lo que indica sólo pequeñas diferencias significativas

( $p < 0,05$ ) entre los modelos de Gompertz, Huang y Buchanan. Además, los cambios de temperatura de 30 a 60°C bajo tratamiento con ultrasonidos no parecieron afectar a este parámetro, en consonancia con los hallazgos de Antunes-Rohling et al., (2019), que informaron de que la temperatura no tenía un efecto significativo ( $p > 0,05$ ) sobre los valores de  $Y_{max}$  para los grupos microbianos estudiados. Sin embargo, es importante señalar que estos valores de  $Y_{max}$  se alcanzaron en momentos diferentes.  $Y_{max}$  representa la concentración máxima de bacterias alcanzada al final de la fase de crecimiento logarítmico y puede ser crucial para desarrollar alimentos funcionales que contengan bacterias probióticas (Tripathi y Giri, 2014; Palabiyik et al., 2018). Se ha sugerido un límite de seguridad de 107 UFC/g para determinados productos alimenticios (Ruiz-Capillas et al., 2007).

La tasa de crecimiento específica ( $\mu$ ) está comúnmente influenciada por la disponibilidad de nutrientes, los niveles de oxígeno y la producción de metabolitos, lo que resulta en estrés ambiental (Jeanson et al., 2015; Skandamis & Jeanson, 2015). Los valores  $\mu$  más bajos se obtuvieron en las muestras de queso sonicadas a 30°C y modeladas mediante los modelos de Gompertz (0,012  $\text{min}^{-1}$ ), Huang (0,012  $\text{min}^{-1}$ ) y Buchanan (0,011  $\text{min}^{-1}$ ), mientras que los valores más altos se observaron en las muestras de control (0,029 a 0,037  $\text{min}^{-1}$ ), seguidas de las muestras sonicadas a 30°C (0,021 a 0,025  $\text{min}^{-1}$ ). Estos resultados indican que no se observaron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre los modelos utilizados. En general,  $\mu$  se vio afectado por el tratamiento de termosonicación, observándose valores similares ( $p > 0,05$ ) entre los modelos primarios, aunque estos modelos no son directamente comparables entre sí.

**Tabla 1.** Parámetros de crecimiento de bacterias alterantes a diferentes temperaturas cultivadas en queso Costeño

Tratamiento	Parametros	Gompertz	Huang	Buchanan
Control	$Y_0$ (log CFU)	0,631 <sup>a</sup>	1,03 <sup>b</sup>	0,528 <sup>a</sup>
	$\lambda$ (min)	-0,447 <sup>a</sup>	0,892 <sup>b</sup>	-20,366 <sup>c</sup>
	$Y_{max}$ (log CFU)	7,464 <sup>a</sup>	7,399 <sup>a</sup>	7,354 <sup>a</sup>
	$\mu$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0,037 <sup>a</sup>	0,031 <sup>b</sup>	0,029 <sup>b</sup>
30 °C	$Y_0$ (log CFU)	0,963 <sup>a</sup>	1,04 <sup>a</sup>	1,04 <sup>a</sup>
	$\lambda$ (min)	-12,443 <sup>a</sup>	8,163 <sup>b</sup>	-123,642 <sup>c</sup>



	$Y_{max}$ (log CFU)	7,45 <sup>a</sup>	7,353 <sup>a</sup>	7,262 <sup>a</sup>
	$\mu$ (min <sup>-1</sup> )	0,025 <sup>a</sup>	0,022 <sup>a</sup>	0,021 <sup>a</sup>
40 °C	$Y_0$ (log CFU)	0,46 <sup>a</sup>	1,03 <sup>b</sup>	-0,612 <sup>c</sup>
	$\lambda$ (min)	38,99 <sup>a</sup>	23,6 <sup>b</sup>	21,5 <sup>b</sup>
	$Y_{max}$ (log CFU)	7,509 <sup>a</sup>	7,409 <sup>a</sup>	7,445 <sup>a</sup>
	$\mu$ (min <sup>-1</sup> )	0,017 <sup>a</sup>	0,015 <sup>a</sup>	0,014 <sup>a</sup>
	$Y_0$ (log CFU)	0,611 <sup>a</sup>	1,03 <sup>b</sup>	1,03 <sup>b</sup>
50 °C	$\lambda$ (min)	22,344 <sup>a</sup>	31,509 <sup>b</sup>	18,836 <sup>c</sup>
	$Y_{max}$ (log CFU)	7,506 <sup>a</sup>	7,474 <sup>a</sup>	7,438 <sup>a</sup>
	$\mu$ (min <sup>-1</sup> )	0,018 <sup>a</sup>	0,016 <sup>a</sup>	0,016 <sup>b</sup>
	$Y_0$ (log CFU)	0,808 <sup>a</sup>	1,052 <sup>b</sup>	1,052 <sup>b</sup>
60 °C	$\lambda$ (min)	128,384 <sup>a</sup>	125,58 <sup>b</sup>	123,257 <sup>b</sup>
	$Y_{max}$ (log CFU)	7,528 <sup>a</sup>	7,417 <sup>a</sup>	7,54 <sup>a</sup>
	$\mu$ (min <sup>-1</sup> )	0,012 <sup>a</sup>	0,012 <sup>a</sup>	0,011 <sup>a</sup>

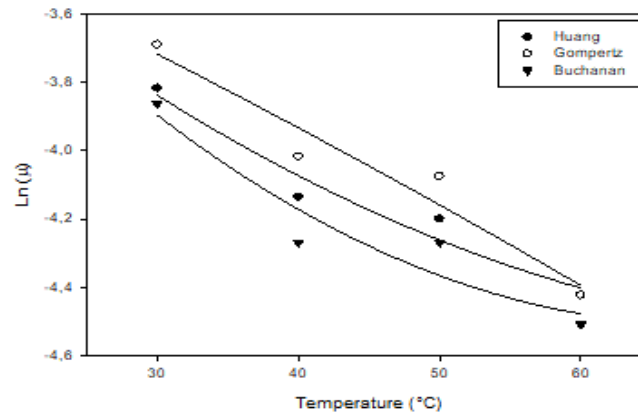
Cabe destacar que la elucidación de los parámetros de crecimiento de grupos microbianos inespecíficos es siempre una tarea complicada, ya que los microorganismos representan la suma de las curvas de crecimiento de una mezcla de bacterias diferentes. Es probable que los microorganismos aquí descritos pertenezcan a mesófilos aerobios, cuyo crecimiento se ha utilizado como indicador de la calidad microbiológica de los alimentos.

#### **Influencia de la temperatura: Modelización secundaria**

Los modelos secundarios (ecuaciones polinómicas) se construyeron trazando los valores de  $\mu$  estimados a partir de los modelos primarios frente a los cambios de temperatura; por lo tanto, se construyeron tres ecuaciones polinómicas. Cabe mencionar que los valores de  $\mu$  se transformaron en logaritmos naturales (Ln) para proporcionar un ajuste razonablemente bueno de la relación relativa a  $\mu$  y la temperatura. La figura 1 muestra la influencia de la temperatura en los valores de  $\mu$  de las bacterias alterantes estudiadas. Como se observa en la Figura 1, un aumento de la temperatura dio lugar a valores de  $\mu$  más bajos para las bacterias alterantes. Sin embargo, los modelos de

Gompertz y Buchanan dieron valores negativos para los parámetros  $\lambda$  e  $Y_0$ , lo que indica un mal ajuste de estos modelos

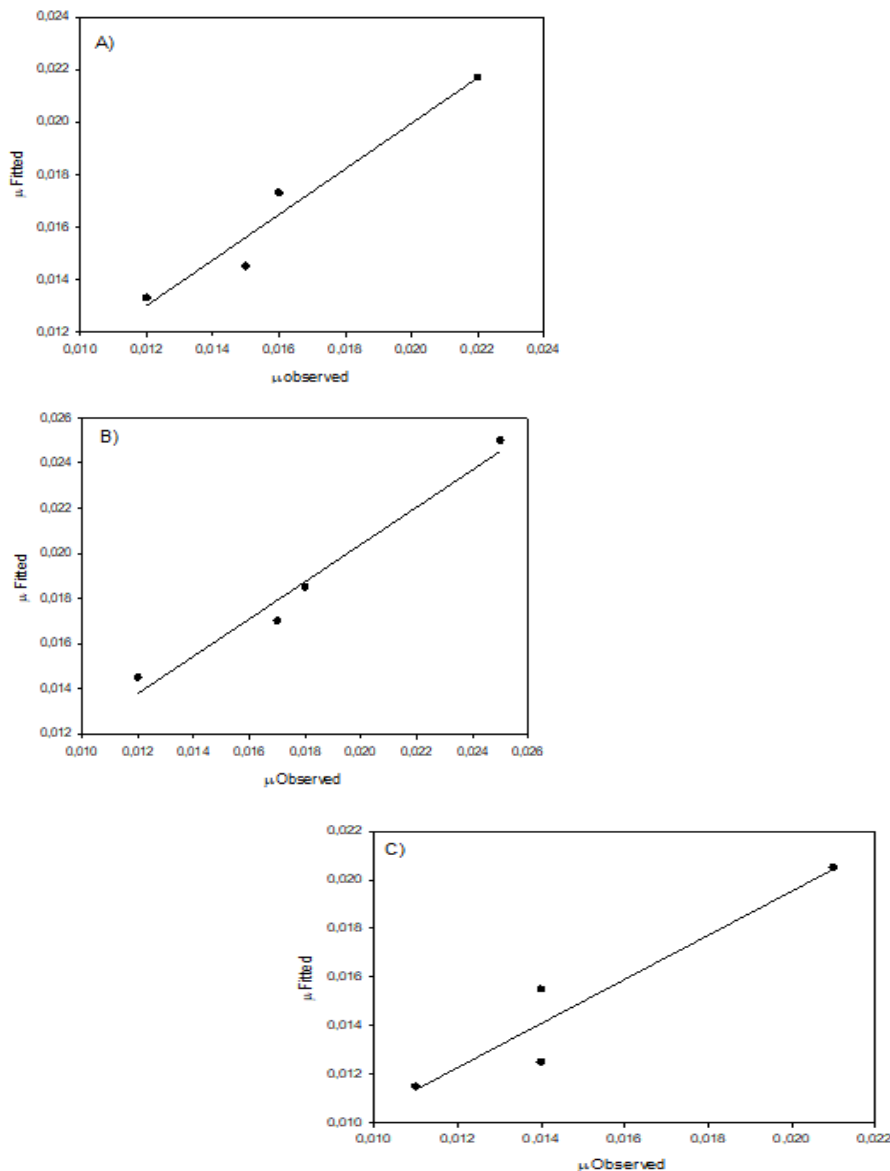
y, en consecuencia, estos parámetros se excluyeron del resto del estudio.



**Figura 1.** Efecto de la temperatura en las tasas máximas de crecimiento obtenidas a partir de modelos primarios.

Se eligieron tres ecuaciones polinómicas para describir la relación entre el logaritmo natural de  $\mu$  y la temperatura. Todas las ecuaciones proporcionaron un ajuste excelente. La bondad del ajuste fue muy alta ( $R^2 > 0,93$ ) para todas las ecuaciones

polinómicas, como puede observarse gráficamente en la Figura 1. Asimismo, para verificar la precisión de cada ecuación polinómica, se compararon los valores determinados experimentalmente con los predichos por los modelos.



**Figura 2.** Número observado y ajustado de valores  $\mu$  empleando la ecuación polinómica **A:**  $\ln(\mu) = 8E-06x^2 - 0,001x + 0,0445$ ; **B:**  $\ln(\mu) = 5E-06x^2 - 0,0008x + 0,0445$ , and **C:**  $\ln(\mu) = 1E-05x^2 - 0,0012x + 0,0475$

Los resultados pueden verse en la Tabla 2, que incluye el factor de precisión (Af), el factor de sesgo (Bf) y el error cuadrático medio (MSE), que se han utilizado con éxito para validaciones de modelos polinómicos (López et al., 2006; González et al., 2020). Af representa la suma de las

diferencias absolutas entre las predicciones y las observaciones, mientras que Bf es un factor empleado para determinar si el modelo sobrepredice o infrapredice el crecimiento microbiano (Chen et al., 2020). Un acuerdo ideal debería tener valores de uno para Af y Bf,

respectivamente, y valores de MSE cercanos a cero.

**Tabla 2.** Validación matemática del modelo secundario para describir el comportamiento de bacterias alterantes cultivadas en queso Costeño

Modelo polinómico	Af	Bf	MSE
Huang $\ln(\mu) = 8E-06x^2 - 0,001x + 0,0445$	1,033	1,033	0,001
Gompertz $\ln(\mu) = 5E-06x^2 - 0,0008x + 0,0445$	1,055	1,055	0,001
Buchanan $\ln(\mu) = 1E-05x^2 - 0,0012x + 0,0475$	1,002	1,002	0,001

Cuando los datos de  $\mu$  obtenidos a partir del modelo de Huang se utilizaron para desarrollar el modelo polinómico ( $\ln(\mu) = 8E-06x^2 - 0,001x + 0,0445$ ), se calculó un valor de Af de 1,033, un valor de Bf de 1,033 y un MSE de 0,001. Se obtuvieron resultados similares cuando los valores de  $\mu$  se obtuvieron a partir del modelo de Gompertz, con valores de 1,055, 1,055 y 0,001 para Af, Bf y MSE, respectivamente. Se obtuvieron resultados similares cuando los valores de  $\mu$  se derivaron del modelo de Gompertz, con valores de 1,055, 1,055 y 0,001 para Af, Bf y MSE, respectivamente. Cuando la ecuación polinómica ( $\ln(\mu) = 1E-05x^2 - 0,0012x + 0,047$ ) se construyó a partir de los valores de  $\mu$  calculados a partir del modelo de Buchanan, los valores de validación fueron los siguientes: Af (1,002), Bf (1,002) y MSE (0,001). Estos resultados

coinciden con los comunicados por Slongo et al. (2009), que encontraron valores similares para MSE, Bf y Af al estudiar las bacterias lácticas en jamón envasado al vacío presurizado y no presurizado (control) almacenado a 8 °C.

Un factor Bf inferior a 1,0 indica que el modelo es a prueba de fallos. Por lo tanto, el número de bacterias de deterioro indicado en este trabajo puede estar ligeramente sobreestimado debido a sus valores de Bf (>1). De acuerdo con el proceso de validación, estas ecuaciones tuvieron mejores valores de MSE que los reportados por Antunes-Rohling et al., (2019), quienes utilizaron los modelos Ratkowsky y Ratkowsky Inverso para describir la relación entre  $\mu$ ,  $\lambda$  y la temperatura de almacenamiento. Del mismo modo, Kalschne et al. (2014)

publicaron hallazgos similares al modelar el comportamiento de bacterias de ácido láctico en el jamón que contienen nisina, con valores de Af y Bf cercanos a 1 utilizando el modelo predictivo modificado de Gompertz propuesto por Zwietering et al. (1991) (Salakkam et al., 2023) Sin embargo, sus valores de EME fueron más altos que los reportados en el trabajo actual. Chen et al., (2020) calcularon valores de Af que oscilaban entre 1,4 y 4,0 para *Listeria monocytogenes* que crecen en varios tipos de mariscos.

## CONCLUSIONES

Este artículo ofrece información sobre el comportamiento de las bacterias de deterioro en el queso costeño sometido a termosonicación. La temperatura surgió como el factor más significativo que afecta los parámetros de crecimiento derivados de los modelos primarios. El tratamiento más riguroso aplicado en este estudio involucró la ultrasonicación a 40 kHz y 60°C, resultando en un aumento en  $\lambda$  y una disminución en  $\mu$ . Estos hallazgos destacan la eficacia de la tecnología de ultrasonido combinada con tratamiento térmico a 60°C para controlar los microorganismos de deterioro en el queso Costeño. Sobre la base de los datos obtenidos, se desarrollaron tres

En resumen, los datos presentados en este trabajo proporcionan una visión de la evolución de las bacterias de deterioro en CC sometidas a ultrasonido a diferentes temperaturas. Las ecuaciones polinómicas desarrolladas aquí permiten la predicción de bacterias de deterioro en este producto lácteo cuando se trata con ultrasonido a diferentes temperaturas (que van desde 30 a 60°C), lo que puede ser valioso para la industria láctea.

ecuaciones polinómicas. Aunque los modelos de Gompertz y Buchanan dieron valores negativos para  $\lambda$  y  $Y_0$ , los valores  $\mu$  se emplearon para construir ecuaciones polinómicas, facilitando la predicción de bacterias de deterioro. Cabe destacar que estos modelos polinomiales exhibieron sesgos y factores de precisión cercanos a uno, lo que indica su capacidad para describir con precisión el crecimiento microbiano en el queso. Se requieren más investigaciones para evaluar el impacto de estos tratamientos en las propiedades sensoriales, físicas y químicas del queso.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abou-zeid, K.A., Oscar, T.P., Schwarz, J.G., Hashem, F.M., Whiting, R.C., & Yoon, K.S. (2009). Development and validation of a predictive model for *Listeria monocytogenes* Scott A as a function of temperature, pH and commercial mixture of potassium lactate and sodium diacetate. *J. Microbiol and Biotechnol.*, 19, 718–726.
- Acevedo D., Jaimes J., Espitia C. (2014). Efecto de la Adición de Lactosuero al Queso Costeño Amasado. *Inf Tecnol.*, 26(2), 11-16.
- Antunes-Rohling, A., Artaiza, A., Calero, S., Halaihel, N., Guillén S., Raso, J., Álvarez, I., Cebrián G. (2019). Modelling microbial growth in modified-atmosphere-packed hake (*Merluccius merluccius*) fillets stored at different temperatures. *Food Res. Int.*, 122, 506–516
- Cayre, M. E., Garro, O., & Vignolo, G. (2005). Effect of storage temperature and gas permeability of packaging film on the growth of lactic acid bacteria and *Brochothrix thermosphacta* in cooked meat emulsions. *Food Microbiol.*, 22(6), 505–512.
- Chen, R., Skeens. J., Orsi, R., Wiedmann, M., Guariglia, V. (2020). Predicted and observed growth of *Listeria monocytogenes* in seafood challenge tests and in naturally contaminated cold smoked salmon. *International Journal of Food Microbiology*, 233, 108793.
- Gao, S., Lewis, G., Ashokkumar, M., Hemar, Y. (2014). Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: 1. Effect of growth phase and capsule properties of the bacteria. *Ultrason. Sonochem.*, 21, 446–453.
- Cubero, S., Possas, A., Valero, A., Bolívar, A., Posada, G., García, R., Zurera, G., Pérez, F. (2019). MicroHibro': A software tool for predictive microbiology and microbial risk assessment in foods. *International Journal of Food Microbiology*, 290(2), 229-236.
- Geitenes, S., Oliveira, M. F. B., Kalschne, D. L., & Sarmento, C. M. P. (2013). Modelagem do crescimento de bactérias lácticas e análise microbiológica em apresuntado e presunto cozido fatiados e embalados à vácuo. *Rev. Ciências Exat. Nat.*, 15(1), 113–133.
- González Cuello, R., Morón Alcázar, L., Pedraza Galván, K. (2020). Modeling the effect of storage temperature on the growth rate of *Lactobacillus delbrueckii* in Colombian coastal cheese. *Syl. journal*. 164 (3), 293 – 303.

- Gutiérrez C., Quintero P., Burbano I., Simancas R. (2017). Artisan Cheese Dairy Model under a Distinctive Sign in the Colombian Caribbean: The Atlantic Case. *Rev L de Invest.*, 14(1), 72-83.
- Huang, G., Chen, S., Dai, C., Sun, L., Sun, W., Tang, Y., Ma, H. (2017). Effects of ultrasound on microbial growth and enzyme activity. *Ultrasonics Sonoch.*, 37, 144–149.
- Jalilzadeh, A., Hesari, J., Peighambaroust, S., Javidipour, I. (2018). The effect of ultrasound treatment on microbial and physicochemical properties of Iranian ultrafiltered feta-type cheese. *J. Dairy Sci.*, 101, 5809–5820.
- Jeanson, S., Flourey, J., Gagnaire, V., Lortal, S., Thierry, A., (2015). Bacterial colonies in solid media and foods: a review on their growth and interactions with the microenvironment. *Front. Microbiol.* 6.
- Kalschne, D., Geitenes, S., Veit, M., Sarmiento, C., Colla, E. (2014). Growth inhibition of lactic acid bacteria in ham by nisin: A model approach. *Meat Sci.*, 98, 744–752.
- Kon, T., Nakakura, S., Mitsubayashi, K. (2005). Intracellular analysis of *Saccharomyces cerevisiae* using CLSM after ultrasonic treatments, *Nanomed. Nanotechnol. Biol. Med.* 1, 159–163.
- López, F.N.A., Quintana, M.C.D., Fernández, A.G. (2006). The use of a D-optimal design to model the effects of temperature, NaCl, type and acid concentration on *Lactobacillus pentosus* IGLAC01. *J. Appl. Bacteriol.*, 101, 913–926.
- Mani, E., Ramírez, N., Jiménez, M., López, A. (2022). Application of thermo-ultrasonic treatments for the inactivation of osmotolerant yeasts suspended in media with reduced water activity. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 179,109094.
- Palabiyik I., Rasouli P., Konar N., Said T. (2018). Novel Delivering Agent for Bioactive Compounds: Chewing Gum Bioactive Molecules in Food Springer, pp. 1- 39.
- Possas, A., Pérez, F., Valero, A., García, R. (2017). Modelling the inactivation of *Listeria monocytogenes* by high hydrostatic pressure processing in foods: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 45-55..
- Ruiz-Capillas, C., Carballo, J., & Colmenero, F. J. (2007). Biogenic amines in pressurized vacuum-packaged cooked sliced ham under

- different chilled storage conditions. *Meat Sci.*, 75, 397–405.
- Salakkam, A., Phukoetphim, N., Laopaiboon, P., Laopaiboon, L. (2023). Mathematical modeling of bioethanol production from sweet sorghum juice under high gravity fermentation: Applicability of Monod-based, logistic, modified Gompertz and Weibull models. *Electronic Journal of Biotechnology*, 64, 18-26.
- Salakov, N.S. (2023). Kinetics of microbial processes: General principles. *Encyclopedia of Soils in the Environment. Second Edition*, 1, 168-165.
- Shen Cai, J., Yu, J., Jing, Z., Hui, R., Thakur, K., Wang, S., Hu, F., Guo, J., Jun, Z. (2021). An update on the nutritional, functional, sensory characteristics of soy products, and applications of new processing strategies. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 112, 676-689.
- Skandamis, P.N., Jeanson, S. (2015). Colonial vs. planktonic type of growth: mathematical modelling of microbial dynamics on surfaces and in liquid, semi-liquid and solid foods. *Front. Microbiol.* 6.
- Slongo, A. P., Rosenthal, A., Camargo, L. M. Q., Deliza, R., Mathias, S. P., & Aragão, G. M. F. (2009). Modeling the growth of lactic acid bacteria in sliced ham processed by high hydrostatic pressure. *LWT — Food Sci. Technol.*, 42, 303–306.
- Tripathi M, Giri S (2014). Probiotic functional foods: survival of probiotics during processing and storage. *J. Funct. Foods* 9(1), 225- 241.
- Wu, T., Yu, X., Hu, A., Zhang, L., Jin, Y., Abid, M. (2015). Ultrasonic disruption of yeast cells: underlying mechanism and effects of processing parameters, *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.* 28, 59–65.