

## DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA EN CARNE DE ALPACA (*Lama pacos*) EN CONGELACIÓN

*Determination of Thermal diffusivity of Alpaca (*Lama pacos*) in freezing process*

Ancco Vizcarra, T. Huamán, N.

Universidad Nacional de Moquegua, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, Moquegua, Perú

\*Autor para correspondencia, e-mail: [nhuamanc@unam.edu.pe](mailto:nhuamanc@unam.edu.pe)

---

### RESUMEN

Las propiedades físicas y termales de los alimentos juegan un papel importante en el diseño y construcción de equipos de congelación. En este trabajo se reporta mediciones de difusividad térmica en 5 diferentes cortes anatómicos en carcasas de carne de alpaca machos y hembras de saca, durante su proceso de congelación a  $-18^{\circ}\text{C}$ . El método empleado fue el de curvas de penetración de calor en un cilindro de cobre. Los resultados obtenidos indican que los valores varían entre 8 y  $10 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Existen diferencias estadísticamente significativas entre los 5 cortes anatómicos, lo que indica que la composición, orientación del musculo, estructura del tejido y humedad influyen directamente en esta propiedad térmica. Los valores son menores a la difusividad térmica de la carne de cerdo, la cual tiene mayor contenido de humedad y tenor graso.

**Palabras clave:** Alpaca, Difusividad térmica, carne, propiedades térmicas.

### ABSTRACT

The physical and thermal properties of foods play an important role in equipment design if freezer. The goal of this research was to determine the thermal diffusivity for 5 anatomic parts of alpaca (*Lama pacos*) meat males and females during the freezing process up to  $-18^{\circ}\text{C}$ . The method employed was the heat penetration curves in one copper cylinder. The results shown that values of thermal diffusivity are between 8 and  $10 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . There are statistic differences between the 5 anatomic parts of the animals, because of muscle composition, orientation of the fibbers and moisture content. All that differences have direct influence in the thermal diffusivity. The values obtained are less than thermal diffusivity of pork meat which has major moisture and fat contents.

**Key words:** Alpaca, thermal diffusivity, meat, thermal properties.

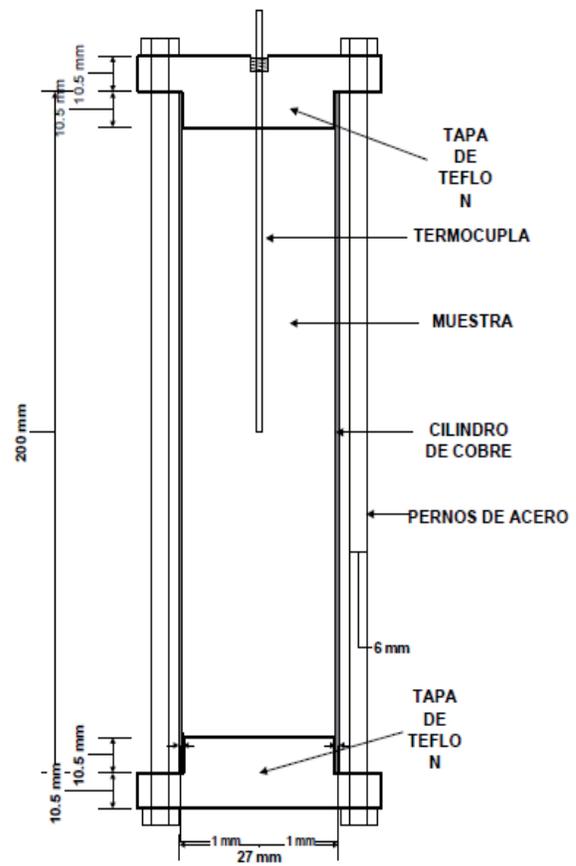
## INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de alimentos las operaciones unitarias tales como el secado, la refrigeración, la congelación, se encuentran estrechamente relacionadas a sus propiedades físicas y termales. Un alimento importante para el ser humano es la carne. En la región andina la carne de los camélidos sudamericanos, tales como la llama (*Lama glama*) y la alpaca (*Lama pacos*) juega un papel importante en las dietas por su valor nutritivo (Salva et al., 2009). La crianza de alpacas y llamas constituye una actividad de gran importancia principalmente en Perú y en Bolivia, y en menor grado en Argentina, Chile y Ecuador (Neely et al., 2001). Aproximadamente 500 mil familias campesinas dependen directamente de la actividad ganadera con camélidos sudamericanos, además de otras que se benefician indirectamente de ella. La carcasa de alpaca es el cuerpo del animal sacrificado, después de su sangría, desuello y eviscerado, separado de la cabeza, órganos genitales, y patas (Tellez, 1992). La carne de alpaca es considerada saludable debido a que su carcasa tiene un bajo contenido de grasa (0.49%) y un bajo nivel de colesterol (51mg/100g) en comparación a otras carnes rojas (Cristofanelli et al., 2005). Una vez sacrificado el animal, su conservación constituye una etapa crítica en el proceso previo a su consumo. Uno de los métodos que garantiza la mayor preservación de la calidad de la carne es la congelación (Kerry et al., 2002). La determinación del tiempo de congelación, que depende de las propiedades físicas y termales de la carne, es un parámetro importante para establecer la capacidad del sistema de congelación a emplear (Heldman, 1983).

La difusividad térmica,  $\alpha$ , mide la tasa de difusión de calor en un material que posee conductividad térmica,  $k$  [ $W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ], densidad,  $\rho$  [ $kg m^{-3}$ ] y calor específico,  $C_p$  [ $J kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ], es la menos estudiada de las propiedades térmicas de las carnes, quizás debido a la escasez de equipos comerciales destinados a tal fin. La difusividad térmica de la carne en general es sensible a su cantidad de agua, de grasa, tipo de musculo, porosidad (James and James, 2002). En la carne de alpaca, el contenido de agua de alrededor de 74% puede cambiar considerablemente debido a múltiple factores tales como la edad del animal, su régimen de alimentación (Cristofanelli et al., 2005). Así la difusividad térmica puede variar en los diferentes cortes de la carcasa y de un animal a otro (Sahin and Gülüm Sumnu, 2006). Así, el objetivo del presente trabajo de investigación es la determinación de la difusividad térmica de 5 cortes anatómicos de carne de alpaca durante el proceso de congelación para ayudar en el diseño y mejoramiento de los sistemas de conservación y de procesamiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La materia prima utilizada fue 10 kg de carne de alpaca macho (5 kg) y hembra (5 kg), clasificada como carne de saca y/o adulto entre 5 años de edad. La carne fue adquirida en el mercado local de la ciudad de Puno, Perú. El contenido de humedad fue determinado en alrededor de 70%. Este valor se encuentra cerca de los valores de humedad determinados por Cristofanelli et al. (2005). La Figura 1 (a y b), presenta el equipo especialmente armado el cual consiste en un baño térmico de agua agitado, en el cual un cilindro (hecho con un material de alta conductividad térmica) que contiene el alimento esta inmerso. El diseño tiene como base el reportado por Poulsen (1982) y Gupta (1996). El equipo consiste de un cilindro de cobre hueco de 200 mm de longitud y 27 mm de diámetro, con un espesor de pared igual a 1 mm. Los ambos extremos están tapados con un tapón hermético de teflón de 11 mm de espesor. Uno de los tapones tiene un agujero en el centro para introducir una termocupla de tipo J hasta el centro geométrico del cilindro.



**Figura 1a.** Esquema del cilindro empleado para la medición de la difusividad térmica

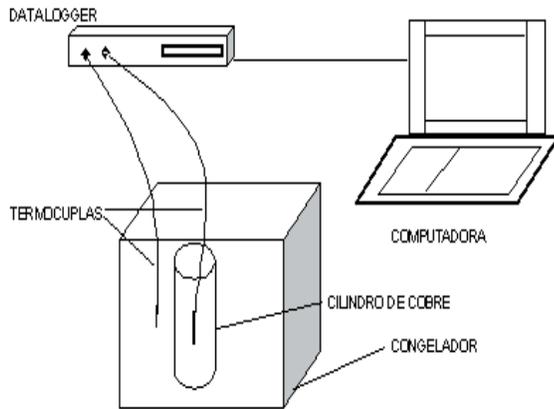


Figura 1b. Esquema del equipo empleado para la medición de la difusividad térmica

Para los 5 cortes anatómicos utilizados (Figura 2), las muestras fueron trozadas y picadas antes de ser introducidas en el cilindro. Un data logger registra la señal de variación de temperatura en función del tiempo (precisión de ±0,05 °C) cuando el cilindro está colocado en un congelador a -18°C. La metodología empleada en la determinación de la difusividad térmica fue el uso de las curvas de penetración de calor (Singh, 1982).

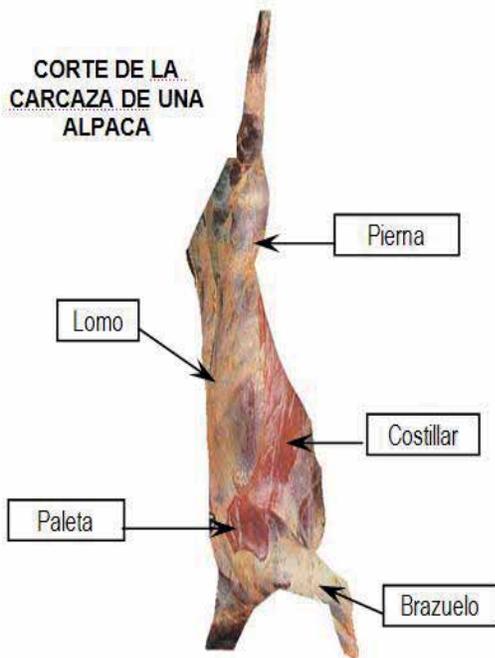


Figura 2. Esquema de la carcasa de alpaca y de los cortes anatómicos empleados (Téllez, 1992).

La ecuación general de transferencia de calor, es la siguiente:

Ecuación 1

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Partiendo de esta Ecuación 1, se obtiene una nueva Ecuación 2, que nos permite obtener los perfiles temperatura para una lámina y cilindro finito (Carslaw y Jaeger; Ball y Olson, citados por Singh, 1982).

Las soluciones analíticas son soluciones de serie que contienen exponenciales, seno y funciones trascendentales. Para un cilindro finito a una temperatura inicial uniforme, expuesto a una temperatura ambiental constante y con superficie con resistencia a la convección despreciable, la solución propuesta por (Carslaw y Jaeger, 1959) es la siguiente:

Ecuación 2

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos(\beta_m 2x/l) \frac{2J_0(\beta_n r/R)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp \left[ - \left( \frac{\beta_n^2}{R^2} + \frac{4\beta_m^2}{l^2} \right) \alpha t \right]$$

Donde: Temperatura del medio circundante,  $T_i$ : Temperatura inicial,  $x$ : Coordenada rectangular,  $l$ : Longitud del cilindro finito,  $J_0$ : Función Bessel de primer clase de orden cero,  $J_1$ : Función Bessel de primer clase de orden uno,  $R$ : Radio en (m),  $\beta_n$ : Raíz de la función Bessel,  $\beta_m$ : Raíz de la función coseno,  $t$ : Tiempo (s),  $r$ : Coordenada radial y  $\alpha$ : Difusividad térmica. Para situaciones donde la muestra es expuesta por un período prolongado de tiempo, solo el primer término de la solución por series es necesario.

Para un objeto finito de forma cilíndrica, la solución expresada por la Ecuación 2, puede ser simplificada de la siguiente manera, considerando que  $m = n = 1$ ; es decir,  $\beta_m = \beta_n/2$ ,  $\beta_n = 2,4048$ , y  $J_1(2,4048) = 0,5191$ . En el centro del objeto cilíndrico,  $x = 0$ ,  $r = 0$ , y  $J_0(0) = 1,0$ . De esta manera la solución aproximada para largos períodos de tiempo es expresada como (Carslaw y Jaeger, 1959):

*Ecuación 3*

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = 2,0396 \exp \left[ - \left( \frac{2,4048^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{\ell^2} \right) \alpha t \right]$$

Cuando se grafican las curvas de penetración de calor experimentales sobre papel semi-logarítmico, es posible expresar la Ecuación 3 según Ball y Olson (1957) como:

*Ecuación 4*

$$t = f_c \log \left( j \frac{T_s - T_i}{T_s - T} \right)$$

Donde:  $f_h = 0,398 \frac{r^2}{\alpha}$  es el parámetro de la curva de enfriamiento y  $j = 1,6$ ; para el caso de un cilindro infinito. La pendiente de la curva  $t = \log(T)$ , permite determinar el valor de  $\alpha$ , reemplazando términos en la Ecuación 4. Se obtiene:

*Ecuación 5*

$$t = 0.398 \frac{r^2}{\alpha} \log \left[ 1.6 \frac{T_a - T_0}{T_a - T} \right]$$

A partir de la Ecuación 5, podemos calcular la difusividad térmica como:

*Ecuación 6*

$$\alpha = \frac{0.398 r^2}{f_c}$$

Los resultados fueron analizados estadísticamente empleando un Diseño Completo al Azar y se realizó la prueba de comparación múltiple de Duncan para observar la existencia de grupos homogéneos de datos.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la Figura 3 se presentan los valores de la difusividad térmica calculada a partir de la Ec. 6 para diferentes cortes de carcasa de carne de alpaca (machos y hembras) durante el proceso de congelación. El mayor valor de corresponde al corte anatómico costillar, mientras que el menor valor de es para el corte anatómico paleta. La diferencia entre los dos valores es superior a 20%. Ambos valores extremos pertenecen a la carcasa del género hembra.

La difusividad térmica en los cortes de paleta y brazo de animales machos es mayor que para los animales hembras. En pierna y brazo los valores hallados son similares para ambos géneros. Estos resultados concuerdan en parte con lo afirmado por Bustinza (1993), quien señala que los dos tipos de carcasa (macho y hembra), tienen un comportamiento similar, cuando las muestras son sometidas al mismo nivel de temperatura (-18°C).

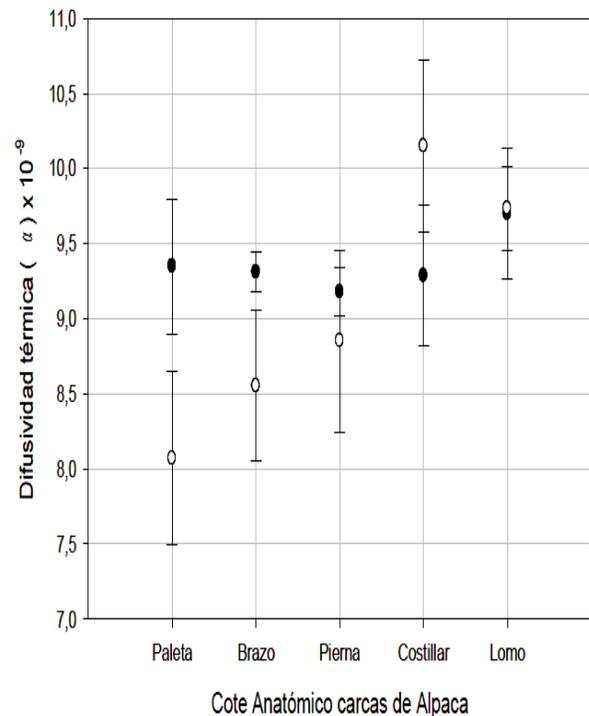


Figura 3. Promedio y desviación estándar de la difusividad térmica en 5 cortes anatómicos de carne de alpaca macho (●) y hembra (○), determinada a -18 ± 0,1 °C.

En comparación con la difusividad térmica de la carne magra de cerdo (con contenido de humedad de 73.3%) que es de alrededor de  $4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para una temperatura de congelación de  $-18^\circ\text{C}$  (James y James, 2002), los valores de difusividad térmica de carne de alpaca encontrados son menores (alrededor de 100 veces), ya que su contenido de humedad es mas bajo (alrededor de 70%).

Por otra parte, el contenido de grasa es de solamente de 0.49 % mientras que la carne de cerdo tiene 6%. Además, la conductividad térmica de la grasa es de aproximadamente 6 veces menor que la conductividad de la carne ( $\approx 0.25 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) (James y James, 2002). Este menor contenido de agua y de grasa explicaría la baja difusividad térmica de la carne de alpaca. Los diferentes tipos de agua (libre y ligada por ejemplo) presentes en la carne y la posición relativa de los músculos en las diferentes partes anatómicas, así como la absorción monomolecular y la microcapilaridad también pueden ser la causa de esta diferencia (Kerry et al., 2002). La gran amplitud de los valores de la desviación estándar de la difusividad térmica puede estar causada por la manipulación de las muestras en el momento de la carga y acomodo en los cilindros de cobre.

Al determinar la existencia de grupos homogéneos de valores de difusividad térmica en los cortes anatómicos estudiados se observa que aún en el mismo género pueden existir valores diferentes, esto probablemente debido a la composición, a la estructura del tejido y a la orientación de las fibras en los músculos de la carne en las diferentes partes anatómicas del animal (Cuadro 1).

Parte Anatómica	Macho	Hembra
Paleta	BCDE	A
Brazo	BCDE	AB
Pierna	BCD	ABC
Costillar	BCD	E
Lomo	CDE	DE

**Cuadro 1:** Grupos homogéneos de difusividad térmica en 5 cortes anatómicos de carcasas de carne de alpaca machos y hembras.

## CONCLUSIONES

Los valores de la difusividad térmica de las carcasas de carne de alpaca están comprendidos entre  $8$  a  $10 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , existiendo diferencias estadísticamente significativas entre los 5 cortes anatómicos evaluados. Los resultados indican que la composición, orientación del músculo, estructura del tejido y humedad influyen directamente en esta propiedad.

## BIBLIOGRAFÍA

BALLI, C. O., OLSON, F. W. C. (1957). Sterilization in Food Technology. Mc Graw Hill, New York, USA.

BUSTINZA, V. (1993). La Alpaca. Editorial Universitaria Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

CARSLAW, H. S., Jaeger J. C. (1959). Conduction of heat in solids. Oxford University Press, USA.

CRISTOFANELLI, S., ANTONINI, M., TORRES, D., POLIDORI, P., RENIERI, C. (2005). Carcass characteristics of peruvian llama (*Lama glama*) and alpaca (*Lama pacos*) reared in the Andean highlands. Small Ruminant Research, 58, 219–222.

GUPTA, T. R. (1996). Thermal diffusivity measurements of Wheat Flour and Wheat Flour Dough. J. Food Proc. Eng. 19:343-352

HELDAM C. J. (1983). Factors influencing food freezing rates. Food Technol. 37:103-109.

JAMES, S. J., JAMES, C. (2002). Meat refrigeration. CRC Press.

KERRY, J., KERRY, J., LEDWARD, D. (2002). Meat processing: Improving quality. CRC Press.

NEELY, K. TAYLOR, C., Prosser, O., & Hamlyn, P. F. (2001). Assessment of cooked alpaca and llama meats from the statistical analysis of data collected using an "electronic nose". Meat Science, 58, 53–58.

POULSEN, K. P. (1982). Thermal Diffusivity of Foods Measured by Simple Equipment. J. Food Eng. 1: 115-122.

SALVÁ, B. K., Zumalacárregui, J. M., Figueira, A. C., Osorio, M. T., Mateo, J. (2009). Nutrient composition and technological quality of meat from alpacas reared in Peru., Meat Science, Accepted Manuscript

SAHIN, S., GÜLÜM SUMNU, S. (2006). Physical Properties of Foods, Springer, USA, pp. 107.

SINGH, R. P. (1982). Thermal diffusivity in food processing. Food Technology, 36(2), 90.

TÉLLEZ V. J. (1992). Tecnología e industrias cárnicas. Artes Gráficas Espino. Lima, Perú