

CLASE 8.

Propiedades térmicas de los alimentos

19/05/2025 – Mariana Rodríguez – marianarod@fing.edu.uy

Agenda

- Introducción
- Temperatura
- Repaso: energía, calor, entalpía
- Calor específico
- Conducción de calor
- Conductividad térmica
- Difusividad térmica
- Valor calórico de los alimentos

Propiedades térmicas de los alimentos

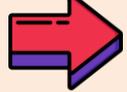
- El calentamiento y enfriamiento de un producto alimentario es necesario para:



Inactivar microorganismos.



Prevenir degradación enzimática.



Obtener atributos sensoriales deseables: olor, sabor, color, textura.

Propiedades térmicas de los alimentos

- Los procesos más comunes encontrados en las plantas de procesamiento de alimentos involucran calentamiento y/o enfriamiento.

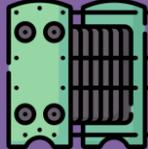
Refrigeración



Congelado



Pasteurización



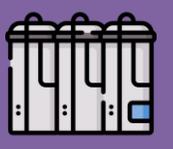
Esterilización



Secado



Evaporación



Involucran transferencia de calor entre un producto y un medio de enfriamiento o calentamiento



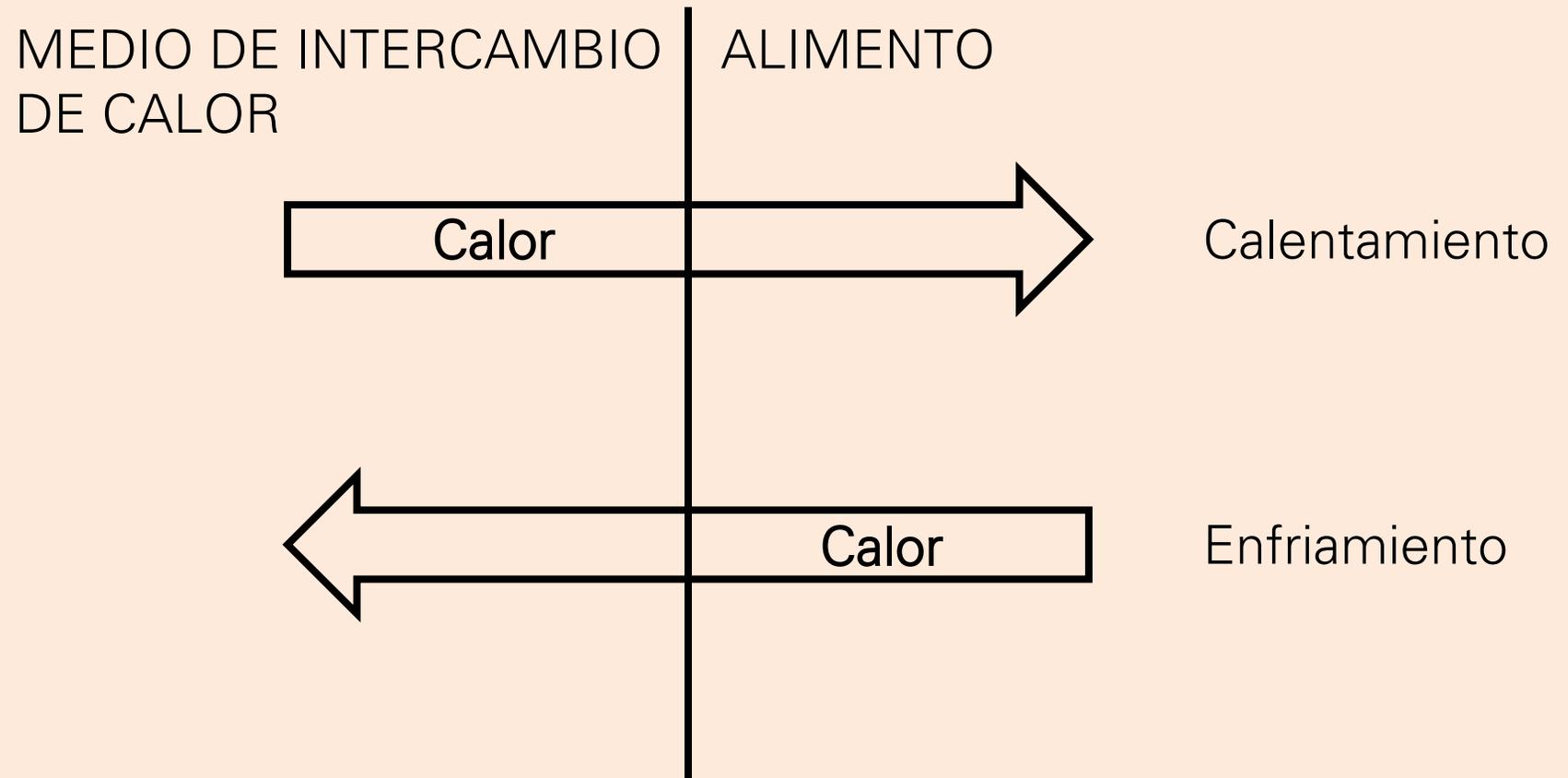
Para diseñar y controlar los procesos es necesario conocer las propiedades térmicas de los alimentos

Operaciones de procesamiento térmico relevantes en ingeniería de alimentos

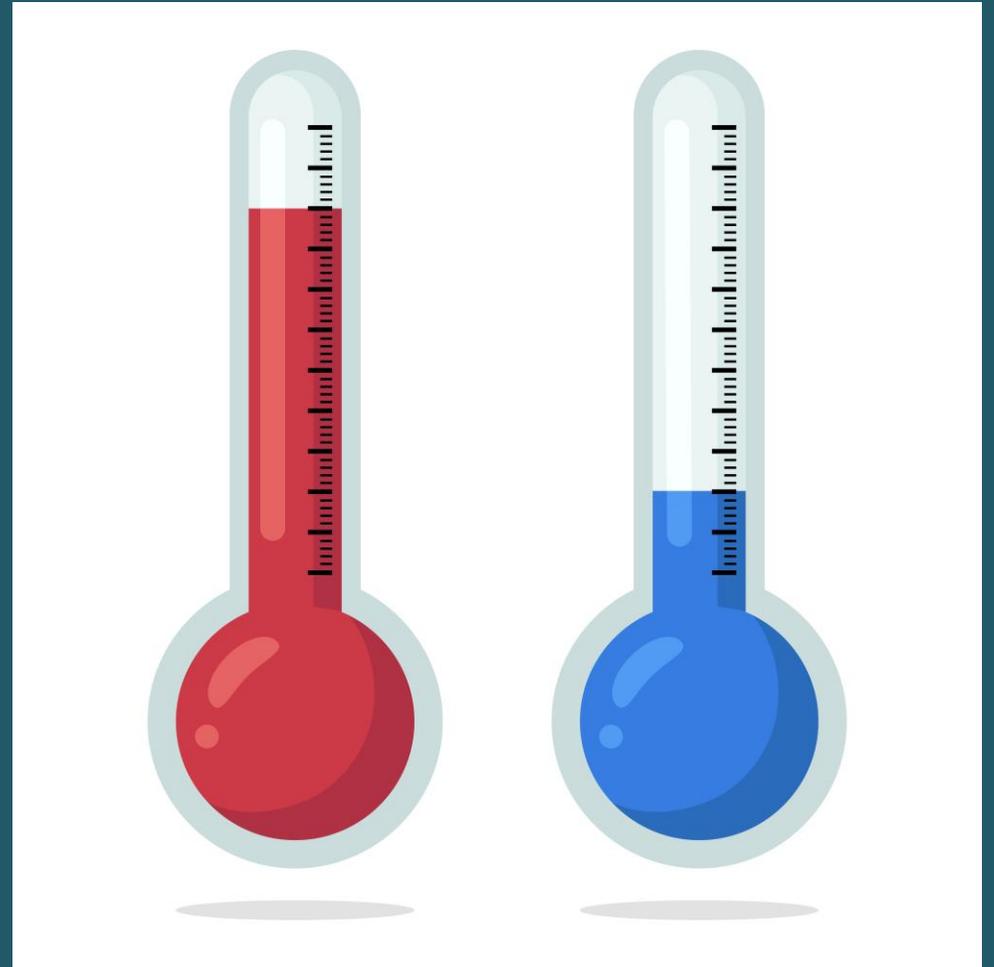
Table 7.1. Thermal process operations important in food engineering:

operation	purpose	food examples	heat exchange medium	temperature range
pasteurization/ sterilization	inactivation of pathogenic microorganisms for increasing shelf life.	meat, fish, soup, vegetables, fruit, cream	electricity, hot water, steam (direct or indirect steam)	63–135 °C
- batch	canned solids and liquids	milk, cream, custard, desserts, soup, fruit, juice, beer, egg		
- continuous flow / liquids (UHT/HTST)	long-life aseptic packaging	long-life milk, cream, fruit juices		
evaporation	removal of water, production of liquid concentrate	milk, fruit and vegetables, coffee, cheese whey	steam	40–100 °C
dehydration	removal of water, production of dried material with low water activity	milk, potato, vegetables, fruit, meat, fish	hot air, steam, hot water, electricity	150–250 °C
frying	reactions (proteins, carbohydrates), evaporation of water	French fries, potatoes, doughnuts	hot oil	100–150 °C
cooking/baking	reactions (proteins, carbohydrates), evaporation of water	catering operations, bread, meat pies, cakes	steam, hot air, microwaves	100–200 °C
chilling/freezing	reducing spoilage reactions, microbial activity	dairy products, meat, fish, fruit, vegetables, frozen desserts	cold air, refrigerants, cryogenic fluids (liquid nitrogen)	10–0 °C (–18)–(–30) °C (–100)–(–200) °C

Transferencia de calor



Temperatura



Temperatura

- Indica la energía cinética exhibida por el movimiento molecular dentro de las sustancias.
- Esta energía cinética aumenta con la temperatura (las moléculas se mueven a mayor velocidad).

$$E = k \cdot T$$

Donde: E [J] es la energía
 k [J/K] es la constante de Boltzmann
 T [K] es la temperatura

- A escala macroscópica: la energía térmica de un sistema puede expresarse como la temperatura del sistema.



Un sistema de alta T : moléculas con alta E cinética.



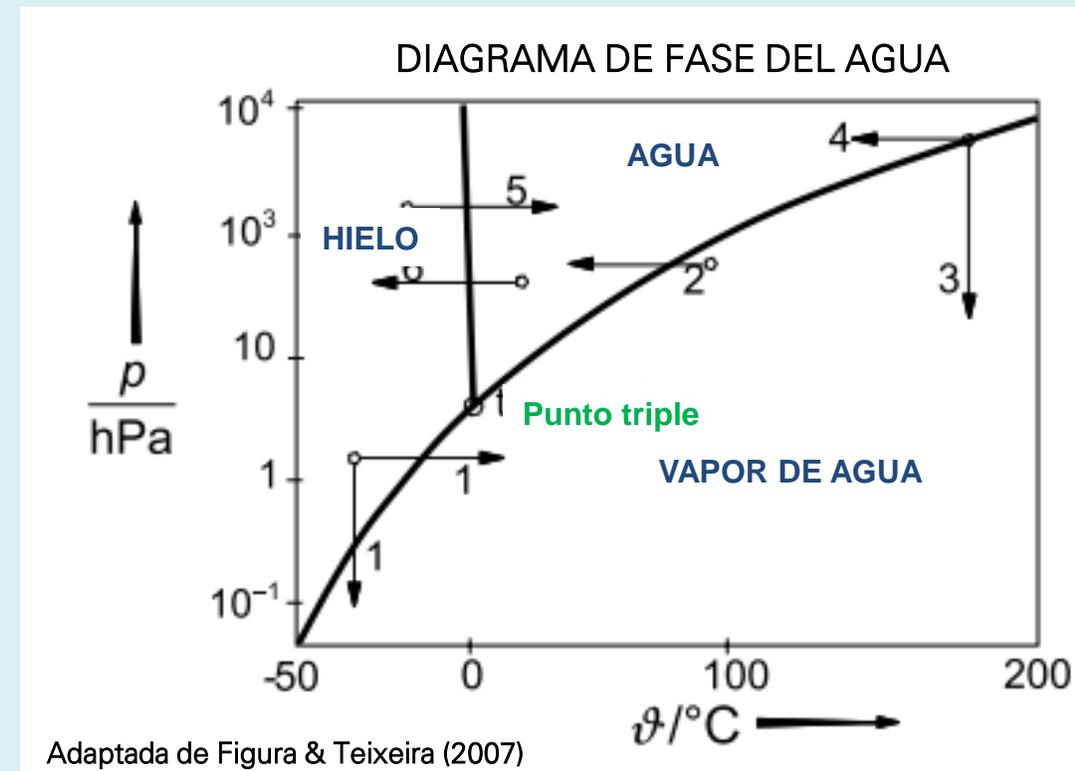
Un sistema $T = 0$: moléculas completamente en reposo sin E cinética.



Temperatura absoluta (termodinámica)



- Límite inferior = 0; no tiene máximo.
- Unidad = Kelvin [K]
- 1 K se define como: 1/273,16 de la temperatura del punto triple del agua.





Otras escalas de temperatura

Escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

- Basada en los puntos de congelación y ebullición del agua a P_{atm} .
- La diferencia entre ambos puntos se definió como 100°C .

Escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)

- 0°F ($= -17,8^{\circ}\text{C}$) definido como la menor T alcanzada en ese momento.
- 100°F ($= 37^{\circ}\text{C}$) definido por la temperatura de la sangre de una persona sana.

Escala Rankine ($^{\circ}\text{R}$)

- Escala absoluta, no tiene valores negativos.
- Se define sobre el $^{\circ}\text{F}$.

Escalas de temperatura

Escala	Unidad	Cero absoluto	Temperatura congelación H ₂ O	Punto triple H ₂ O	Temperatura sangre cuerpo humano	Temperatura ebullición H ₂ O
Kelvin	K	0	273,15	273,16	310,15	373,15
Celsius	°C	-173,15	0,0	0,01	37	100,0
Fahrenheit	°F	-459,67	32,0	32,02	100	212,0
Rankine	°R	0	491,67	491,69	560	672

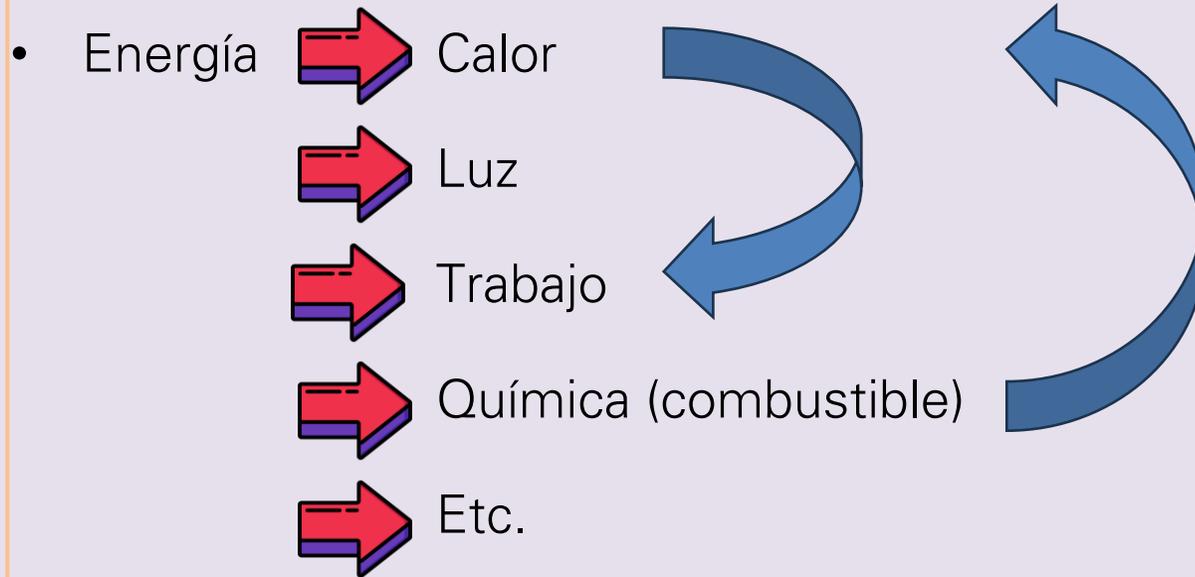
Adaptada de Figura & Teixeira (2007)



Calor y entalpía

Repasando...

- El calor es una forma de energía.



La energía no se crea ni se destruye, se transforma.



1era Ley de la Termodinámica

Forma de energía	Ejemplos, energía en:
Mecánica	Cuerpo en movimiento (energía cinética)
Eléctrica	Redes de potencia eléctrica
Luz	Luz del sol, luz de bombitas incandescentes
Química	Aceite vegetal, aceite mineral, almidón de papa, combustible
Nuclear	Núcleos de átomos emitiendo radioactividad
Calor	Sistema de calefacción doméstica, cocina

Repasando...

- Energía interna (U) de un sistema termodinámico existe en forma de calor (Q) y trabajo (W'):
- En sistemas termodinámicos tratamos al trabajo sólo como trabajo de desplazamiento (W): fuerza-desplazamiento o presión-volumen.

$$dU = dQ + dW'$$

$$dU = dQ + dW$$

$$dU = dQ - p \cdot dV$$

$$H = U + pV$$

$$dH = dU + p \cdot dV + V \cdot dP$$

Definición de trabajo de desplazamiento

- Para los casos en que $dP=0$: $dH = dU + p \cdot dV \rightarrow dH = dQ$

Durante proceso isobárico, la cantidad de calor (dQ) = al cambio de entalpía (dH) del sistema.

\longrightarrow
Si $W=0$

$$dU = dH$$

Repasando...

Proceso general	$dQ = dU + p.dV + V.dp$	$dQ = dH$
Proceso isobárico Con trabajo de desplazamiento	$dQ = dU + p.dV + 0$	$dQ = dH$
Proceso isobárico Con trabajo de desplazamiento = 0	$dQ = dU + 0 + 0$	$dQ = dH = dU$

Adaptada de Figura & Teixeira (2007)

Repasando...

- Cuando se transfiere calor a o desde un sistema normalmente ocurre un aumento o descenso de temperatura, respectivamente.

↳ CALOR SENSIBLE

- En algunos casos, se transfiere calor a o desde un sistema y la temperatura se mantiene constante.

↳ CALOR LATENTE



Repasando...

- Primera Ley de la Termodinámica:

$$dU = dQ - p \cdot dV$$

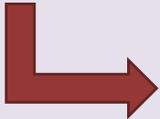
PRINCIPIO DE
CONSERVACIÓN DE ENERGÍA

Asume que el único trabajo que ocurre en el sistema es trabajo de desplazamiento.

La energía total del universo no se crea ni se destruye, se conserva.

Repasando...

$$dU = dQ - p \cdot dV$$

- En un sistema adiabático: $dQ = 0$. $dU = \cancel{dQ} - p \cdot dV$
 - Si no hay trabajo de desplazamiento: $dV = 0$. $dU = \cancel{dQ} - p \cdot \cancel{dV}$
-  Energía interna del sistema es constante: $dU = 0$.

Repasando...

- Si hay calor (dQ) entrando o saliendo de nuestro sistema a una temperatura T :

$$dS \equiv \frac{dQ_{rev}}{T}$$

S : entropía

Válida para un sistema cerrado y un proceso completamente reversible.

- Cuando el proceso es parcialmente irreversible:

$$dS > \frac{dQ}{T}$$

Segunda Ley de la Termodinámica

Si un sistema no está en equilibrio, la entropía (S) tiende a aumentar y alcanzar un máximo.

Repasando...

- Si se consideran sólo procesos reversibles y un trabajo de desplazamiento reversible:

$$\left. \begin{aligned} dU &= dQ - p \cdot dV \\ dS &\equiv \frac{dQ}{T} \end{aligned} \right\} dU = dS \cdot T - p \cdot dV$$

La energía interna de un sistema cerrado sólo se puede cambiar modificando su entropía o su volumen.

Repasando...

- Energía libre de Gibbs (G): $G = H - T.S$

$$\left. \begin{array}{l} G = H - T.S \\ H = U + p.V \end{array} \right\} G = U + p.V - T.S$$

$$dG = dU + p.dV + dp.V - T.dS - dT.S$$

$$dU = dQ - p.dV$$

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$\left. \begin{array}{l} dG = dU + p.dV + dp.V - T.dS - dT.S \\ dU = dQ - p.dV \\ dS = \frac{dQ}{T} \end{array} \right\} \begin{array}{l} dG = dp.V - dT.S \\ \text{En un sistema en equilibrio:} \\ dQ = T.dS = 0, \text{ entonces:} \end{array}$$

$$\frac{dG}{dP} = V$$

Calor específico

Calor específico

- Cantidad de calor requerido para aumentar en un grado una unidad de masa de la sustancia, sin un cambio en su estado:

$$c_p = \frac{Q}{m(\Delta T)}$$

Unidades en S.I.: J/kgK

Calor específico

- Depende de si el proceso de adición de calor ocurre a P constante o V constante.

En alimentos la mayoría de los procesos son a P cte.

- El calor específico de los alimentos depende de su composición

Predicción del calor específico en alimentos

- Modelo propuesto por Choi & Okos (1986) para un producto alimenticio con n componentes:

$$c_p = \sum_{i=1}^n X_i^w c_{pi}$$

Donde: X_i^w es la fracción másica de cada componente i
 c_{pi} [J/kgK] es el calor específico de cada componente i

Predicción del calor específico en alimentos

- A su vez, existen modelos que predicen la dependencia del c_p de los principales componentes alimentarios con la temperatura, expresados en $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ (Choi & Okos, 1986):

Componente	Modelo	Válido a:
Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	-40 a 150 °C
Grasa	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	-40 a 150 °C
Carbohidratos	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	-40 a 150 °C
Fibra	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	-40 a 150 °C
Cenizas	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	-40 a 150 °C
Agua	$c_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$	-40 a 0 °C
Agua	$c_p = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$	0 a 150 °C
Hielo	$c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$	

Ejemplo

Estimar el contenido de papas con 85% de agua.

$$C_{p \text{ agua}} = 4186,80 \text{ J/kgK}$$

$$C_{p \text{ sólidos no grasos}} = 837,36 \text{ J/kgK}$$

$$c_p = \sum_{i=1}^n X_i^w c_{pi} = 0,85 \cdot 4186,80 + 0,15 \cdot 837,36 = 3684,384 \text{ J/kgK}$$

Ejemplo

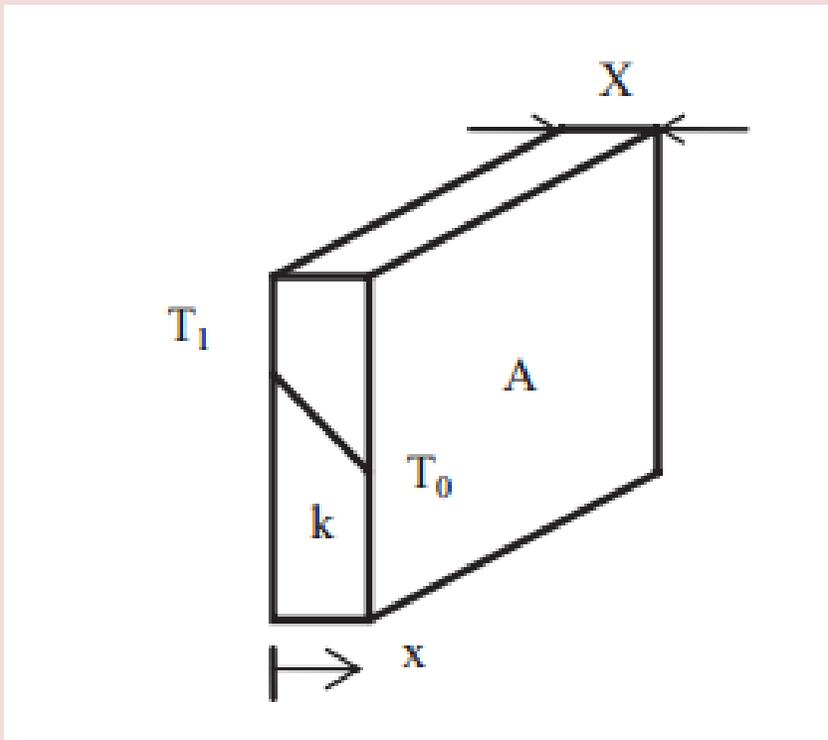
Estimar el calor específico a 20 °C de arroz con la siguiente composición:

Componente	Peso (%)
Agua	8,5
Carbohidratos	75,3
Proteína	14,1
Grasa	0,7
Cenizas	1,4

Conducción de calor

Ley de Fourier de conducción de calor

Transferencia de calor en estado estacionario a través de una pared



Sahin & Sumnu (2006)

$$\text{Vel. proceso transferencia} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia}}$$

- Fuerza impulsora: $T_1 - T_0 = \Delta T$
- Velocidad de transferencia de calor: proporcional a A.
- Resistencia = X/kA

$$Q = kA \frac{T_1 - T_0}{X}$$

En estado estacionario

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

1era Ley de Fourier

Conductividad térmica

Conductividad térmica (k)

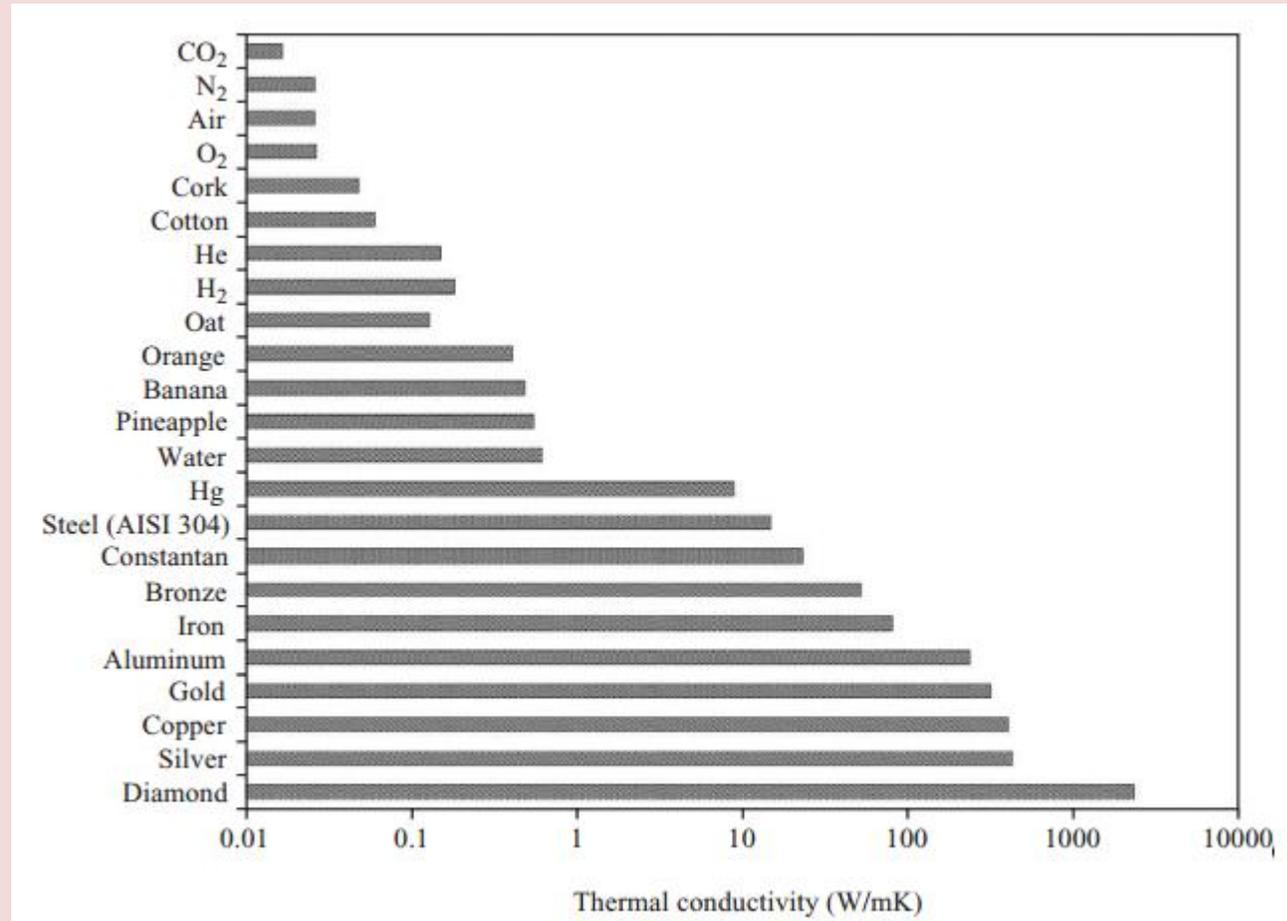
- Define la capacidad de un material para conducir el calor.
- Indica la cantidad de calor que será conducido por unidad de tiempo a través de una unidad de espesor de un material, si existe un gradiente de temperaturas a través de dicho espesor.

- Unidades:
$$\frac{J}{s \cdot m \cdot ^\circ C} = \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

Conductividad térmica (k)

- La conductividad térmica varía entre materiales.
- Esto se explica por las diferencias en composición química y física.

Conductividad térmica de distintos materiales a 27 °C



Conductividad térmica en alimentos

- En la mayoría de los alimentos de alta humedad: $k_{alimento} \sim k_{agua}$
- En alimentos secos porosos, la conductividad térmica estará influenciada por la conductividad del aire, que es más baja.
- Conductividad térmica de los alimentos varía entre: conductividad térmica del agua ($k_{agua} = 0,614 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a 27°C) y la del aire ($k_{aire} = 0,026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a 27°C). 

La conductividad térmica aumenta con el contenido de humedad.

- La conductividad térmica medida en alimentos porosos es una conductividad aparente: **conductividad térmica efectiva**.
- La conductividad térmica efectiva es una propiedad térmica de transporte general, que asume que el calor es transferido por conducción a través del sólido y las fases porosas del material.

Conductividad térmica en alimentos

- La conductividad térmica del hielo es casi 4 veces mayor que la del agua ($k_{hielo} = 2,24$ W/m°C a 0°C).
- Durante congelación: capa exterior congelada, y el hielo se propaga hacia el interior, reemplazando el agua estancada por un mejor conductor.
- Durante descongelación: la parte congelada está en el interior y el calor se conduce a través de la región descongelada (menor conductividad térmica que el hielo).

El proceso de descongelación es más lento que el proceso de congelación.



Conductividad térmica en alimentos

- Alrededor del punto de congelación: la temperatura tiene un gran impacto en la conductividad térmica.
- A $T > T_{\text{cong.}}$, la conductividad térmica de los alimentos aumenta levemente con la temperatura.
- En los líquidos y gases, la conducción del calor ocurre como resultado de colisiones moleculares.
- Como el espacio intermolecular es mucho mayor y el movimiento de las moléculas más aleatorios en fluidos que en sólidos: $k_{\text{fluidos}} \ll k_{\text{sólidos}}$.

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

- Se puede modelar la conductividad térmica efectiva de alimentos en base a su composición.
- Es necesario considerar el efecto del aire en los poros y el hielo en el caso de los alimentos congelados.

Componente	Modelo Choi & Okos (1986), k (W/m°C) , válido a 0 – 90°C
Proteína	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$
Grasa	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$
Carbohidratos	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$
Fibra	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$
Cenizas	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$
Agua	$k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$
Hielo	$k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

- Conductividad térmica del aire húmedo (Rahman, 1965):

$$k_{aire} = 0,0076 + 7,85 \times 10^{-4}T + 0,0156RH$$

Donde: RH es la humedad relativa, variando entre 0 y 1.
 T varía entre 20 y 60 °C.

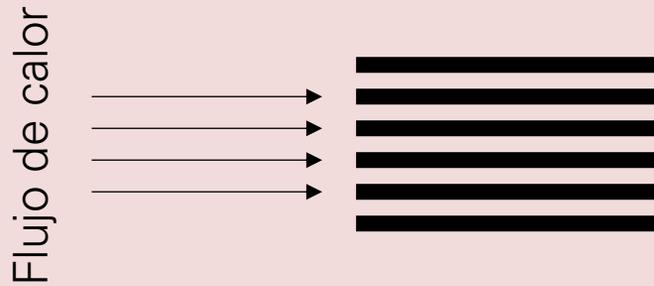
Predicción de la conductividad térmica en alimentos

- Generalmente, en sistemas multifase se consideran los efectos de la distribución geométrica de las fases, usando modelos estructurales.
- También existen modelos que asumen una estructura física isotrópica.

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

MODELO EN PARALELO

- Asume que los componentes se ubican en dirección paralela al flujo de calor.



$$k_{pa} = \sum_{i=1}^n k_i X_i^v$$

$$X_i^v = \frac{X_i^w / \rho_i}{\sum_{i=1}^n (X_i^w / \rho_i)}$$

Donde: X_i^v es la fracción volumétrica del componente i
 X_i^w es la fracción másica del componente i
 ρ_i (kg/m^3) es la densidad del componente i

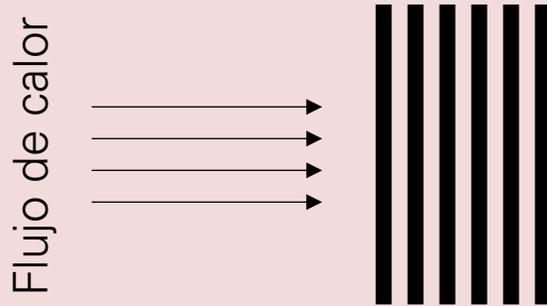
- Distribución en paralelo: máximo valor de conductividad térmica.
- Si se asume que el alimento se compone de: agua, sólido y aire, la conductividad térmica efectiva puede calcularse como:

$$k_{pa} = k_{agua} X_{agua}^v + k_{sólido} X_{sólido}^v + k_{aire} X_{aire}^v$$

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

MODELO EN SERIE (PERPENDICULAR)

- Asume que los componentes se ubican en dirección perpendicular al flujo de calor.



$$\frac{1}{k_{se}} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i^v}{k_i}$$

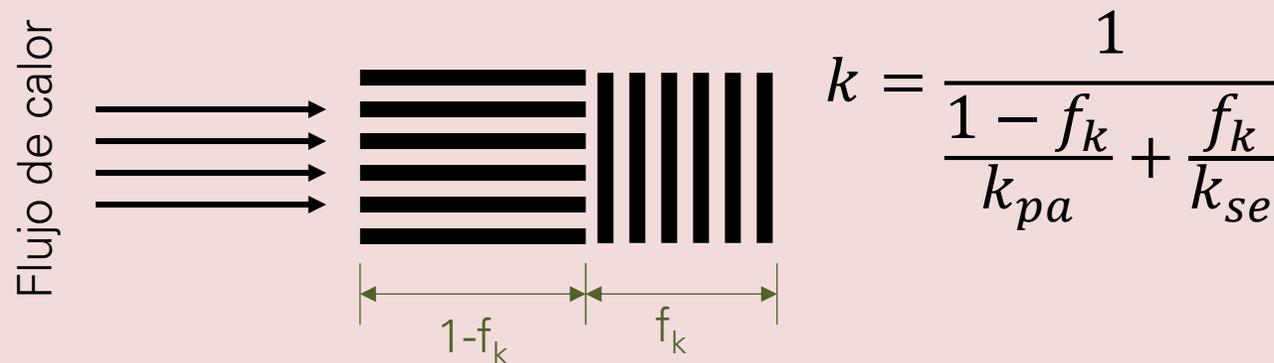
- Distribución perpendicular: mínimo valor de conductividad térmica.
- Si se asume que el alimento se compone de: agua, sólido y aire, la conductividad térmica efectiva puede calcularse como:

$$\frac{1}{k_{se}} = \frac{X_{agua}^v}{k_{agua}} + \frac{X_{sólido}^v}{k_{sólido}} + \frac{X_{aire}^v}{k_{aire}}$$

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

MODELO DE KRISCHER

- Los modelos en paralelo y en serie no consideran la distribución natural de las fases de componentes.
- El valor real de la conductividad térmica de alimentos está entre los valores obtenidos por los métodos en paralelo y en serie.



Donde: k , k_{pa} y k_{se} : son las conductividades térmicas efectivas calculadas por los modelos de Krischer, en paralelo y en serie, respectivamente.
 f_k : es el factor de distribución de fase.

- 42 • **Desventaja:** f_k solo puede obtenerse experimentalmente porque depende de: contenido de humedad, porosidad y temperatura del alimento.

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

- El modelo de Krischer es ampliamente utilizado en ingeniería de alimentos, pero no es útil para materiales isotrópicos.

MODELO DE MAXWELL-EUCKEN

- Adaptación de Eucken (1940), del modelo propuesto por Maxwell (1904) para sistemas alimentarios de dos componentes consistentes en una fase dispersa y una fase continua.

$$k = k_c \left(\frac{2k_c + k_d - 2X_d^v(k_c - k_d)}{2k_c + k_d + X_d^v(k_c - k_d)} \right)$$

Donde: k_c y k_d : son las conductividades térmicas de las fases continuas y dispersas, respectivamente.

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

MODELO DE KOPELMAN

- El modelo isotrópico de Kopelman (1966) describe la conductividad térmica de un material compuesto como la combinación de fases continuas y discontinuas.

$$k = \frac{k_c [1 - Q]}{1 - Q [1 - (X_d^v)^{1/3}]}$$

$$Q = (X_d^v)^{2/3} \left(1 - \frac{k_d}{k_c} \right)$$

- Este modelo es útil para sistemas de 2 componentes, pero requiere modificarlo para sistemas multicomponente

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

MODELO DE KOPELMAN adaptado para sistemas multicomponente

- Usando la ecuación de Kopelman se determina sucesivamente la conductividad térmica de un sistema de 2 componentes, en un proceso iterativo:
 - 1- Fase continua: agua, fase dispersa: carbohidrato.
 - 2- Fase continua: 1 (agua/carbohidrato), fase dispersa: proteína.
 - 3- Fase continua: 2 (agua/carbohidrato/proteína), fase dispersa: grasa.
 - 4- Fase continua: 3 (agua/carbohidrato/proteína/grasa), fase dispersa: hielo.
 - 5- Fase continua: 4 (agua/carbohidrato/proteína/grasa/hielo), fase dispersa: cenizas.
 - 6- Fase continua: 5 (agua/carbohidrato/proteína/grasa/hielo/cenizas), fase dispersa: aire.

$$k_{comp.i+1} = \frac{k_i[1 - Q_{i+1}]}{1 - Q_{i+1}[1 - (X_{d,i+1}^v)^{1/3}]} \quad Q_{i+1} = (X_{d,i+1}^v)^{2/3} \left(1 - \frac{k_{i+1}}{k_i}\right) \quad X_{d,i+1}^v = \frac{V_{i+1}}{\sum_i^{i+1} V_i}$$

Predicción de la conductividad térmica en alimentos

Problema para resolver en casa

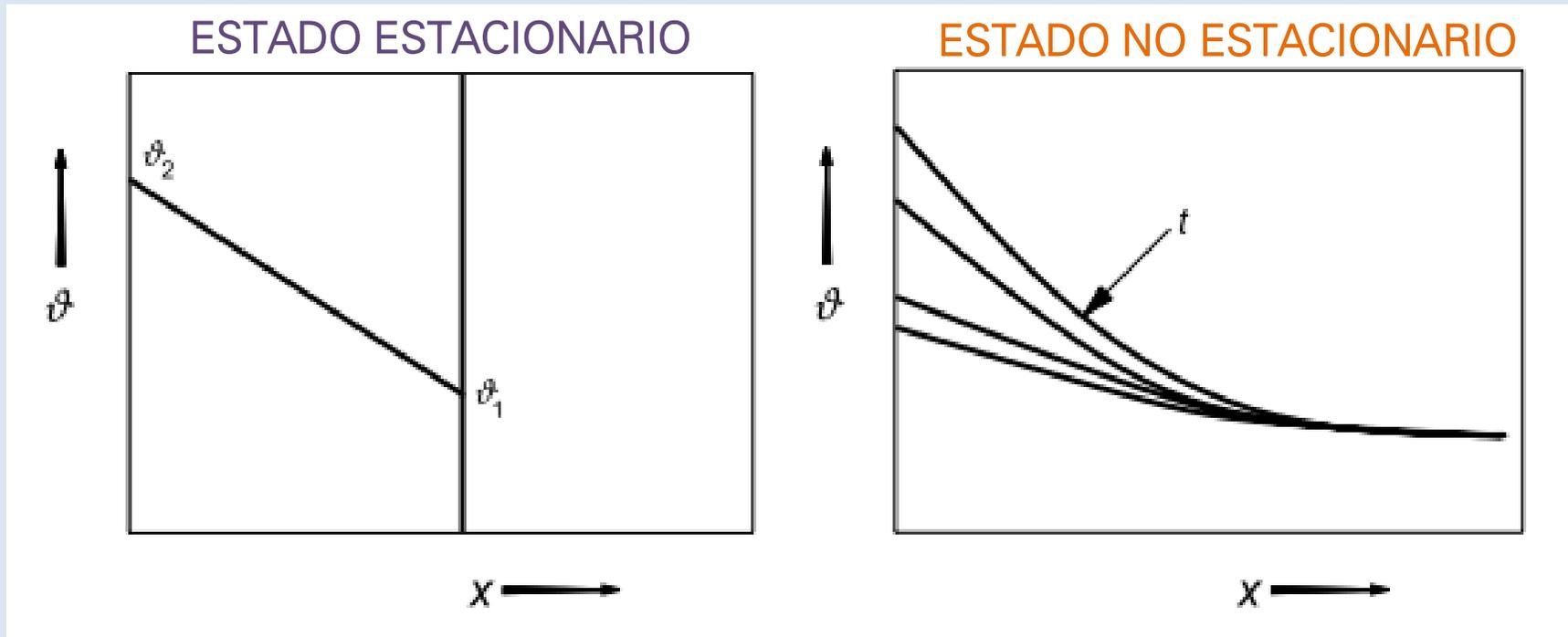


Difusividad térmica

Difusividad térmica (α)

- Es una propiedad derivada, asociada con el flujo de calor transitorio.

Adaptada de Figura & Teixeira (2007)



Gradiente de temperatura: constante en el tiempo

Gradiente de temperatura: varía en función del tiempo

Usamos la 1era Ley de Fourier para describir la conducción de calor:

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

Usamos la 2da Ley de Fourier para describir la conducción de calor:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2}$$

Difusividad térmica (α)

- Es una propiedad derivada, asociada con el flujo de calor transitorio.
- Indica la capacidad de un material de conducir energía térmica en relación a su capacidad de almacenar energía térmica.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Unidades: m²/s en S.I.

- Materiales con alta difusividad térmica responden rápidamente a cambios en su entorno térmico, mientras que materiales con baja difusividad térmica responden más lentamente, tardan más en alcanzar la nueva condición de equilibrio.
- La relación entre los tiempos de calentamiento de dos materiales de igual espesor será inversamente proporcional a sus respectivas difusividades:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$$



α puede determinarse comparando el tiempo de calentamiento con el de otro material de = espesor y α conocida.

Predicción de la difusividad térmica en alimentos

MÉTODO DE PREDICCIÓN INDIRECTO

- Se puede calcular midiendo: la conductividad térmica, densidad y calor específico.
- Lleva mucho tiempo e instrumentación.
- O se puede estimar con Choi & Okos (1986):

Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$
Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$
Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$
Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$
Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$
Water	$\alpha = 1.3168 \times 10^{-1} + 6.2477 \times 10^{-4}T - 2.4022 \times 10^{-6}T^2$
Ice	$\alpha = 1.1756 - 6.0833 \times 10^{-3}T + 9.5037 \times 10^{-5}T^2$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i$$

Donde: n es el número total de componentes

α_i es la difusividad del componente i

X_i es la fracción másica del componente i

Predicción de la difusividad térmica en alimentos

MÉTODOS DIRECTOS DE MEDIDA

- Suele determinarse mediante la solución de la ecuación unidimensional de transferencia de calor en estado no estacionario.
- Métodos más utilizados: historial de temperatura, sonda de conductividad térmica y Dickerson.

Valor calórico de los alimentos

Requerimiento energético del cuerpo humano

- Los alimentos contienen energía que el cuerpo absorbe al consumirlos.
- Esta energía se utiliza:
 1. Para mantener el metabolismo básico de las células de los tejidos y órganos del cuerpo. Necesaria aún en reposo (metabolismo basal).
 2. La energía adicional se convierte en trabajo mediante la contracción y relajación de los tejidos musculares. Necesaria para el movimiento del cuerpo
 3. El cuerpo también libera energía como exceso de calor, luego de mantener la temperatura corporal normal.
- La energía requerida por el cuerpo humano depende de muchos factores: edad, sexo, carga de trabajo, temperatura circundante.

Valor calórico de los alimentos

Factores de Atwater

Componente	e_i (kJ/g)	e_i (kcal/g)
Proteínas	17	4
Carbohidratos	17	4
Grasas	37	9

$$E = \sum m_i e_i$$

Donde: E (J) es la energía de combustión fisiológica
 e_i (J/g) es el valor de combustión fisiológica de cada componente i .
 m_i (g) es la masa de cada componente i .

Medida del valor calórico de los alimentos

- Puede determinarse experimentalmente con un calorímetro de combustión.
- La muestra se oxida completamente y el calor generado aumenta la temperatura.
- El aumento de temperatura se registra y se usa para calcular el valor calórico.
- En el calorímetro de combustión toda la proteína, y carbohidrato y grasa se oxida completamente a NO_2 , CO_2 y H_2O .
- El cuerpo humano tiene otro requerimiento para el nitrógeno en las proteínas, no lo oxida a NO_2 .
- Gran parte del nitrógeno procedente de las proteínas del cuerpo humano se metaboliza: 80–90% a urea ($\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$), 3–5% a ácido ureico y <1% a creatinina.

Se debe ajustar el valor energético obtenido del calorímetro

Medida del valor calórico de los alimentos

Table 7.17. Comparison of physical and physiological combustion data

ingredient	physical combustion value in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	physiological combustion value in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$
fat	38.9	37
carbohydrate	17.2	17
protein	23.4	17
alcohol	30.0	29

Figura & Teixeira (2007)

Referencias

- Figura, L.O.; Teixeira, A.A. (2007). Capítulo 7: Thermal properties. En: Food Physics: Physical properties- Measurement and Applications. Springer, Berlín, pp. 257-329.
- Sahin, S.; Sumnu, S.G. (2006). Capítulo 3: Thermal properties of foods. En: Physical properties of foods. Springer, New York, pp. 107-155.
- Singh, P.R.; Heldman, D.R. (2014). Capítulo 4: Heat Transfer in Food Processing. En: Introduction to Food Engineering, 5th ed. Academic Press, London, pp. 265-419.