CLASE 6

Propiedades morfológicas y geométricas

21/04/2025 – Mariana Rodríguez – marianarod@fing.edu.uy

Agenda

- Masa
- Propiedades geométricas
- Tamaño
- Forma
- Volumen
- Densidad
- Porosidad
- Encogimiento

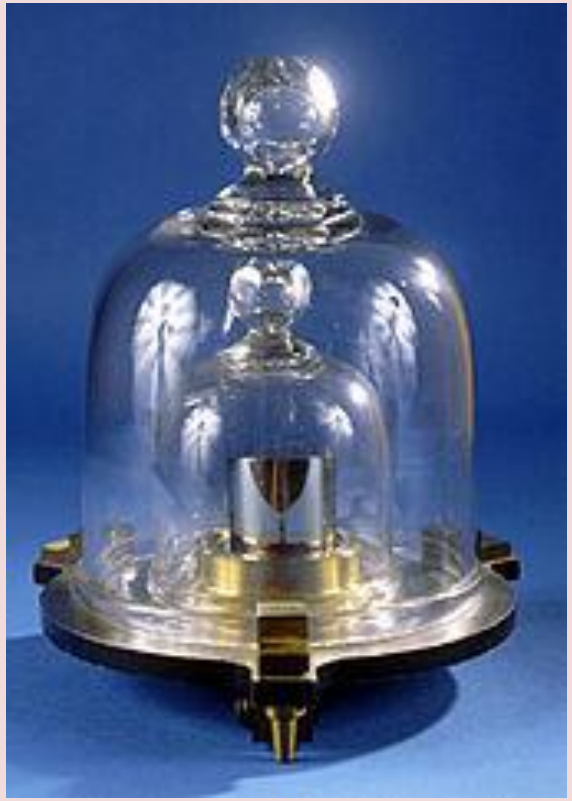
Masa

Masa

- Masa: cantidad de materia en un cuerpo.

Masa ≠ Peso

- Peso: fuerza que actúa sobre un cuerpo como resultado de la gravedad.
- El peso cambia con la fuerza gravitacional y la masa se mantiene constante.



https://en.wikipedia.org/wiki/International_Prototype_of_the_Kilogram

Masa

$$P = m \times g$$

P: peso (N)
m: masa (kg)
g: aceleración gravitacional (m/s^2)

- En general se asume que la aceleración gravitacional es constante en la superficie de la Tierra.

g = 9,80665 m/s^2

Masa

Ciudad	g (m/s^2)	Balanza muestra:
Zurich	9,80665	1000,0 g
Bogotá	9,77390	996,7 g
Reykjavic	9,82265	1001,6 g

Adaptada de: Figura et al. (2007)

Propiedades geométricas

Propiedades geométricas

- Tamaño
- Forma
- Volumen
- Densidad
- Porosidad

Muy importantes en el manejo y operaciones de procesamiento de muchos materiales alimentarios.

Importancia de características geométricas - Ejemplos

- Las frutas y hortalizas se califican según forma, tamaño y densidad.
- Impurezas se remueven de alimentos por diferencia de densidad entre impureza y alimento.
- Densidad de alimentos particulados: influyen en propiedades de flujo, hidratación, etc.
- Densidad: muy relevante para diseñar envases y calcular espacio de almacenamiento y transporte.
- Área superficial de frutas y hortalizas importante en: remoción de residuos, tasa respiratoria, evaluación de color, recubrimientos y películas, rociado de soluciones, estudios de transferencia de calor para procesos de calentamiento y enfriamiento.

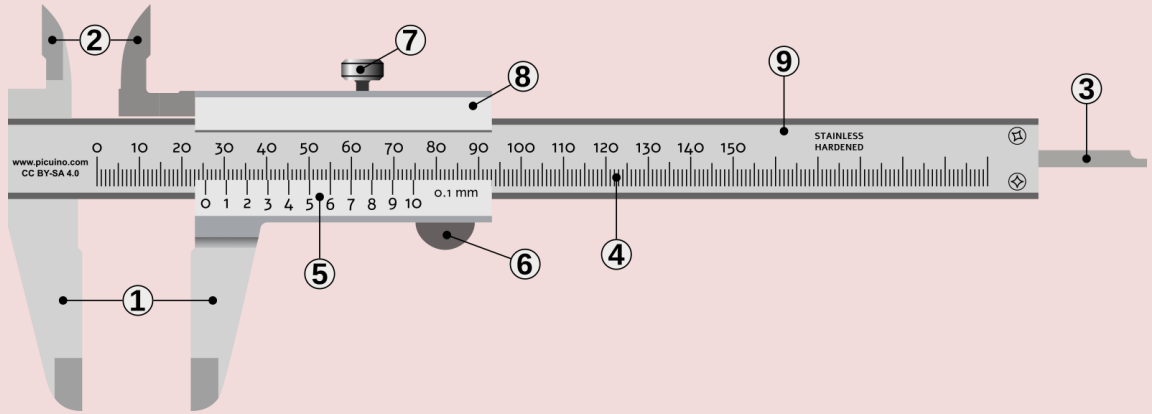
Tamaño

Tamaño

- La estimación del tamaño de productos individuales puede utilizarse como parte del control de calidad de empresas.
- Muchas veces los consumidores prefieren ciertos productos de mayor o menor tamaño y estos adquieren mayor precio.
- Muchas veces es importante que los productos tengan tamaños similares para que sean más atractivos o para facilitar su envasado.
- En el caso de frutas y hortalizas, existen estándares internacionales que establecen categorías comerciales en función del tamaño.

Tamaño

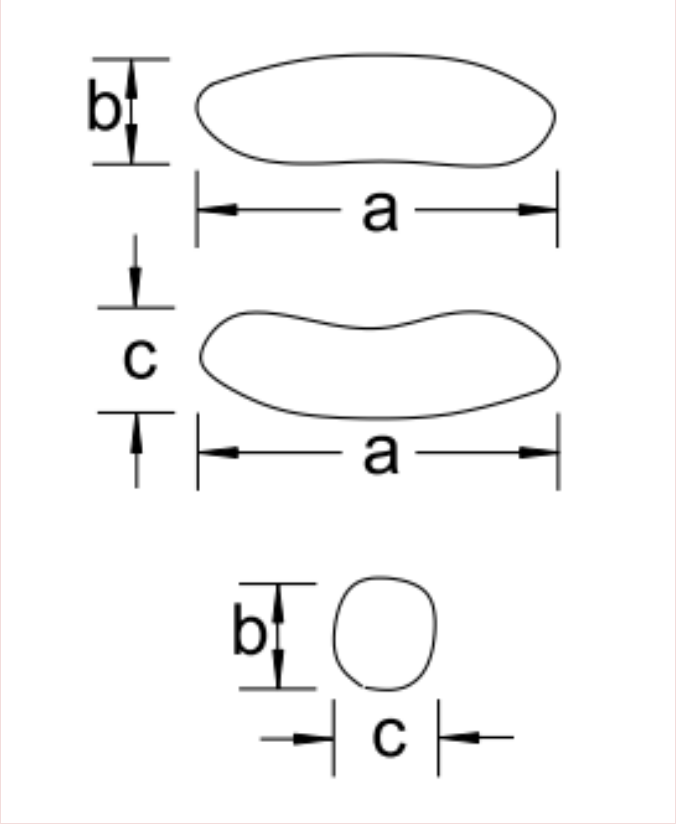
- Se puede medir con un calibre.

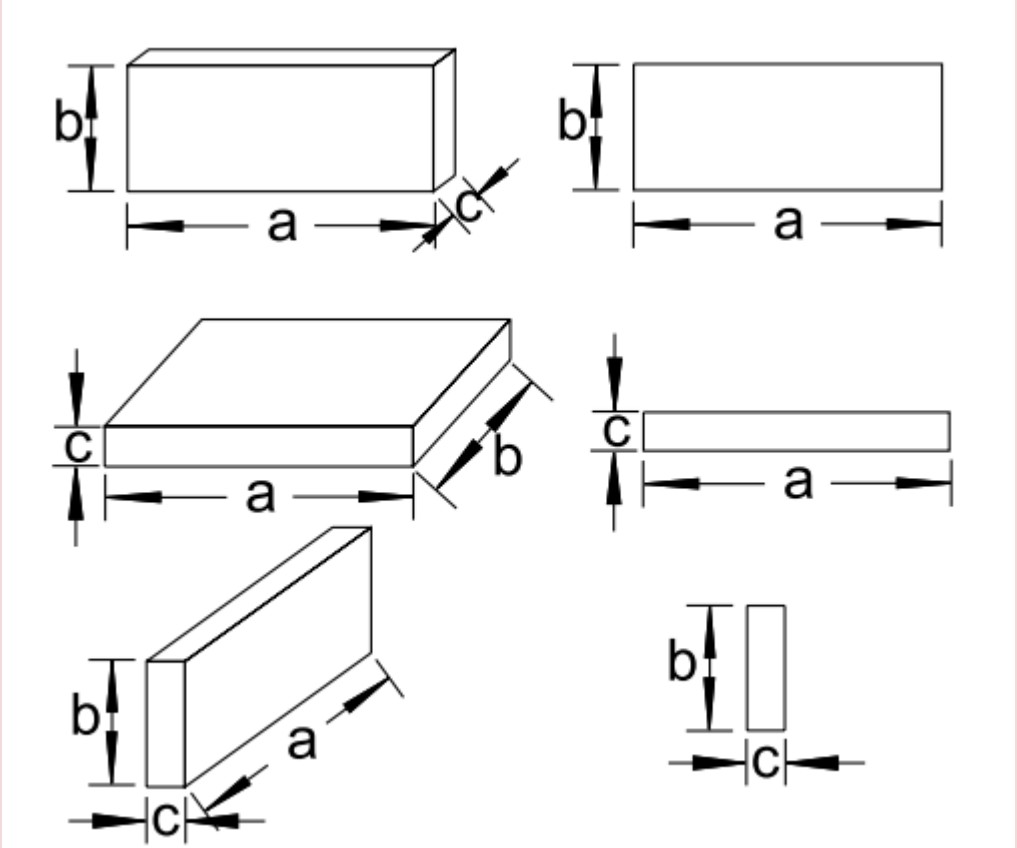


https://www.picuino.com/es/mecan-calibre.html

- O por análisis computacional de imágenes.

Tamaño





Máxima área proyectada

Área proyectada intermedia

Mínima área proyectada

Adaptadas de: Figura et al. (2007)

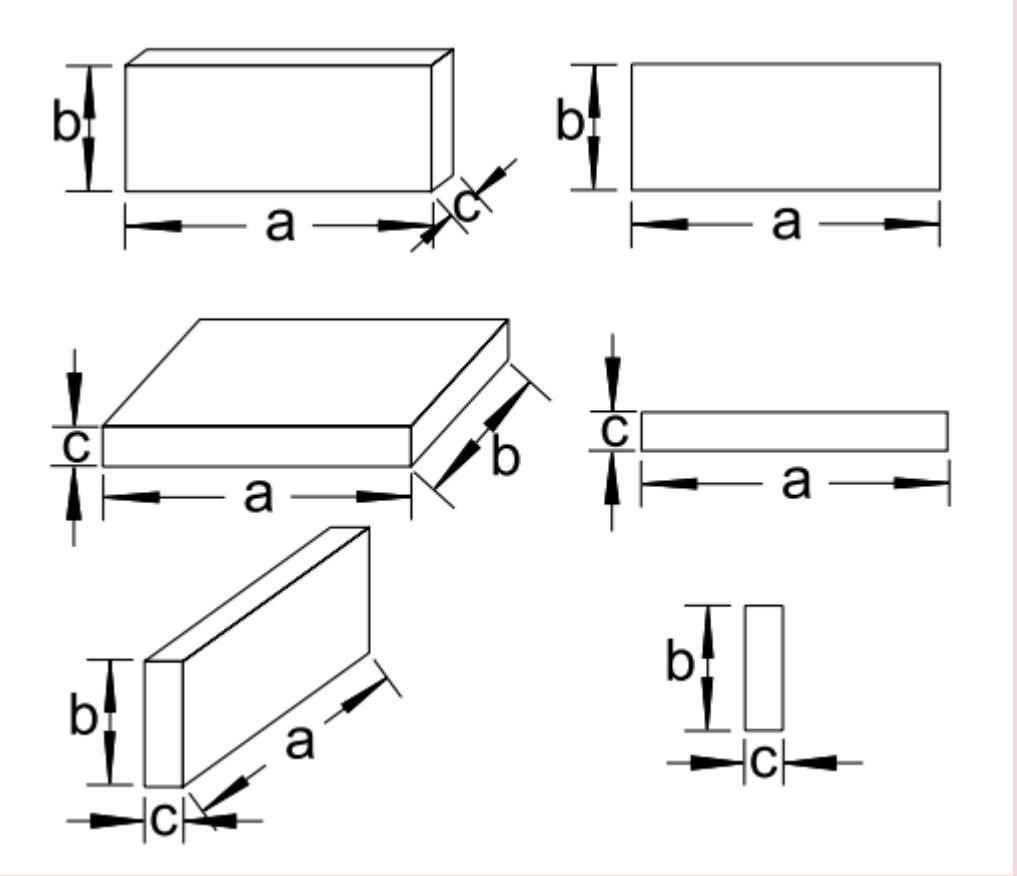
Tamaño

- Se definen tres dimensiones características:

- Diámetro mayor: dimensión más larga del área máxima proyectada. LARGO

- Diámetro intermedio: mínimo diámetro del área máxima proyectada o diámetro máximo del área mínima proyectada. ANCHO

- Diámetro menor: dimensión más corta del área mínima proyectada. ESPESOR



Tamaño – Ejemplo arroz

Tipos comerciales de arroz

Tipo	Relación largo/ancho	Longitud (mm)
Largo ancho	2 – 3	> 6
Largo fino	> 3	> 6
Medio	< 3	5,2 – 6
Corto	< 2	< 5,2

Fuente: Codex Alimentarius (FAO)

Tamaño – Ejemplo arroz

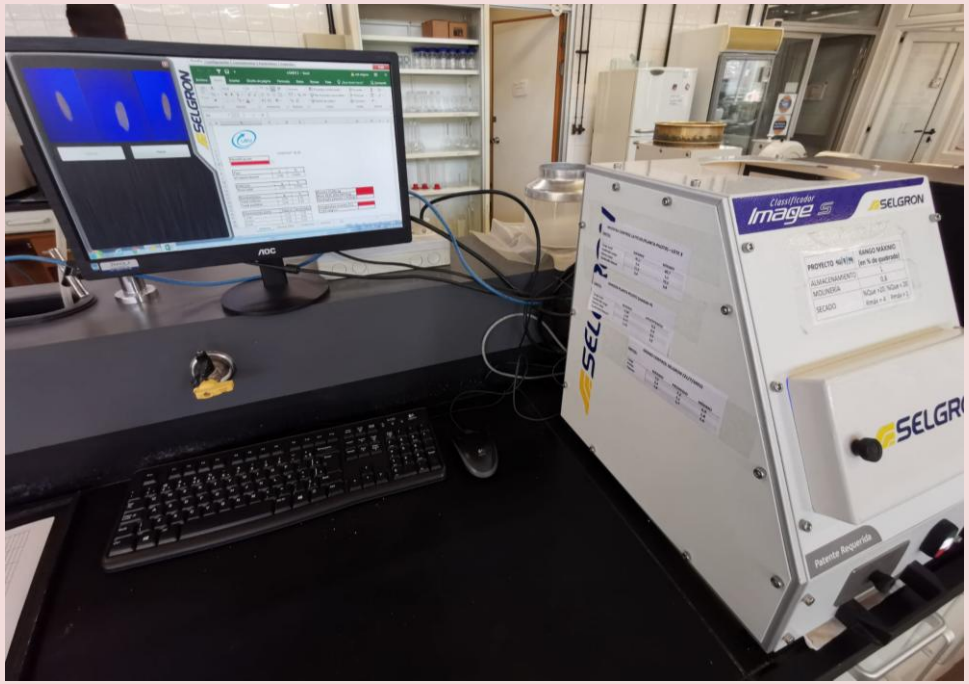
Tipos comerciales de arroz

Tamaño – Ejemplo arroz

Algunos equipos para determinación rápida de apariencia de arroz crudo

Selgron (Brasil)

Largo, ancho, espesor y quebrado de granos individuales.

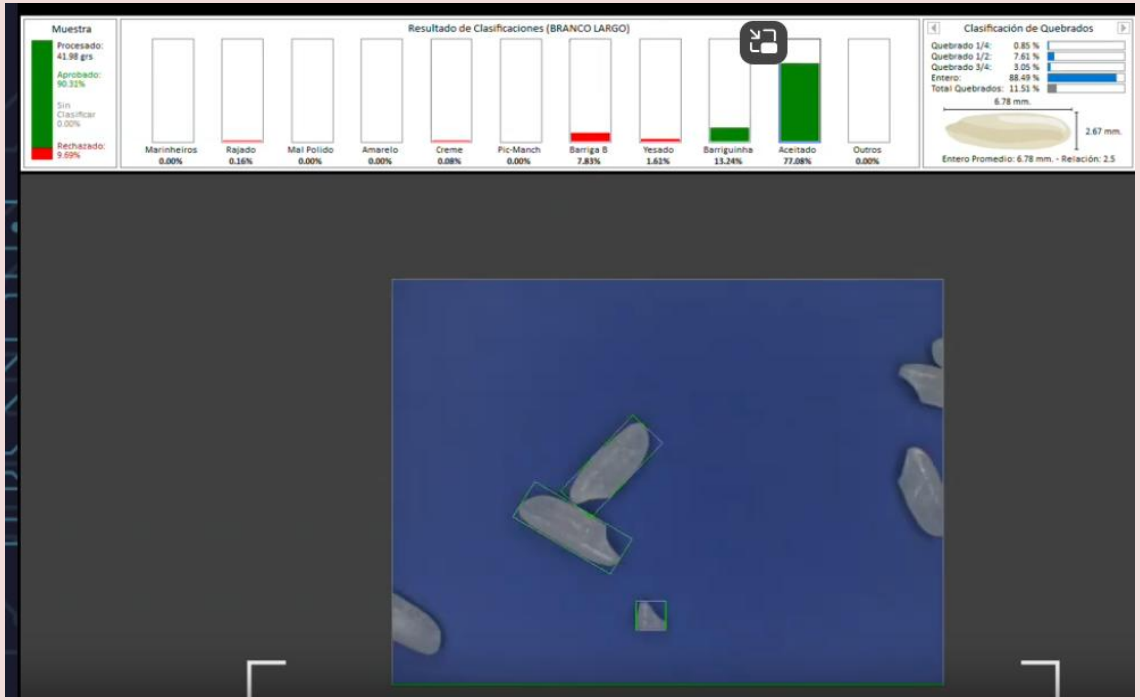


https://www.selgron.com.br/es/produtos/detalhe/clasificadora-cs-rice

Tamaño – Ejemplo arroz

Algunos equipos para determinación rápida de apariencia de arroz crudo

Machvision (Argentina) Largo, ancho, quebrado, defectos (manchas, yeso, mal elaborado)



https://machvision.com.ar/rice-analyzer/

Forma

Forma

- **Esfericidad:** relación entre el volumen del sólido y el volumen de una esfera de diámetro igual al mayor diámetro del objeto.

$$Esfericidad = \left(\frac{Volumen\ de\ muestra\ sólida}{Volumen\ de\ esfera\ circunscripta} \right)^{1/3}$$

Hay distintas definiciones de esfericidad.

Forma

- Relación de aspecto (Ra)

$$R_a = \frac{b}{a}$$

b: largo
a: ancho

$$Redondez = \frac{A_p}{A_c}$$

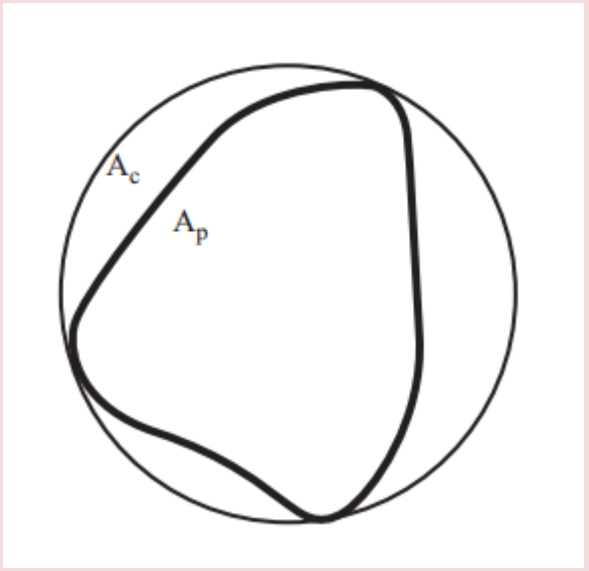
A_p*:* Mayor área de partícula proyectada
A_c*:* Área del menor círculo circunscrito

Forma

- Redondez

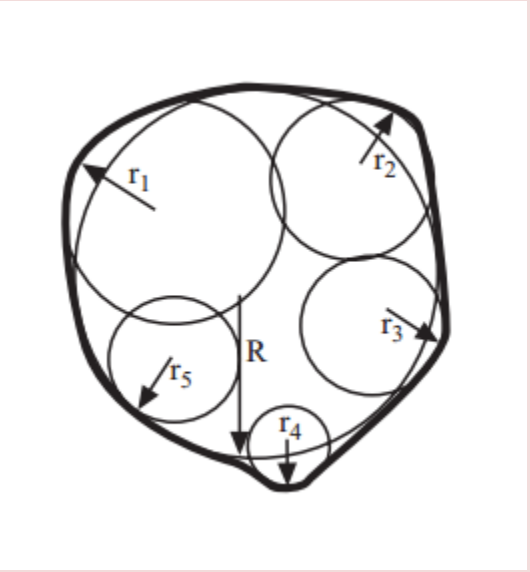
$$Redondez = \frac{A_p}{A_c}$$

A_p: Mayor área de partícula proyectada
A_c: Área del menor círculo circunscrito



$$Redondez = \frac{\sum_{i=1}^{N} r}{NR}$$

r: radio de curvatura (m)
R: radio del mayor círculo circunscrito
N: número total de esquinas sumadas en el numerador



Sahin & Gülüm Sumnu (2006)

Volumen

Volumen

- Cantidad de espacio tridimensional ocupado por un objeto.
- Unidades: m^3 (S.I.), cm^3, L, galones, etc.

- Volumen de sólidos puede determinarse:

    1. Cálculo a partir de dimensiones características.
    2. Experimentalmente por métodos de desplazamiento de líquido, gas o sólido.
    3. Por procesamiento de imágenes.

Cálculo a partir de dimensiones características

- Sólo aplica a objetos de geometría regular.

Table 1.1 Volume and Surface Area of Some Common Shapes[a]

Sphere

$V = \frac{4}{3}\pi r^3$ and $A = 4\pi r^2$

Cylinder

$V = \pi r^2 L$ and $A = 2\pi r^2 + 2\pi rL$

Cube

$V = a^3$ and $A = 6a^2$

Brick

$V = abc$ and $A = 2(ab + bc + ca)$

Prolate spheroid

$V = \frac{4}{3}(\pi ab^2)$ and $A = 2\pi b^2 + \frac{2\pi ab}{e} Sin^{-1} e$

Oblate spheroid

$V = \frac{4}{3}(\pi a^2 b)$ and $A = 2\pi b^2 + \frac{\pi b^2}{e} \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right)$

Frustam right cone

$V = \frac{\pi}{3} L(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)$ and $A = \pi(r_1 + r_2)\sqrt{L^2 + (r_1 - r_2)^2}$

[a] Where a and b, respectively, are major and minor semi-axes of the ellipse of rotation, e is the eccentricity given by $e = \sqrt{1 - (b/a)^2}$, r_1 and r_2, respectively, are the radii of base and top, and L is the altitude.

Rao et al. (2014)

Desplazamiento de líquido

- Aplicable si el sólido no absorbe líquido rápidamente.
- Los líquidos utilizados deben tener baja tensión superficial.
- En probeta o bureta: diferencia en volumen de líquido solo y líquido + material sumergido.
- Fluidos comúnmente utilizados: agua, alcohol, tolueno, tetracloroetileno.

Desplazamiento de líquido

- Determinación en picnómetro

$$V_s = \frac{Peso\ del\ líquido\ desplazado\ por\ el\ sólido}{Densidad\ del\ líquido} = \frac{(W_{pl} - W_p) - (W_{pls} - W_{ps})}{\rho_l}$$

Donde:

V_s: volumen del sólido (m^3)

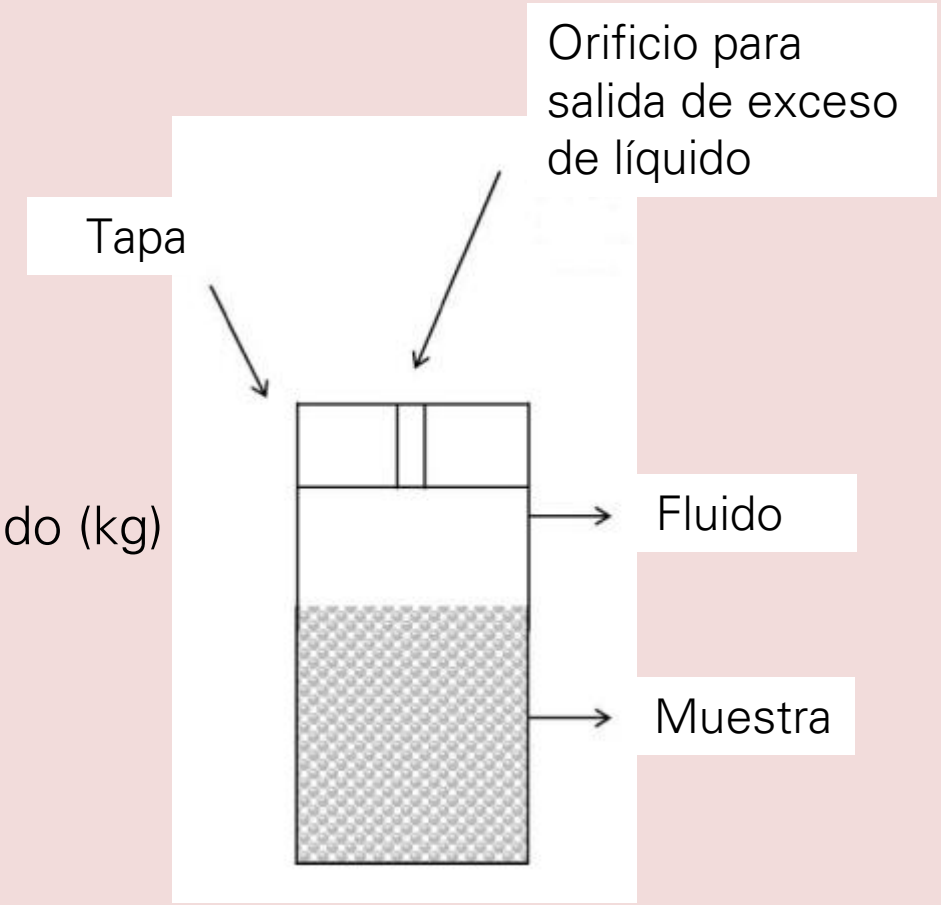
W_{pl}: peso picnómetro lleno con líquido (kg)

W_p: peso picnómetro vacío (kg)

W_{pls}: peso picnómetro con muestra sólida y lleno con líquido (kg)

W_{ps}: peso picnómetro con muestra sólida sin líquido (kg)

ρ_l: densidad del líquido (kg/m^3)



Adaptada de Sahin & Gülüm Sumnu (2006)

Desplazamiento de líquido

- Para objetos más grandes.
- Se basa en principio de Arquímedes: un cuerpo sumergido en un fluido sufre una reducción de peso igual al peso del fluido que desplaza.

$$V_s = \frac{G}{\rho_l} = \frac{W_{aire} - W_l}{\rho_l}$$

Donde:

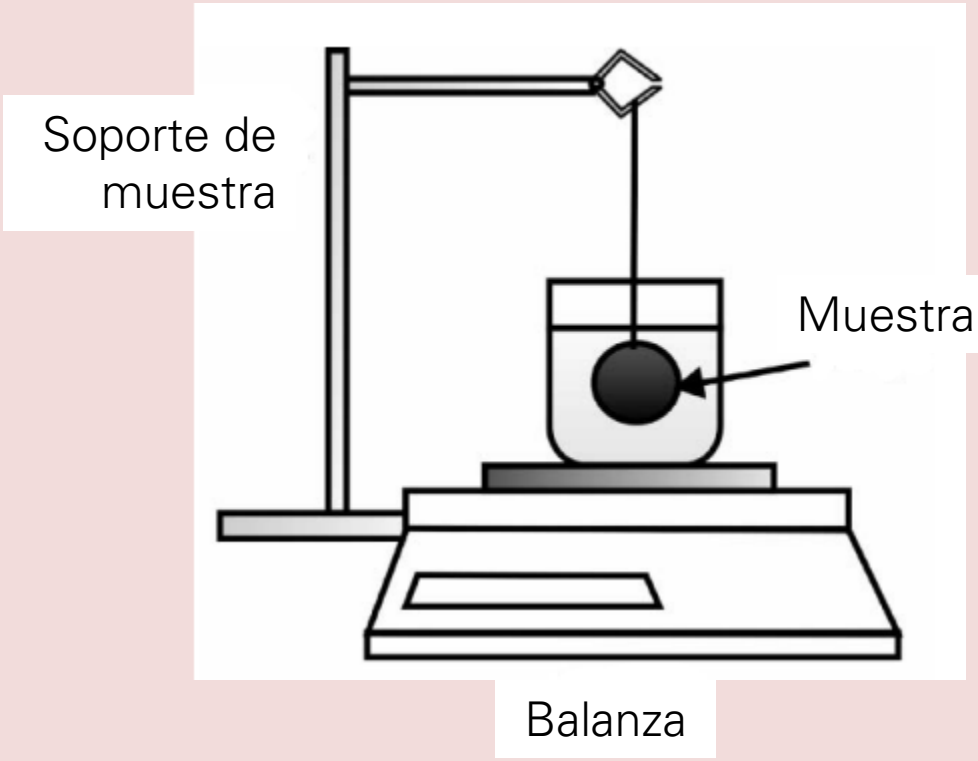
V_s: volumen del sólido (m^3)

G: fuerza de flotación (N)

W_{aire}: peso de muestra en aire(kg)

W_l: peso de muestra en líquido (kg)

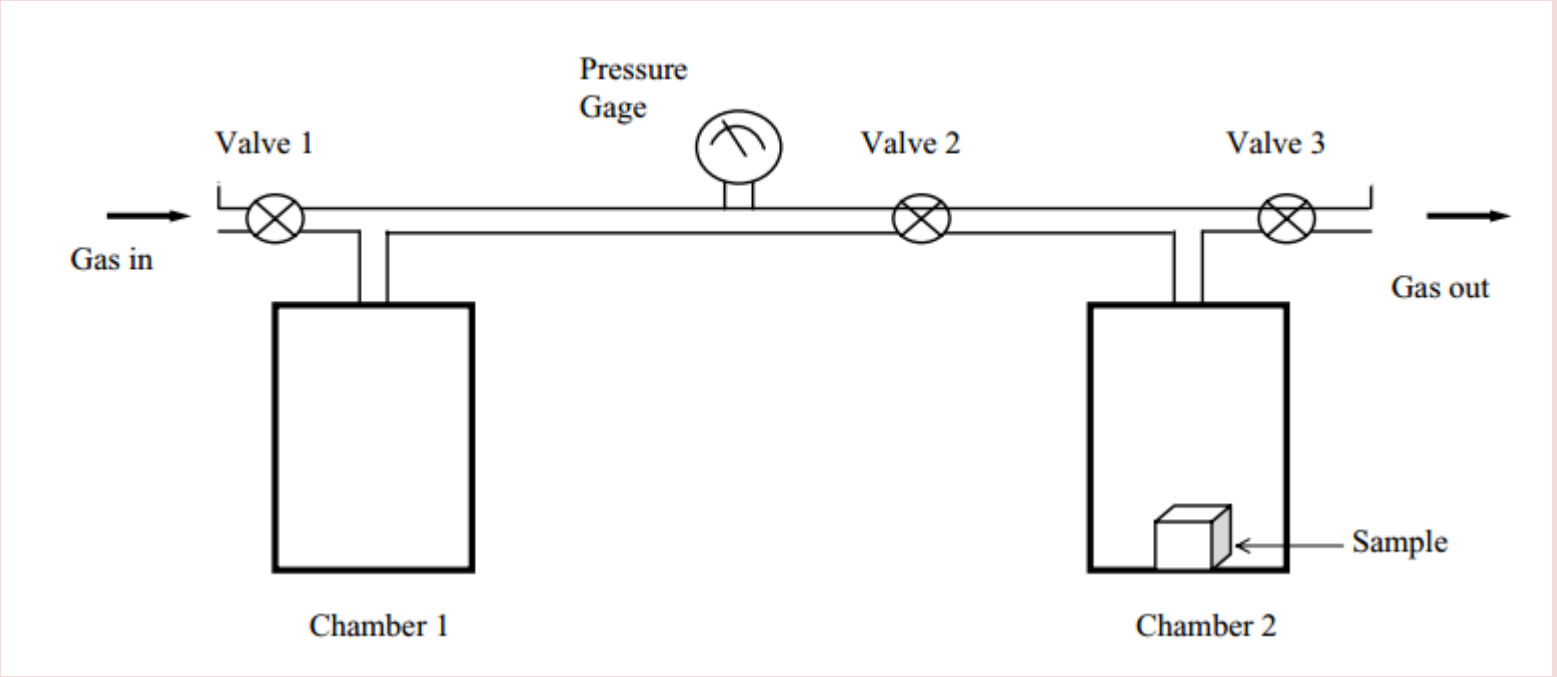
ρ_l: densidad del líquido (kg/m^3)



Adaptada de Sahin & Gülüm Sumnu (2006)

Desplazamiento de gas

- Para volumen de sólidos particulados o de forma irregular.
- Se utilizando picnómetros de gas o aire.
- Gases más utilizados: helio y nitrógeno.



Sahin & Gülüm Sumnu (2006)

Desplazamiento de gas

Se llena cámara 1 con la válvula entre cámaras cerrada (V2). Asumiendo que el gas se comporta idealmente:

$$P_1 V_1 = nRT_1$$

Donde:

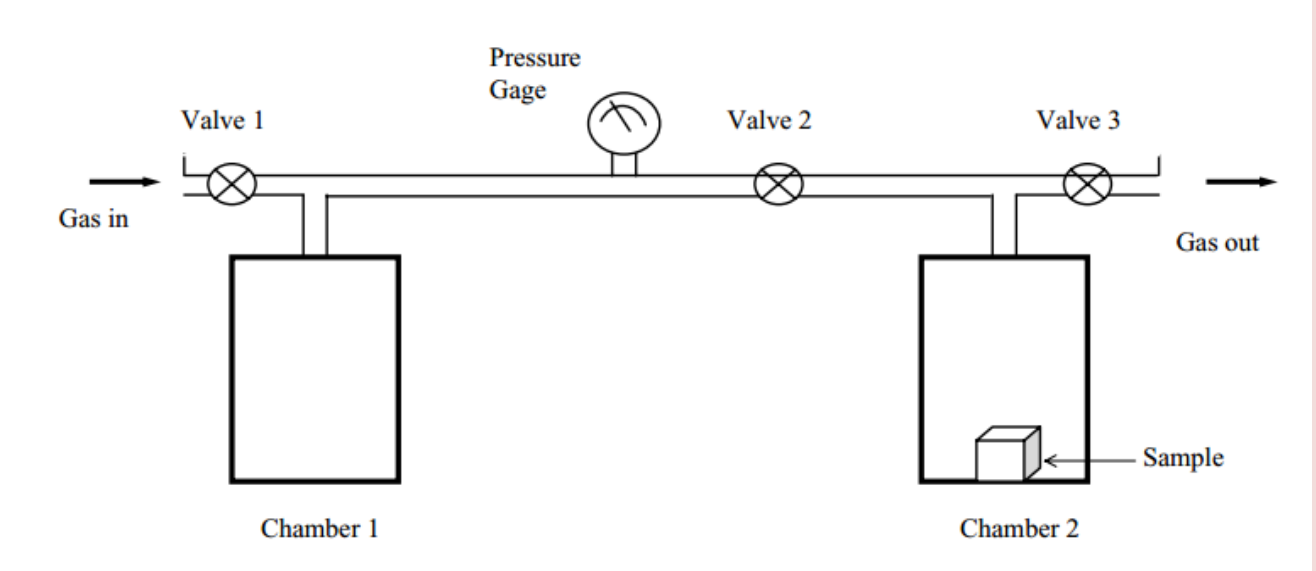
P_1: Presión equilibrio con V2 cerrada (Pa)

V_1: volumen cámara 1 (m^3)

n: moles de gas (kg mol)

R: constante de los gases (8314,34 J/kmol K)

T_1: temperatura absoluta (K)



Sahin & Gülüm Sumnu (2006)

Desplazamiento de gas

Se abre V2 y el gas llena los espacios vacíos en la segunda cámara.

$$m = m_1 + m_2$$

Donde:

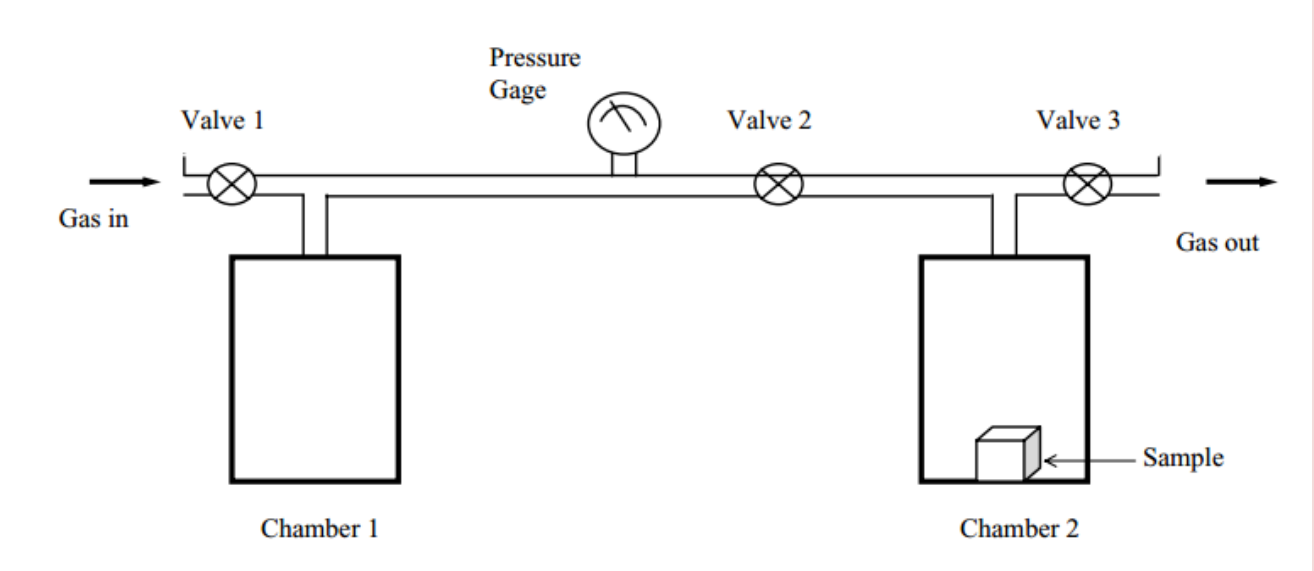
m: masa total de gas (kg)

m_1: masa de gas llenando la cámara 1 (kg)

m_2: masa de gas llenando los espacios vacíos de la cámara 2 (kg)

Asumiendo un sistema isotérmico, se llega a :

$$V_s = V_2 - V_1\left(\frac{P_1 - P_2}{P_2}\right)$$



Sahin & Gülüm Sumnu (2006)

Donde:

V_s: volumen sólido (kg^3)

V_1: volumen cámara 1 (m^3)

V_2: volumen cámara 2 (m^3)

P_1: P equilibrio con V_2 cerrada (Pa)

P_2: P equilibrio con V_2 abierta (Pa)

Desplazamiento de sólido

- Para sólidos irregulares.
- Por desplazamiento de arna, cuentas de vidrio y colza.

1. Se mide densidad de la colza.
2. Se repite proceso con muestra + colza.

$$W_{semillas} = W_{total} - W_{muestra} - W_{recipiente}$$

$$V_{semillas} = \frac{W_{semillas}}{\rho_{semillas}}$$

$$V_{muestra} = V_{recipiente} - V_{semillas}$$

Donde:
W: peso (kg)
V: volume (m^3)
P: densidad (kg/ m^3)

Expresiones de volumen

- **Volumen sólido (Vs):** volumen de material sólido excluyendo cualquier poro interior lleno con aire.
  - Determinación por método de desplazamiento de gas.

- **Volumen aparente (Vap):** volumen de una sustancia incluyendo todos los poros dentro del material (poros internos).
  - Para geometrías regulares: cálculo a partir de dimensiones características.
  - Para geometrías irregulares: determinación por métodos de desplazamiento de sólido o líquido.

- **Volumen total (o bulk) (Vtot):** volumen del material empacado o apilado, incluye los poros internos del material así como los espacios vacíos fuera de los límites de las partículas.

Densidad

Densidad

- Se requiere conocer la densidad de alimentos para: separación, centrifugación, transporte neumático, transporte hidráulico, calcular potencia requerida para bombeo, etc.
- Se define como masa por unidad de volumen.
- Unidad S.I.: kg/m^3
- El inverso de la densidad es el volumen específico (m^3/kg)

Densidad

- Dependencia con la temperatura
    - La densidad usualmente disminuye con la temperatura.
    - Efecto es mucho más pronunciado en gases y líquidos que en sistemas sólidos.

- Dependencia con la presión
    - Usualmente densidad aumenta con presión.
    - Gases mucho más compresibles que líquidos y sólidos.

Densidad

- Dependencia con la temperatura en alimentos

Ecuaciones de Choi & Okos (1986):

$$\rho_{agua} = 997{,}18 + 3{,}1439 \times 10^{-3} - 3{,}7574 \times 10^{-3} T^2$$

$$\rho_{CHO} = 1599{,}1 - 0{,}31046T$$

$$\rho_{proteína} = 1330 - 0{,}5184T$$

$$\rho_{grasa} = 925{,}59 - 0{,}41757T$$

$$\rho_{cenizas} = 2423{,}8 - 0{,}28063T$$

$$\rho_{hielo} = 916{,}89 - 0{,}3107T$$

Donde densidades en kg/m^3, temperaturas en °C.
Válidas para T=-40 – 150°C

Densidad

Ejemplo – Cálculo de densidad de espinaca a 20 °C

Table E.1.4.1 Composition of Spinach

Component	*Composition (%)*
Water	91.57
Protein	2.86
Fat	0.35
Carbohydrate	1.72
Ash	3.50

Table E.1.4.2 Density and Mass Fraction (X_i^w) of Components of Spinach

Component	*Density (kg/m^3)*	X_i^w
Water	995.74	0.9157
Protein	1319.63	0.0286
Fat	917.24	0.0035
Carbohydrate	1592.89	0.0172
Ash	2418.19	0.0350

$$\rho_T = \frac{1}{\frac{0.9157}{995.74} + \frac{0.0286}{1319.63} + \frac{0.0035}{917.24} + \frac{0.0172}{1592.89} + \frac{0.035}{2418.19}} = 1030.53 \ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Figura et al. (2007)

Densidad

- Dependencia con la presión – sólidos y líquidos

- Sólidos y líquidos ideales tienen comportamiento elástico: su volumen se reduce al aplicarles presión, pero se recuperan completamente al volumen inicial, al restablecer presión.

$$\frac{\Delta V}{V} = -k.\Delta p \xrightarrow[\text{m = cte.}]{} \frac{\Delta \rho}{\rho} = \left|\frac{\Delta V}{V}\right| = |k.\Delta p|$$

Donde: p = presión (Pa)
k = compresibilidad (Pa^{-1})
V = volumen en m^3
ρ = densidad (kg/m^3)
m = masa (kg)

Densidad

- **Densidad relativa (d) o peso específico relativo:** Relación entre la densidad absoluta de un material y la densidad de un material de referencia.
- En general se usa agua a 4 o 20 °C.

$$d = \frac{\rho}{\rho_R}$$

Donde: d = densidad relativa o peso específico relativo
ρ = densidad (kg/m^3)
ρ_R = densidad del material de referencia (kg/m^3)

Densidad

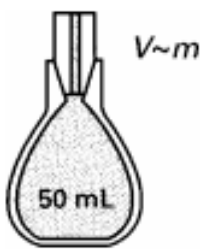
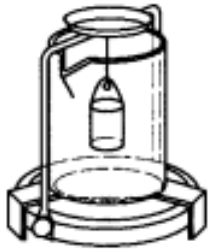
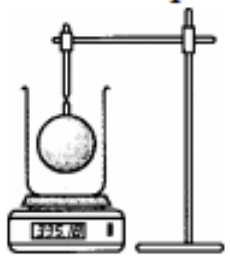
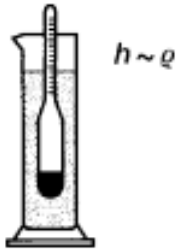
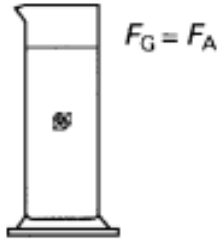
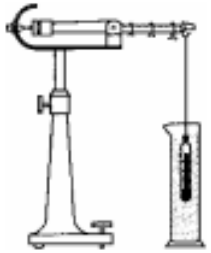
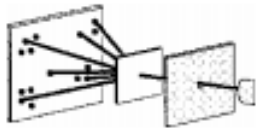
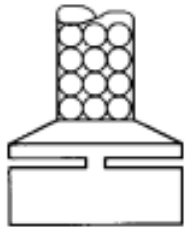
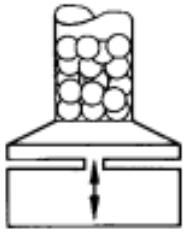
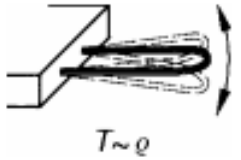
name	pycnometer	hydrostatic balance	submersion balance for viscous liquids	hydrometer	density gradient column
					
for	fluids, solids	fluids, solids	fluids	fluids	Solid particles
	Mohr–Westphal balance	X-ray technique	bulk density	tapped bulk density	resonator frequency
					
for	fluids	solids	solids	solids	gases, fluids

Figura et al. (2007)

Densidad

- Overrun (A)

$$A = \frac{V_{espuma} - V_{líquido}}{V_{líquido}}$$

$$m_{espuma} = m_{líquido} + m_{gas} \sim m_{líquido} \qquad m = m_{espuma} \sim m_{líquido}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \qquad A = \frac{\rho_{líquido}}{\rho_{espuma}} - 1$$

Porosidad

Porosidad

- Volumen de la fracción de aire en la muestra.
- Muy relevante para la textura y calidad de alimentos secos y de humedad intermedia.
- Se requiere modelado y diseño de operaciones de transferencia de calor y masa: secado, horneado, fritado, calentamiento, enfriamiento, extrusión.

$$Porosidad = \frac{Volumen\ de\ poros}{Volumen\ total}$$

Encogimiento

Encogimiento

- Reducción de volumen del alimento durante procesamiento.
- El material colapsa o se encoge por la tensión de contracción debida al desequilibrio de presión entre interior y exterior de alimento, durante remoción de humedad.
- Afecta coeficiente de difusión del material y velocidad de secado.
- Encogimiento aparente (Sap): relación entre volumen aparente a una humedad dada y volumen inicial del material antes de su procesamiento.

$$S_{ap} = \frac{Volumen\ aparente}{Volumen\ aparente\ inicial}$$

- También puede definirse como el % de cambio de volumen respecto al volumen aparente inicial.

Encogimiento

- **Encogimiento isotrópico**: encogimiento uniforme en todas las dimensiones del material.
- **Encogimiento anisotrópico**: encogimiento NO uniforme en las diferentes dimensiones del material.

- Modelos para predecir encogimiento durante secado:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1-\varepsilon)}\left[1 + \frac{\rho_0(X - X_0)}{\rho_w(1 + X_0)}\right]$$

(Perez & Calvelo, 1984)

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1-\varepsilon)}\left[1 + \frac{\rho_0(X - X_0)}{\rho_w(1 + X_0)} - \varepsilon_0\right]$$

(Mayor & Sereno, 2004)

Encogimiento

- Modelos para predecir encogimiento durante secado:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1-\varepsilon)}\left[1 + \frac{\rho_0(X - X_0)}{\rho_w(1 + X_0)}\right]$$ (Perez & Calvelo, 1984)

$$\frac{V}{V_0} = \frac{1}{(1-\varepsilon)}\left[1 + \frac{\rho_0(X - X_0)}{\rho_w(1 + X_0)} - \varepsilon_0\right]$$ (Mayor & Sereno, 2004)

Donde: V= volumen
V_0= volumen inicial
X= contenido de humedad en base seca
X_0= contenido de humedad inicial en base seca
ρ_0= densidad inicial
ρ_w= densidad del agua
ε= porosidad del material
ε_0= porosidad inicial del material

Bibliografía

- Arana, I. (2012). Physical properties of foods. CRC Press, Boca Raton.
- Figura, L.O.; Teixeira, A.A. (2007). Food Physics: Physical properties- Measurement and Applications. Springer, Berlin.
- Sahin, S.; Gülüm Sumnu, S. (2006). Physical properties of foods. Springer, New York.