

# LICENCIATURA EN FISICA MEDICA

## BIOFISICA

### CAPITULO 6

Metabolismo: Energía, Calor, Trabajo  
y Potencia del Cuerpo Humano.

# INGRESO, ALMACENAMIENTO, USO Y PERDIDA DE ENERGIA I

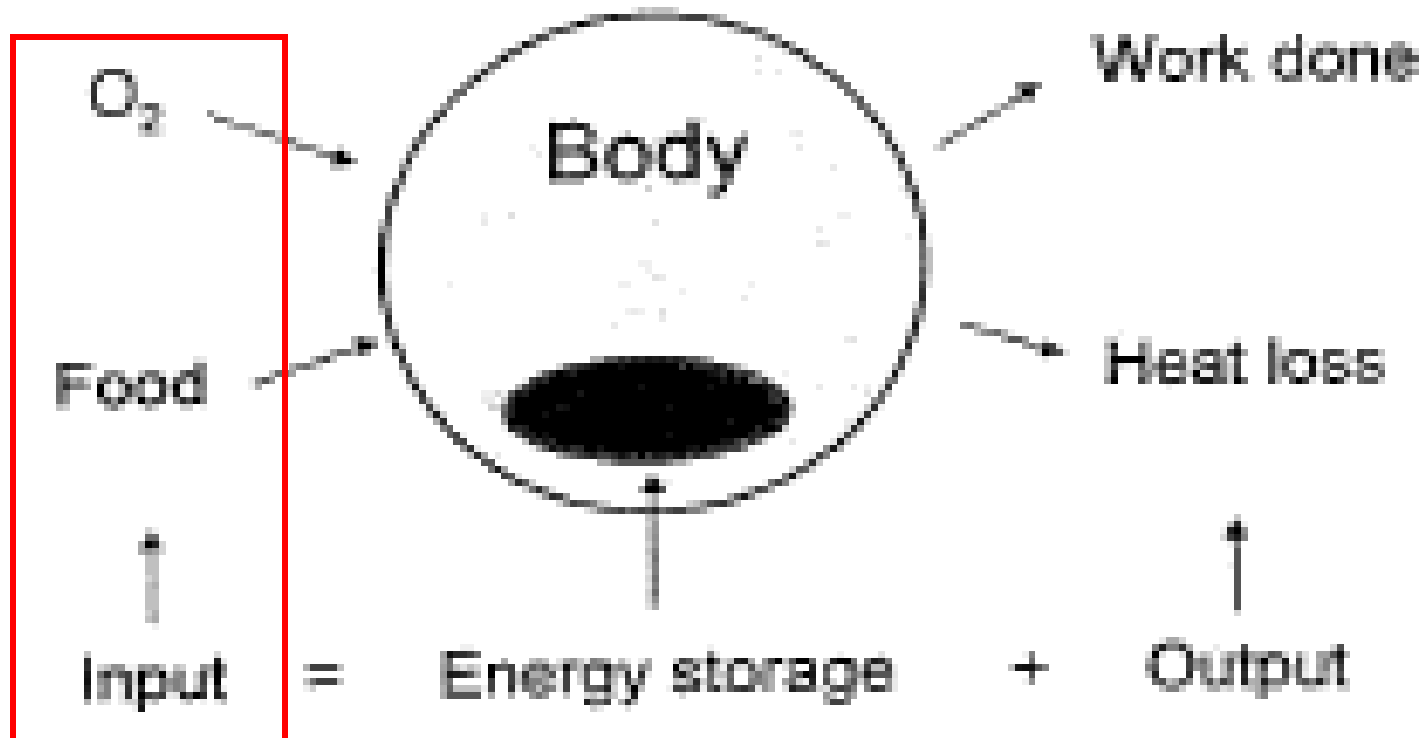
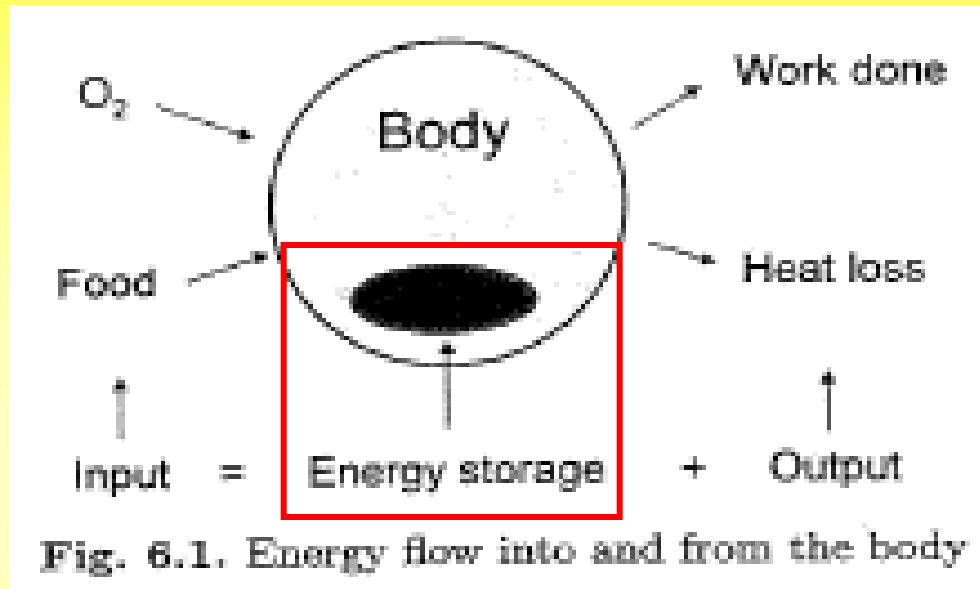


Fig. 6.1. Energy flow into and from the body

# INGRESO, ALMACENAMIENTO, USO Y PERDIDA DE ENERGIA II

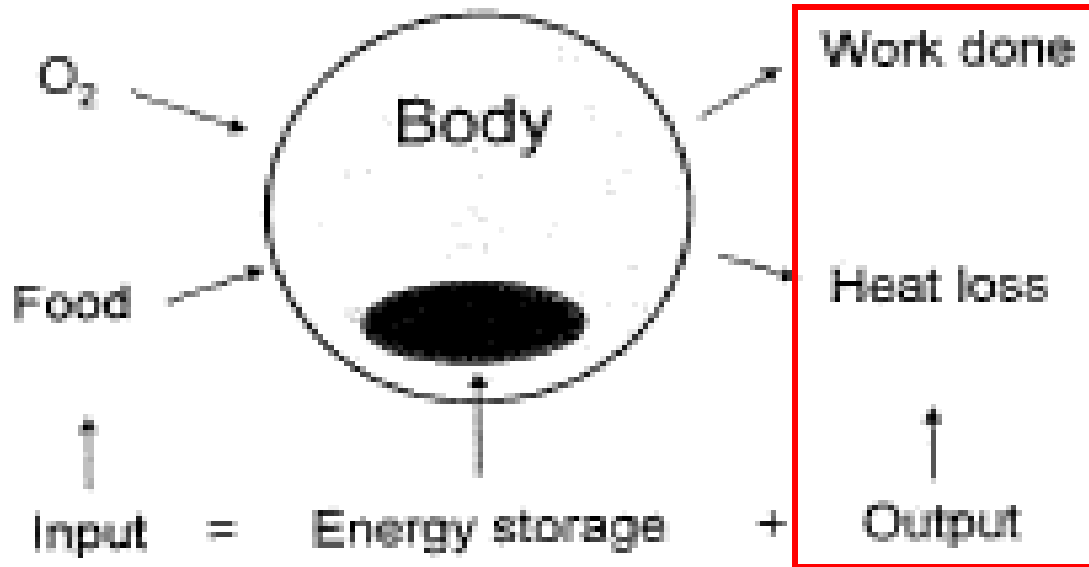


**Almacenamiento de energía:** Mediante reacciones **anabólicas** por las que moléculas simples son combinadas para producir otras más complejas.

**Utilización de la energía almacenada:** Mediante reacciones **catabólicas** por las que moléculas complejas almacenadas son reducidas a moléculas simples, las que son más fáciles de transportar y más rápidas de reaccionar para entregar energía.

**Variación de la energía almacenada:**  $\Delta U$ .

# INGRESO, ALMACENAMIENTO, USO Y PERDIDA DE ENERGIA III



$W$

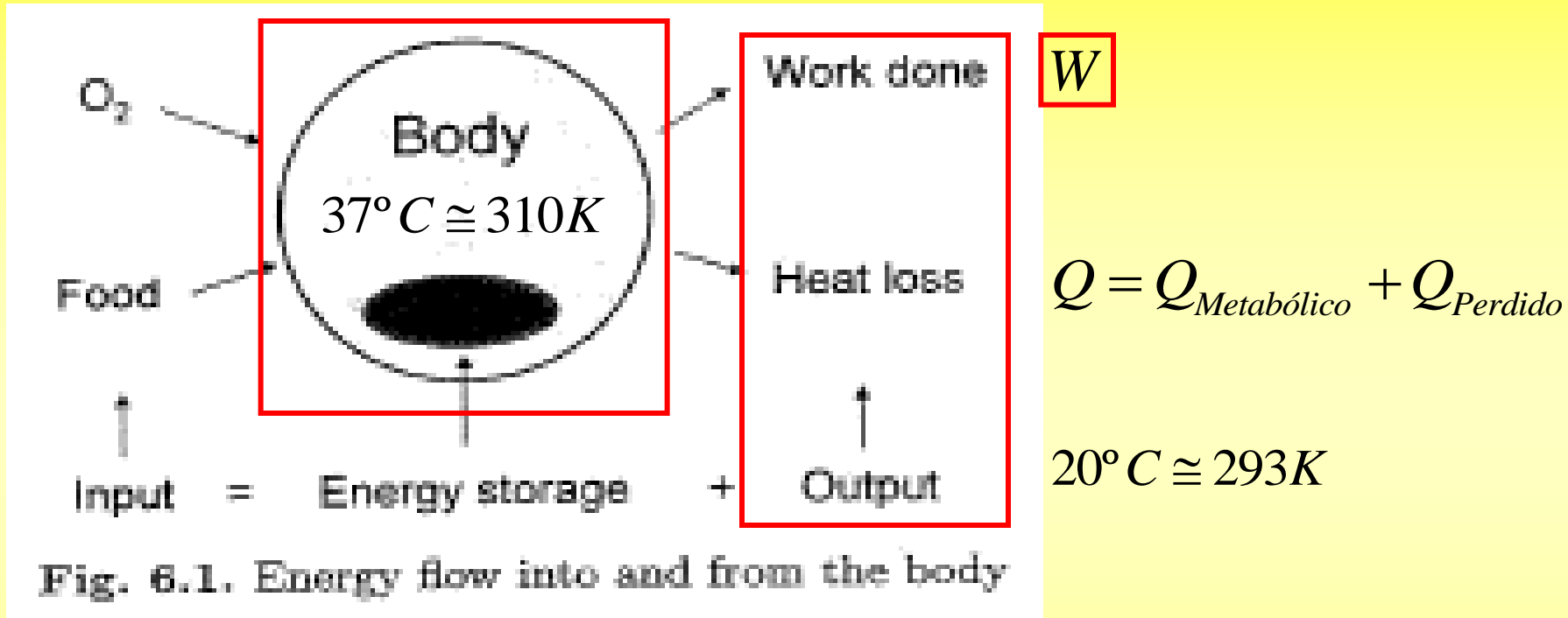
$$Q = Q_{\text{Metabólico}} + Q_{\text{Perdido}}$$

Fig. 6.1. Energy flow into and from the body

$$\Delta U = Q_{\text{Metabólico}} + Q_{\text{perdido}} + W$$

$$\frac{dU}{dt} = \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{Metabólico}} + \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{\text{perdido}} + \frac{dW}{dt}$$

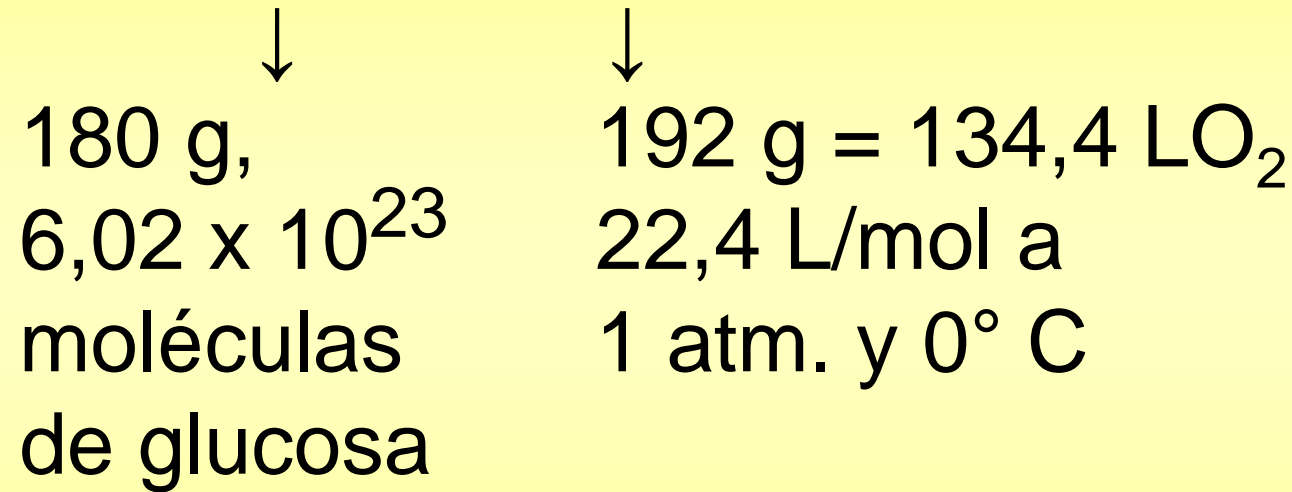
# INGRESO, ALMACENAMIENTO, USO Y PERDIDA DE ENERGIA IV



$$\left( \varepsilon_{Mecánica/Carnot} \right) \% = \left( 1 - \frac{T_{Baja}}{T_{Alta}} \right) \% = 100 \times \left( 1 - \frac{293K}{310K} \right) \cong 5,5\%$$

$$\left( \varepsilon_{Mecánica/Hill} \right) \% \cong 25\%$$

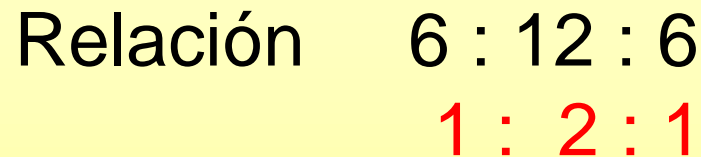
# COMBUSTION DE LA GLUCOSA U OXIDACION METABOLICA



Valor calórico:  $686 \text{ kcal}/180 \text{ g} = 3,80 \text{ kcal/g}$

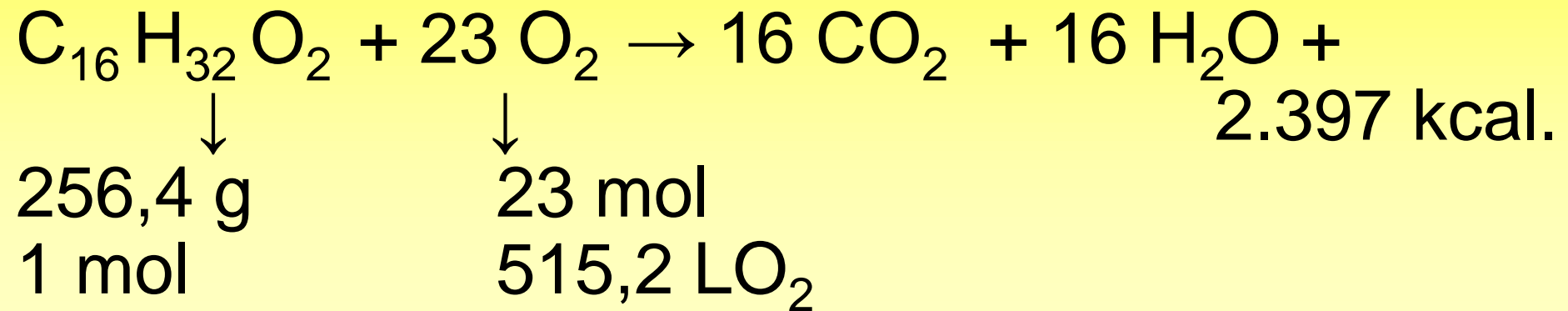
Equivalente calorífico:  $686 \text{ kcal}/134,4 \text{ LO}_2 =$   
 $5,5 \text{ kcal/LO}_2$

# ACIDO PALMITICO



# COMBUSTION DEL ACIDO PALMITICO

Su oxidación es representativa de los ácidos grasos



Valor calórico :  $2.397 \text{ kcal}/256,4 \text{ g} = 9,3 \text{ kcal/g}$

Equivalente calórico:  $2.397 \text{ kcal}/515,2 \text{ LO}_2 = 4,7 \text{ kcal/LO}_2$

Nuestro cuerpo emplea la oxidación del ácido palmítico porque con 1 mol combinado con 106 mol de ADP y 106 mol de Pi se obtienen 106 mol de ATP.



# CONTENIDO CALORICO PROMEDIO DE LOS ALIMENTOS

Table 6.2. Average caloric content of food. (Using data from [306]) (1998)

food	net caloric value (kcal/g)		bomb calorimetry energy (kcal/g)		calorific equivalent (kcal/L O <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub> production (kcal/L CO <sub>2</sub> )	RER (L CO <sub>2</sub> /L O <sub>2</sub> )
					Laboratorio		RER: Respiratory Exchange Ratio
carbohydrate	4.02	2 %	4.10		5.05	5.05	1.0
protein	4.20	8 %	5.65		4.46	5.57	0.80
ethanol	7.00	- -	7.10		4.86	7.25	0.67
fat	8.98	5 %	9.45		4.74	6.67	0.71

RER is the respiratory exchange ratio.

**Pérdidas en la digestión**

**RER: Relación de Intercambio Respiratorio o RQ: Respiratory Quotient.**

1. La pequeña pérdida en el alcohol se va en la orina y exhalado al respirar.
2. Las proteínas pierden un 17 % extra por la orina.

# DENSIDAD DE ENERGIA ALMACENADA POR COMBUSTIBLES QUIMICOS

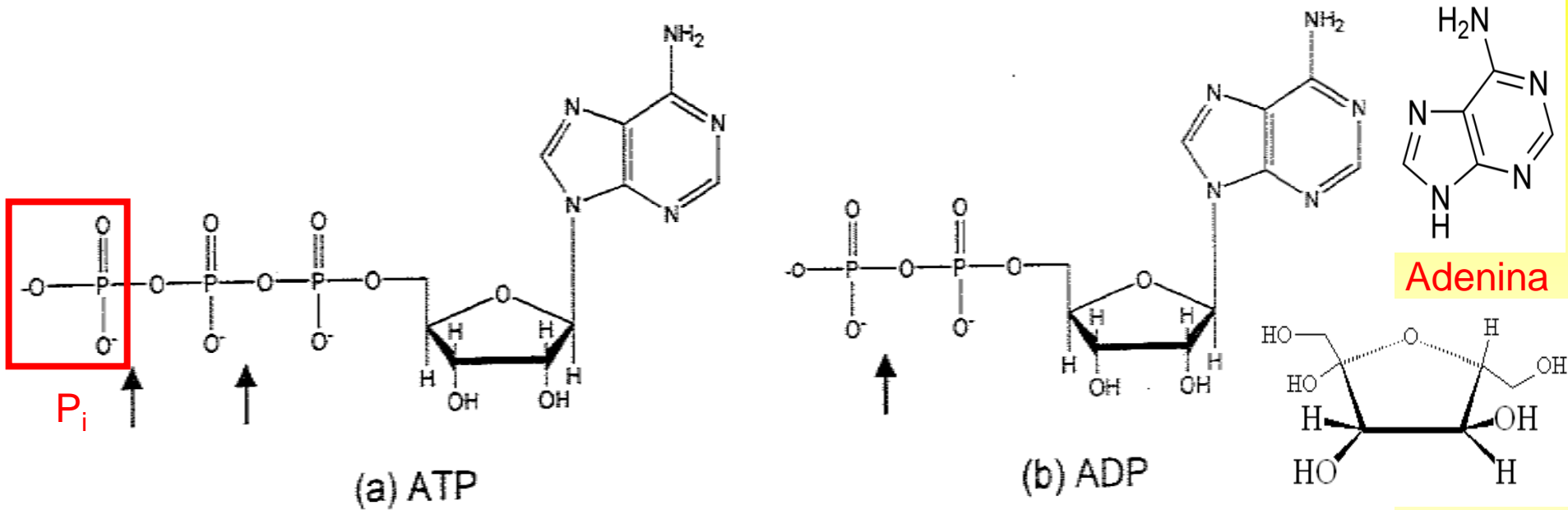
Table 6.3. Energy storage density for chemical fuels. (Using data from [308]) (1999)

energy storage fuel	storage density (J/m <sup>3</sup> )	storage density (J/kg)
ATP	$1.4 \times 10^8$	$1.0 \times 10^5$
H <sub>2</sub> gas, 10 <sup>3</sup> atm.	$4.9 \times 10^9$	$1.2 \times 10^8$
nitroglycerine	$1.0 \times 10^{10}$	$6.3 \times 10^6$
glycine (amino acid)	$1.0 \times 10^{10}$	$6.5 \times 10^6$
wood	$1.1 \times 10^{10}$	$1.9 \times 10^7$
urea	$1.4 \times 10^{10}$	$1.1 \times 10^7$
methanol	$1.8 \times 10^{10}$	$2.2 \times 10^7$
vegetable protein	$2.3 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^7$
acetone	$2.4 \times 10^{10}$	$3.1 \times 10^7$
glucose	$2.4 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^7$
glycogen (starch)	$2.5 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^7$
animal protein	$2.5 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^7$
carbohydrate	$2.6 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^7$
gasoline	$2.8 \times 10^{10}$	$4.4 \times 10^7$
butane	$3.0 \times 10^{10}$	$4.9 \times 10^7$
fat	$3.3 \times 10^{10}$	$3.9 \times 10^7$
cholesterol (lipid)	$4.2 \times 10^{10}$	$3.9 \times 10^7$
H <sub>2</sub> solid (10 <sup>5</sup> atm.)	$7.2 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^8$
diamond	$1.2 \times 10^{11}$	$3.3 \times 10^7$

Almidón, fécula.

Note that  $10^{10} \text{ J/m}^3 = 2.39 \text{ kcal/cm}^3$  and  $10^7 \text{ J/kg} = 2.39 \text{ kcal/g}$ .

# ATP Y ADP I (M1)

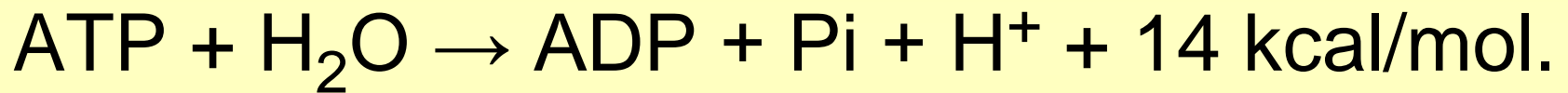


**Fig. 6.3.** The structures of (a) ATP and (b) ADP, showing that ATP has one more inorganic phosphate group P<sub>i</sub> than does ADP. From left to right are the (a) three or (b) two phosphate groups, the five-carbon sugar, ribose, and adenine, which is the double-ringed structure. The two unstable, high energy bonds linking the phosphate groups in ATP and the one similar unstable bond in ADP are denoted by *arrows*



La energía liberada por hidrólisis del ATP puede variar desde 7 a 14 kcal/mol, dependiendo de las condiciones celulares

- 1- Normalmente las células de los músculos esqueléticos contienen suficiente ATP.
- 2- Por hidrólisis del ATP se genera energía:

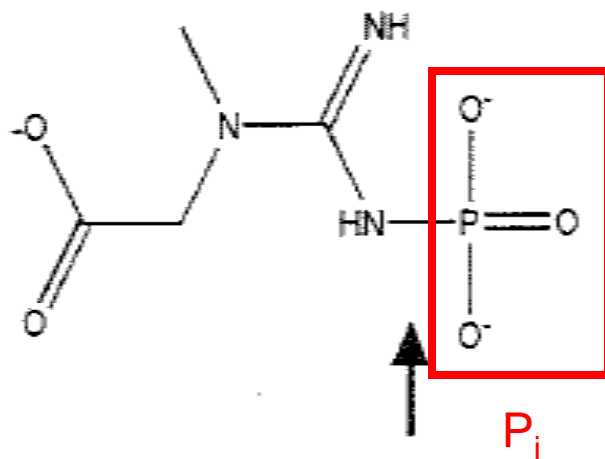


- 3- Esta energía alcanza para **8 twitches** o **contracciones musculares** o **3 s** de intensa actividad o correr los primeros **25 m** de una carrera de velocidad.

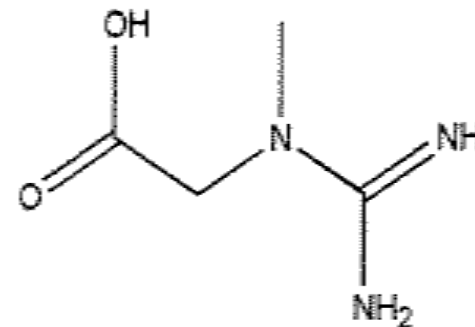
*Twitch: Contracción muscular brevísima, inesperada e inconsciente.*

# MODOS DE PRODUCCION DE ATP

- 1) Sistema Fosfágeno
  - 2) Glucólisis Anaeróbica o Sistema Glucógeno-Acido Láctico
  - 3) Metabolismo Aeróbico de Glucógeno (Fosforilación Oxidativa)
- (2) y (3) Metabolización Anaeróbica y Aeróbica de Carbohidratos



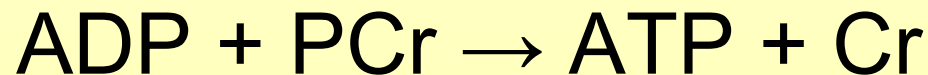
(a) PCr



(b) Cr

**Fig. 6.5.** The structures of (a) phosphocreatine (PCr) and (b) creatine (Cr), showing that PCr has an **inorganic phosphate group  $P_i$** . The unstable, high-energy bond linking the phosphate group in PCr is denoted by an *arrow*. The enzyme that catalyzes the breakdown of PCr to form ATP, which is the transfer of the phosphate group from PCr to ADP to form ATP (6.17), is called creatine kinase

- 1- Ante un mayor requerimiento de ATP las células de los músculos esqueléticos lo sintetizan a partir de la fosfocreatina PCr.
- 2- Dicha síntesis permite generar energía:



- 3- Esta energía alcanza para los **100 twitches o contracciones musculares** de una actividad de **8 - 10 s** como para correr algo más que los primeros **50 m** de una carrera de velocidad.

# Sistema Fosfágeno

- 1- Provee el mayor pico de potencia con unos  $\approx 4$  mol de ATP por minuto utilizables por los músculos.
- 2- Se emplea en cortos lapsos, de 3 a 10 s, y alcanza para un salto o una carrera de 100 m de atletas de competencia.
- 3- PCr se recompone a partir de Cr y Pi.
- 4- No produce ácido láctico.



# Sistema Fosfágeno

- Velocistas, Jugadores de fútbol, Saltadores, Levantadores de Pesas y otras actividades que sólo requieren pocos segundos para completarse.
- Las reservas de PCr se agotan a los 6s-8s en ejercicios explosivos, y se regeneran hasta en un 90% en aproximadamente dos minutos.

# MODOS DE PRODUCCION DE ATP

1) Sistema Fosfágeno

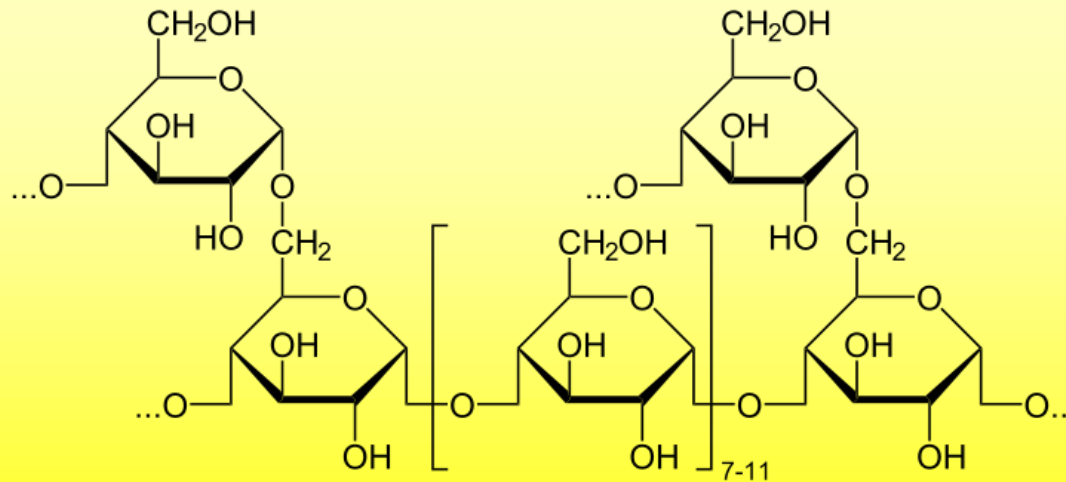
(2) y (3) Metabolización Anaeróbica y Aeróbica de Carbohidratos.

2) Glucólisis Anaeróbica o Sistema Glucógeno-Acido Láctico

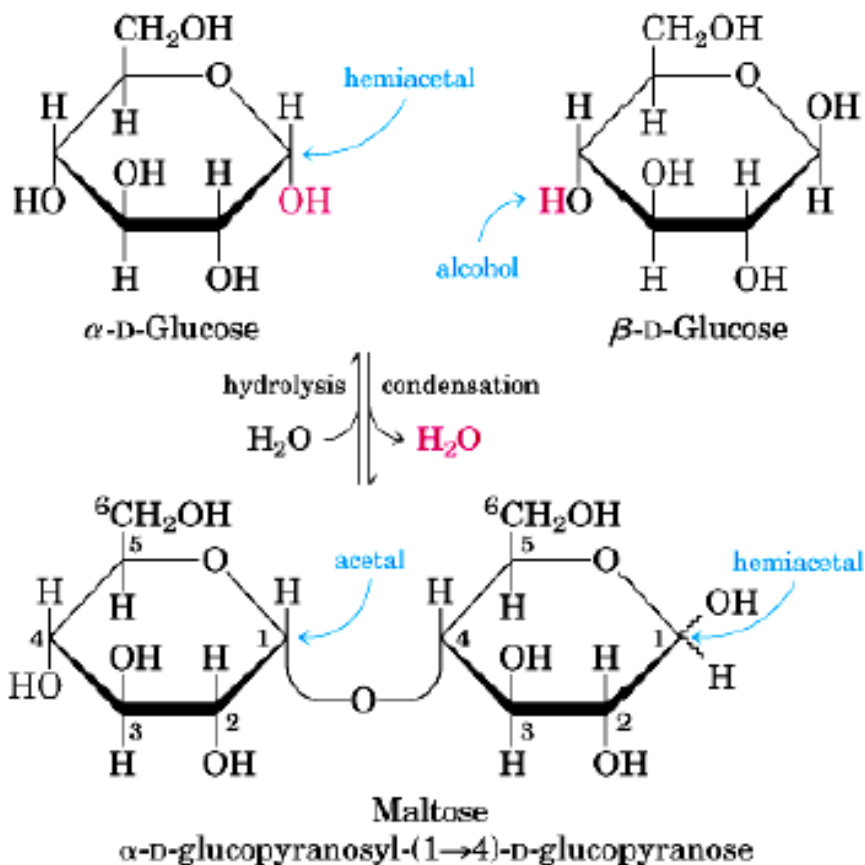
3) Metabolismo Aeróbico de Glucógeno (Fosforilación Oxidativa)

## (2) y (3) Metabolización Anaeróbica y Aeróbica de Carbohidratos. Requiere Glucógeno

El **glucógeno** es un polisacárido de reserva energética formado por cadenas ramificadas de glucosa; es insoluble en agua, en la que forma dispersiones coloidales. Abunda en el hígado y en menor cantidad en los músculos, así como también en varios tejidos.



# Glucólisis Anaeróbica o Sistema Glucógeno-Acido Láctico




- Two sugar molecules can be joined in tandem, when a hydroxyl (alcohol) group of one sugar displaces the hydroxyl group on the other sugar's anomeric carbon.
- The bond formed is called a **glycosidic bond**. In forming the **glycosidic bond**, an **acetal** is generated on one sugar (at carbon 1) in place of the **hemiacetal**. Convince yourself that the other carbon (carbon 4) is not an acetal.
- Similarly to peptide bond formation, one mole of water is formed per glycosidic bond generated.
- The disaccharide formed upon condensation of two glucose molecules is called **Maltose**.

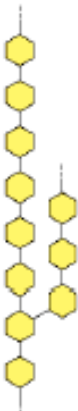
# GLUCOSA

**Homopolysaccharides**

Unbranched




Branched




**Heteropolysaccharides**

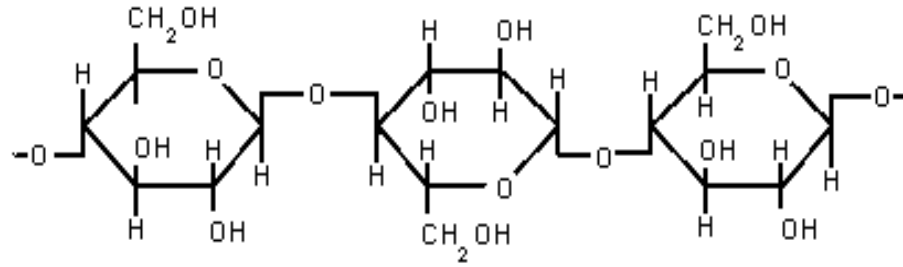
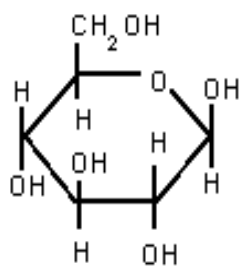
Two monomer types, unbranched



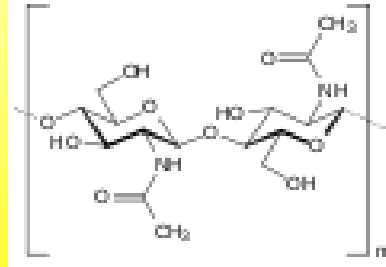
Multiple monomer types, branched



- In nature, carbohydrates are most often found as high molecular weight polymers of monosaccharides.
- These polysaccharides (sometimes called glycans) can be homopolysaccharides (if all of the repeating units are the same), or heteropolysaccharides (if the repeating units are not the same).
- Polysaccharides serve structural purposes (cellulose and chitin), or serve as fuel reserves (glycogen and starch)
- Polysaccharides do not have a defined molecular weight. Remember that this is in contrast to proteins. Any given protein will always have the same molecular weight and amino acid composition. This because they are synthesized on a template. This is not the case for polysaccharides.



Celulosa



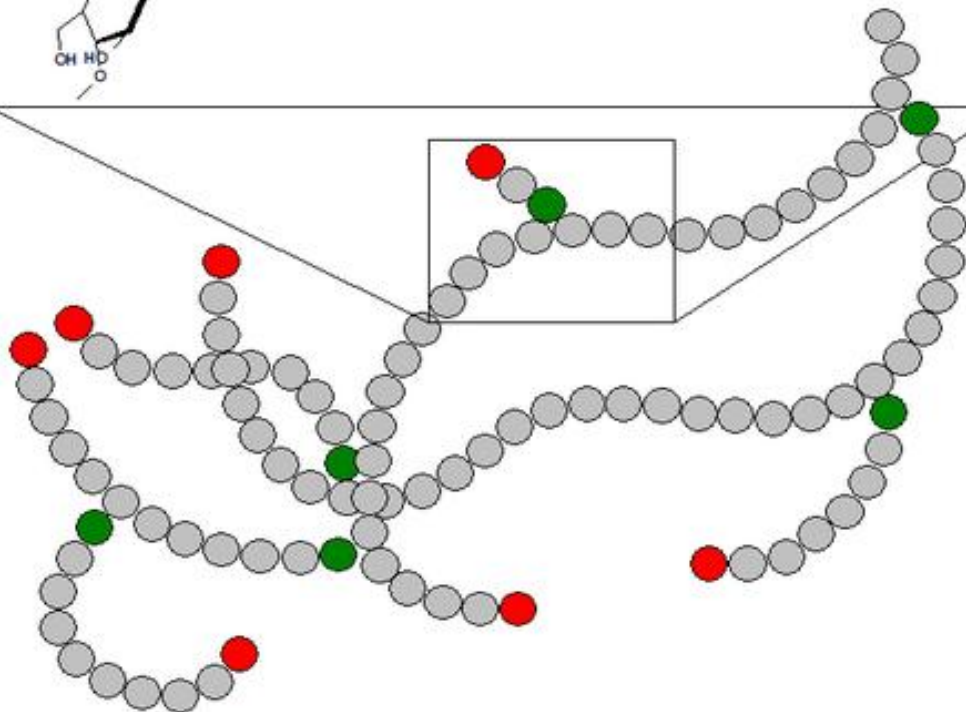
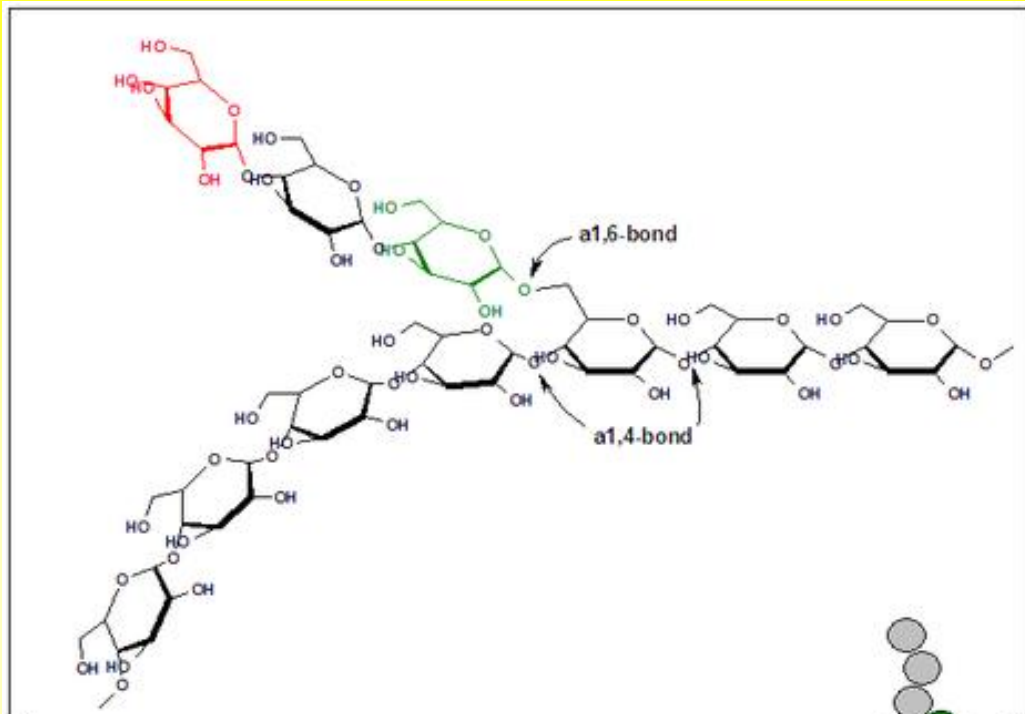
Quitina

Su estructura es ramificada y está formada por varias cadenas que contienen de 12 a 18 unidades de  $\alpha$ -glucosas formadas por enlaces glucosídicos 1,4; uno de los extremos de esta cadena se une a la siguiente cadena mediante un enlace  $\alpha$ -1,6-glucosídico, tal y como sucede en la amilopectina.

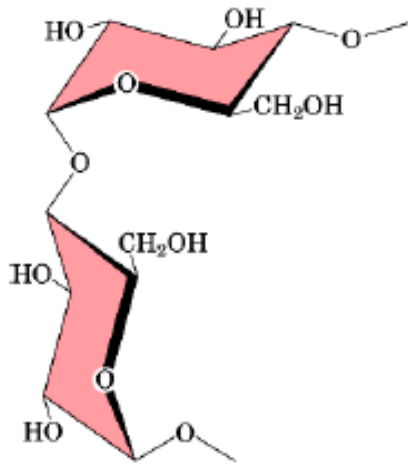
Una sola molécula de glucógeno puede contener más de 120.000 monómeros de glucosa.

La importancia de que el glucógeno sea una molécula tan ramificada es debido a que:

La ramificación permite la abundancia de residuos de glucosa no reductores que van a ser los lugares de unión de las enzimas glucógeno fosforilasa y glucógeno sintasa, es decir, las ramificaciones facilitan tanto la velocidad de síntesis como la de degradación del glucógeno

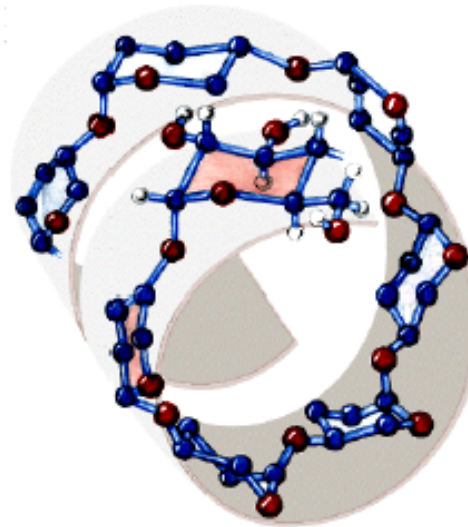


# Glucólisis Anaeróbica o Sistema Glucógeno-Acido Láctico



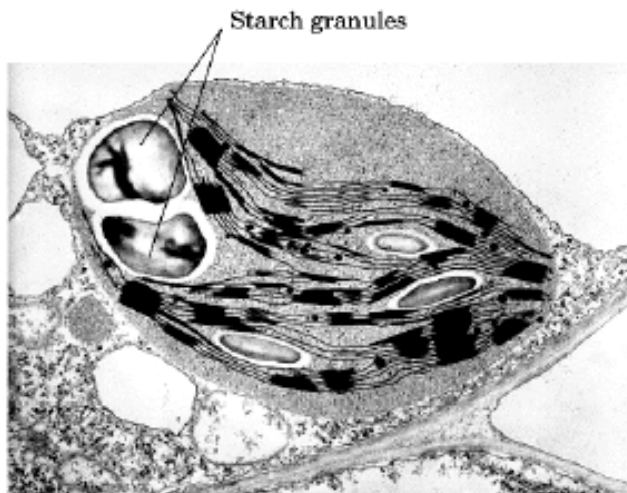
( $\alpha$ 1 $\rightarrow$ 4)-linked D-glucose units

(a)

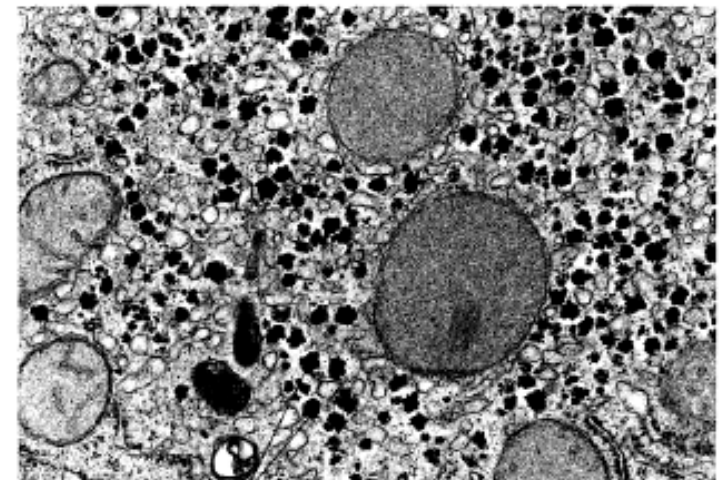


(b)

For adjacent rigid chair structures, the most stable conformation of the sugars is one in which the polysaccharide chain is curved rather than linear. This causes amylose and amylopectin, and glycogen to form helical structures. It is these compact structures that produce the dense granules of stored starch or glycogen that can be seen in many cells.



(a)



Glycogen granules

(b)

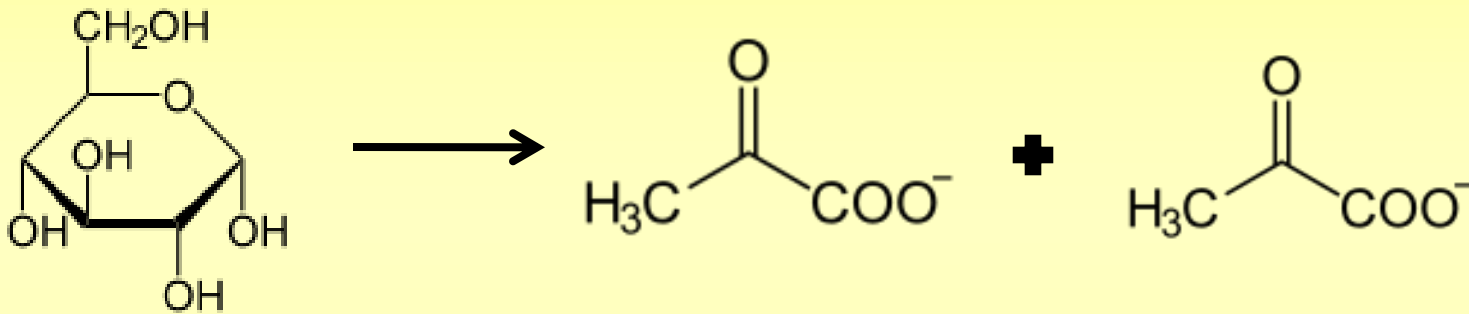


# ESPIRAL LOGARITMICA

$$dr = m.r.d\varphi$$

$$r = r_i \cdot \exp\left[m(\varphi + \varphi_i + \Delta\varphi)\right]$$

La **glucólisis** es la vía metabólica encargada de oxidar la glucosa con la finalidad de obtener energía para la célula. Consiste en 10 reacciones enzimáticas consecutivas que convierten a la glucosa en dos moléculas de piruvato, el cual es capaz de seguir otras vías metabólicas y así continuar entregando energía al organismo.



- 1- Este Modo de síntesis se desarrolla en el **citósol** de las células musculares. Se inicia si la actividad es muy intensa y requiere más ATP, pero no hay disponible suficiente oxígeno, **Ruta de Embden–Meyerhof**.
- 2- La glucólisis anaeróbica o Sistema Glucógeno – Acido Láctico provee de  $\approx 2,5$  mol de ATP por minuto, que es  $\approx 60\%$  del provisto por ATP-PC ( $\approx 4$  mol de ATP por minuto) permitiendo alcanzar las **600** contracciones musculares o **twitches** en un lapso de **1,3 a 1,6** minutos, suficientes para correr los **400 m** llanos.

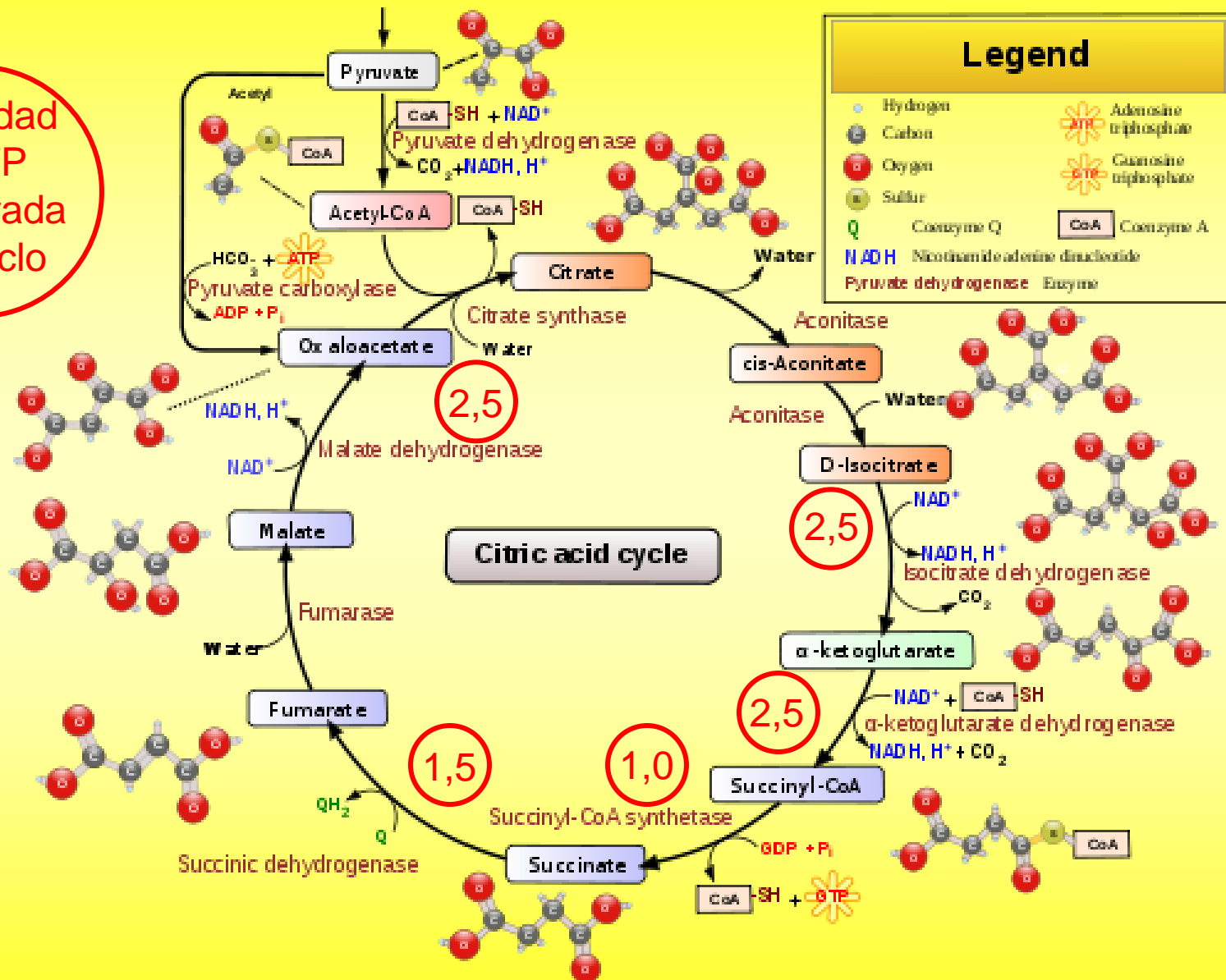
# Metabolismo Aeróbico de Glucógeno-

## Fosforilación oxidativa

- 1- Si la actividad no es muy intensa, pero por ser prolongada se dispone de suficiente oxígeno, las células inician un proceso de metabolismo aeróbico: el **Ciclo de Krebs** y el **Sistema de Transferencia de Electrones**.
- 2- Inspiraciones de  $\approx 50$  mL Oxígeno/kg.minuto permiten liberar **1 mol de ATP/minuto**. Es decir, hay suficiente glucógeno como para producir **10.000 contracciones de los músculos o twitches** para correr una carrera maratón.

# CICLO DE KREBS I

Cantidad de ATP generada por ciclo



# CICLO DE KREBS II

## Steps

**Substrates**

**Products**

**Enzyme**

**Reaction type**

**Comment**

**1**

Oxaloacetate +  
Acetyl CoA +  
H<sub>2</sub>O

Citrate +  
CoA-SH

Citrate synthase

Aldol condensation

rate limiting stage,  
extends the 4C oxaloacetate  
to a 6C molecule

**2**

Citrate

cis-Aconitate +  
H<sub>2</sub>O

Dehydration

**3**

cis-Aconitate +  
H<sub>2</sub>O

Isocitrate

Aconitase

Hydration

reversible isomerisation

# CICLO DE KREBS III

## Steps

Substrates	Products	Enzyme	Reaction type	Comment
4 Isocitrate + <u>NAD<sup>+</sup></u>	<u>Oxalosuccinate</u> + <u>NADH + H<sup>+</sup></u>	<u>Isocitrate dehydrogenase</u>	<u>Oxidation</u>	generates NADH (equivalent of 2.5 ATP)
5 Oxalosuccinate	<u>α-Ketoglutarate</u> + CO <sub>2</sub>		<u>Decarboxylation</u>	irreversible stage, generates a 5C molecule
6 α-Ketoglutarate + NAD <sup>+</sup> + CoA-SH	<u>Succinyl-CoA</u> + NADH + H <sup>+</sup> + CO <sub>2</sub>	<u>α-Ketoglutarate dehydrogenase</u>	Oxidative decarboxylation	generates NADH (equivalent of 2.5 ATP), regenerates the 4C chain (CoA excluded)

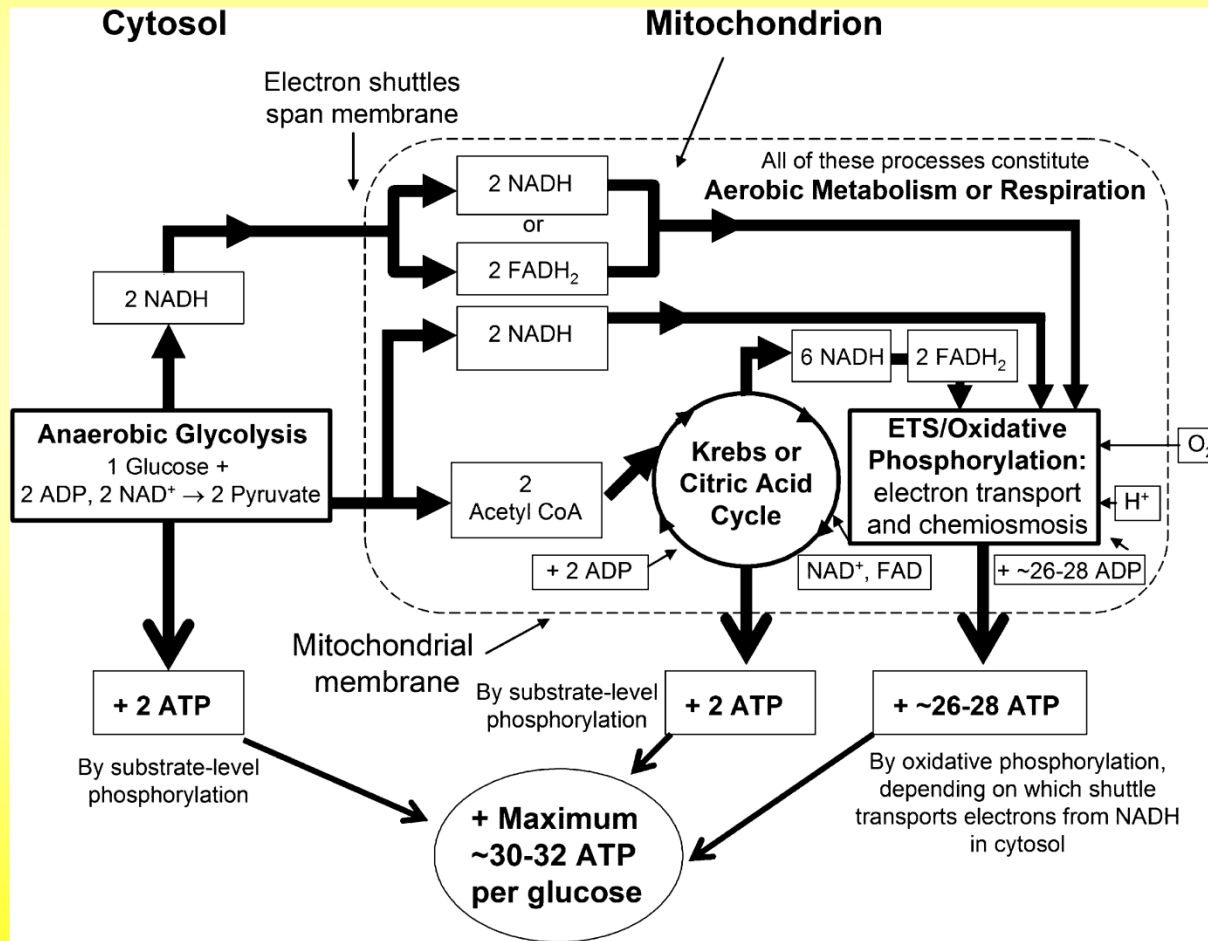
# CICLO DE KREBS IV

## Steps

Substrates	Products	Enzyme	Reaction type	Comment
<b>7</b> Succinyl-CoA + <u>GDP</u> + <u>P<sub>i</sub></u>	<u>Succinate</u> + CoA-SH + <u>GTP</u>	<u>Succinyl-CoA synthetase</u>	<u>substrate level phosphorylation</u>	or <u>ADP</u> -> <u>ATP</u> , <sup>[3]</sup> generates 1 ATP or equivalent
<b>8</b> Succinate + <u>ubiquinone</u> (Q)	<u>Fumarate</u> + ubiquinol (QH <sub>2</sub> )	<u>Succinate dehydrogenase</u>	Oxidation	uses <u>FAD</u> as a <u>prosthetic group</u> (FAD->FADH <sub>2</sub> in the first step of the reaction) in the enzyme, <sup>[3]</sup> generates the equivalent of 1.5 ATP
<b>9</b> Fumarate + H <sub>2</sub> O	<u>L-Malate</u>	<u>Fumarase</u>	H <sub>2</sub> O addition ( <i>hydration</i> )	
<b>10</b> L-Malate + NAD <sup>+</sup>	Oxaloacetate + NADH + H <sup>+</sup>	<u>Malate dehydrogenase</u>	Oxidation	generates NADH (equivalent of 2.5 ATP)



# Metabolismo anaeróbico y aeróbico del Glucógeno.



# ENERGIA ESTIMADA DISPONIBLE EN NUESTRO CUERPO

Table 6.9. Estimated energy available from the body (per kg and also, in parentheses, total), for a 70 kg man with 30 kg of muscle, assuming 10 kcal/mol ATP. (Using data from [306]) (1998)

system	muscular amounts (in mmol/kg muscle <sup>a</sup> ) (total)	useful energy (in kcal/kg muscle) (total)
phosphagen (ATP-PC) system		
ATP	4-6 (120-180) <span style="color: red;">x 30</span>	0.04-0.06 (1.2-1.8) <span style="color: red;">x 30</span>
PC	15-17 (450-510)	0.15-0.17 (4.5-5.1)
Total: ATP + PC	19-23 (570-690)	0.19-0.23 (5.7-6.9)
anaerobic glycolysis		
ATP formation	33-38 (1,000-1,200)	0.33-0.38 (10.0-12.0)
aerobic metabolism		
from stored glycogen	13-15 g (400-450)	
ATP formation	2,800-3,200 (87,000-98,000)	28-32 (870-980)

<sup>a</sup>Unless otherwise noted.

Si bien los datos corresponden a varones, pueden utilizarse para mujeres, ya que son proporcionales a la masa muscular total.

# PROCESOS DE PRODUCCION DE POTENCIA Y ENERGIA DISPONIBLE

Producción de ATP en humanos:  $\approx 40$  kg de ATP por día.

Table 6.8. Estimated power and energy available from the body, for a 70 kg man with 30 kg of muscle, assuming 10 kcal/mol of ATP. (Using data from [306])

system	maximum power (moles of ATP/min)	maximum capacity (total moles of ATP)
phosphagen (ATP-PC) system	3.6	0.7
anaerobic glycolysis	1.6–2.5	1.2
aerobic metabolism from glycogen	1.0	90.0

Hidrólisis de ATP (Anaeróbica)

ADP – PCr (Anaeróbica). (PCr  $\equiv$  Fosfocreatina)

**Sistema Fosfágeno**

Glucólisis Anaeróbica o Sistema Glucógeno-Acido Láctico

Metabolismo Aeróbico de Glucógeno

# ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE Y ENERGIA EN NUESTRO CUERPO

Table 6.10. Body stores of fuel and energy, for a 65 kg (143 lb) person with 12% body fat. (Using data from [340])

	amount (g)	energy (kcal)	
carbohydrates			
liver glycogen	110	451	
muscle glycogen	500	2,050	
glucose in body fluids (sangre)	15	62	
carbohydrates total	625	2,563	<b>4,1 kcal/g</b>
fat			
subcutaneous and visceral	7,800	73,320	
intramuscular	161	1,513	
fat total	7,961	74,833	<b>9,4 kcal/g</b>

Table 6.11. Energy systems used in sports. (Using data from [314])

mostly phosphagen system

100-m dash  
jumping  
weight lifting  
diving  
football dashes

phosphagen and glycogen-lactic acid systems

200-m dash  
basketball  
baseball home run (running around the bases)  
ice hockey dashes

mainly glycogen-lactic acid system

400-m dash  
100-m swim  
tennis  
soccer

glycogen-lactic acid and aerobic systems

800-m dash  
200-m and 400-m swim  
1,500-m skating  
boxing  
2,000-m rowing  
1,500-m/1-mile run

aerobic systems

10,000-m skating  
cross-country skiing  
marathon run (26.2 miles, 42.2 km)  
jogging

# MODOS ENERGETICOS UTILIZADOS EN ALGUNOS DEPORTES

# PARTICION DE LOS MODOS DE USO DE LA ENERGIA

Table 6.12. Percent emphasis of energy systems. (Using data from [306, 307])

sport or activity	ATP-PC and anaerobic glycolysis	anaerobic glycolysis and aerobic	aerobic
aerobic dance	5	15-20	75-80
baseball	80	15	5
basketball	60	20	20
diving	98	2	negligible
fencing	90	10	negligible
field hockey	50	20	30
football	90	10	negligible
golf	95	5	negligible
gymnastics	80	15	5
ice hockey			
forward, defense	60	20	20
goalie	90	5	5
lacrosse			
goalie, defense, attacker	50	20	30
midfielders, man-down	60	20	20
rowing	20	30	50
soccer			
goalie, wings, strikers	60	30	10
halfbacks or sweeper	60	20	20
stepping machine	5	25	70
tennis	70	20	10
field events,	95-98	2-5	negligible
in track and field			
volleyball	80	5	15
walking	negligible	5	95
wrestling	90	5	5

# PARTICION DE LOS MODOS ENERGETICOS POR ACTIVIDAD I

Table 6.13. Percent emphasis of energy systems for a range of distances in ice speed skating. (Using data from [306, 307])

activity	ATP-PC and anaerobic glycolysis	anaerobic glycolysis and aerobic	aerobic
ice speed skating			
500 m	80	10	10
1,000 m	35	55	10
1,500 m	20-30	30	40-50
5,000 m	10	25	65
10,000 m	5	15	80
in-line skating			
>10 km	5	25	70

# PARTICION DE LOS MODOS ENERGETICOS POR ACTIVIDAD II

**Table 6.14.** Percent emphasis of energy systems for a range of distances in swimming. (Using data from [306, 307])

swimming	ATP-PC and anaerobic glycolysis	anaerobic glycolysis and aerobic	aerobic
50 m	90	5	5
100 m	80	15	5
200 m	30	65	5
400 m	20	40	40
1,500 m	10	20	70



# PARTICION DE LOS MODOS ENERGETICOS POR ACTIVIDAD III

**Table 6.15.** Percent emphasis of energy systems for a range of distances in running.  
(Using data from [306, 307])

running	ATP-PC and anaerobic glycolysis	anaerobic glycolysis and aerobic	aerobic
100, 200 m	95-98	2-5	negligible
400 m	80	15	5
800 m	30	65	5
1,500 m (or mile)	20-30	20-30	40-60
3,000 m (or 2 miles)	10	20	70
5,000 m (or 3 miles)	10	20	70
10,000 m (or 6 miles)	5	15	80
marathon	negligible	5	95

# TIEMPOS DE RECUPERACION DESPUES DE INTENSA ACTIVIDAD

Table 6.16. Recovery times after exhaustive exercise. (Using data from [306])

	minimum	maximum
restoration of phosphagen (ATP + PC)	2 min	5 min
muscle glycogen replenishment	5–10 h	24–46 h
liver glycogen replenishment	unknown	12–24 h
restoration of O <sub>2</sub> in plasma and myoglobin	10–15 s	1 min
duration of fast component of O <sub>2</sub> recovery	3 min	6 min
duration of slow component of O <sub>2</sub> recovery	30 min	1 h
reduction of lactic acid in blood and muscle	30–60 min <sup>a</sup>	1–2 h <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Faster recovery with exercise and slower recovery with rest.

# EXPERIMENTOS CALORIMETRICOS V

$$RER = \frac{LCO_2}{LO_2} = \frac{\frac{dV_{CO_2}}{dt}}{\frac{dV_{O_2}}{dt}}$$



$$RER = \begin{cases} \approx 1,00 & \text{Carbo-} \\ & \text{hidrato} \\ \approx 0,71 & \text{s} \\ & \text{Grasas} \end{cases}$$

Fig. 6.7. Gas collection for indirectly measuring metabolic rates. (From [340]. Used with permission)

# CAPACIDAD AEROBICA (O<sub>2</sub>)

<b>Edad o Actividad</b>	<b>Varones</b>	<b>Mujeres</b>
18 a 22 años	44-50 mL/kg.min	38-42
Atletas entrenados	60	50
Atletas de elite o corredores de larga distancia	70-80	55-65
Adulto sin preparación especial	≈ 20	< 20

# CAPACIDAD AEROBICA (O<sub>2</sub>)

La **Capacidad Aeróbica** decrece con la edad a razón de  $\approx 10\%$  por década, comenzando las mujeres a los 15 años o al promediar la adolescencia y los varones a los 25 años.

La **Capacidad Aeróbica** de un hombre normalmente activo decrece, por ejemplo:

25 años	47,7 mL/kg.minuto
35	43,1
45	39,5
52	38,4
63	34,5
75	25,5

La **Capacidad Aeróbica** de una mujer normalmente activa decrece del mismo modo, comenzando a los 15 años con 30-35 mL/kg.minuto.

**Table 6.5.** Components and energy (kcal) of edible parts of common foods. (Using data from [311]) **(2002)**

food, serving size	mass (g)	energy (kcal)	carb. <sup>a</sup> (g)	protein (g)	fat (g)	water (%)
grains and cakes						
bread, white, 1 slice	25	67	12	2	1	37
oatmeal, regular, 1 cup prepared	234	145	25	6	2	85
yellow cake, chocolate frosting, 1 piece	64	243	35	2	11	22
cheesecake, 1/6 of 17 oz cake	80	257	20	4	18	46
dairy						
milk, whole, 1 cup <b>0,61 kcal/g</b>	244	150	11	8	8	88
butter, salted, 1/4 lb stick	113	813	Tr <sup>b</sup>	1	32	16
cheddar cheese, 1 oz	28	114	Tr	7	9	37
cottage cheese, 4%, 1 cup	225	233	6	28	10	79
ice cream, chocolate, 1/2 cup	66	143	19	3	7	56
eggs, raw, 1 large	50	75	1	6	5	75
meat and fish						
chicken, meat only, roasted 1/2 breast	86	142	0	27	3	65
beef, ground, 79% lean, broiled, 3 oz	85	231	0	21	16	56
salmon, broiled, 3 oz	85	184	0	23	9	62
fruits, vegetables, nuts, and oils						
apple, raw, unpeeled, 1 whole	138	81	21	Tr	Tr	84
apricots, raw, without pits, 1 whole	35	17	4	Tr	Tr	86
apricots, dried, sulfured, 10 halves	35	83	22	1	Tr	31
orange, peeled, 1 whole	131	62	15	1	Tr	87
carrots, raw, 7½ in long	72	31	7	1	Tr	88
potato, baked, with skin	202	220	51	5	Tr	71
French fries, medium portion	134	458	53	6	25	35
peanuts, dry roasted, 1 cup	146	854	31	35	73	2
walnuts, 1 cup chopped	120	785	16	18	78	4
canola oil, 1 cup	218	1,927	0	0	218	0
beverages						
cola, 12 fl oz	370	152	38	0	0	89
beer (regular), 12 fl oz	355	146	13	1	0	92
gin, vodka, whiskey, 86 proof, 1.5 fl oz	42	105	Tr	0	0	64
wine, red, 3.5 fl oz	103	74	2	Tr	0	89

<sup>a</sup>Carbohydrate.

<sup>b</sup>Trace.

Oatmeal: Harina de avena. Apricots: Damascos. Walnuts: Nueces

# COMPONENTES Y ENERGIA DE ALIMENTOS HABITUALES

# CONTENIDO ENERGETICO DE ALGUNAS LECHES

Table 6.6. Food content of milk. (Using data from [298]) (1989)

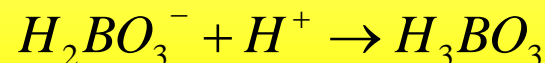
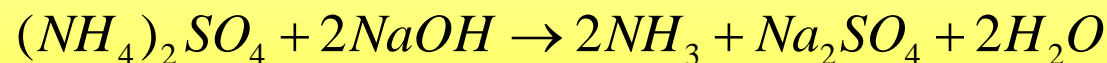
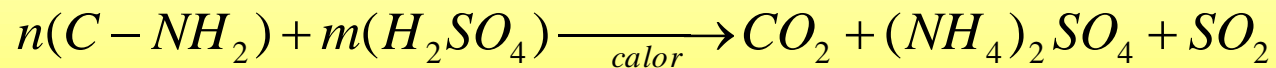
species	enthalpy of combustion (kcal/g)	distribution of enthalpy (%)			dry matter (%)
		fat	protein	carbohydrate	
human	0.69	54	7	39	12.4
cow	0.71	48	26	26	12.4
goat (cabra)	0.69	50	22	27	12.0
horse (mare = yegua)	0.51	23	22	54	10.5
seal (northern fur) (foca)	5.09	88	11	0.1	61.0

Entalpía de combustión de los alimentos o contenido calórico es el máximo de energía térmica que puede obtenerse de él a presión constante.

# DETERMINACION DE PROTEINAS POR EL METODO DE KJELDAHL

En 1883 el investigador danés **Johann Kjeldahl** desarrolló el método más usado en la actualidad para el análisis de proteínas (método **Kjeldahl**) mediante la determinación del nitrógeno orgánico. En esta técnica se digieren las proteínas y otros componentes orgánicos de los alimentos en una mezcla con ácido sulfúrico en presencia de catalizadores. El nitrógeno orgánico total se convierte mediante esta digestión en sulfato de amonio. La mezcla digerida se neutraliza con una base y se destila posteriormente. El destilado se recoge en una solución de ácido bórico. Los aniones del borato así formado se titulan con **HCl (o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)** estandarizado para determinar el nitrógeno contenido en la muestra.

El resultado del análisis es una buena aproximación del contenido de proteína cruda del alimento ya que el nitrógeno también proviene de componentes no proteicos.





# EXPERIMENTOS CALORIMETRICOS I

Con una dieta de 42% de grasas y 18% de proteínas, alrededor del 89,3% de la comida ingerida es metabolizable; el resto es eliminado por las heces (5,8%), la orina (4,5%) y gases (metano) (0,49%). La suma de los porcentajes parciales da 100%.

La tasa de energía metabolizable  $d(\text{ME})/dt$  es igual a la diferencia entre la tasa de energía ingerida en la dieta y la tasa de energía perdida en las heces, la orina y los gases.

El tiempo promedio de retención de los alimentos en el tracto digestivo es de 46 horas; la aparición de los primeros residuos en las heces ocurre a las 15,3 horas –un tercio del tiempo promedio de retención o del tránsito–, mientras que los últimos ocurren a las 61,2 horas.

# EXPERIMENTOS CALORIMETRICOS II

La energía de los alimentos puede ser retenida por nuestro cuerpo como entalpía de nuestros tejidos,  $R$ . En el caso de las mujeres que están amamantando en lugar de retener el total posible  $R$ , secretan una parte como leche. La tasa de variación de  $R$  es:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d(ME)}{dt} + \frac{dQ_{Metabólico}}{dt}$$
$$\frac{dR}{dt} = \frac{d(ME)}{dt} + \frac{dQ_{lose}}{dt} - \frac{dW}{dt} - \frac{dU}{dt}$$

Cuando no se come,  $d(ME)/dt = 0$ , por lo que  $dR/dt < 0$  y su valor corresponde al calor del catabolismo de los músculos del cuerpo.

Cuanta más comida se ingiere,  $dR/dt$  se incrementa y menos energía de la ya almacenada es utilizada, por lo que se incrementa la producción de calor. Este aumento de la producción de calor se denomina **dinámica específica de los alimentos** o bien **efecto termogenerador de los alimentos**.

# EXPERIMENTOS CALORIMETRICOS III

Table 6.7. Calorimetric experiments each averaged over several runs (in kcal/day).  
(Using data from [298], from [295])

	(1989)	(1903)	
energy	eating, without exercise	eating, with exercise (bicycle)	fasting (ayunando) $dR/dt \rightarrow 0$
intake energy	2,659	4,340	0
feces energy	107	176	0
urine energy	134	138	105
change in body protein	-16	-57	-463
change in body fat	176	-484	-1,892
heat produced	2,270	4,554	2,187
discrepancy	12	-13	-63
	Suma 1 2671	Suma 2 4327	Suma 3 -63

$$\text{Suma 1} = 107 + 134 - 16 + 176 + 2270 = 2671$$

$$\text{Suma 2} = 176 + 138 - 57 - 484 + 4554 = 4327$$

$$\text{Suma 3} = 0 + 105 - 463 - 1892 + 2187 = -63$$

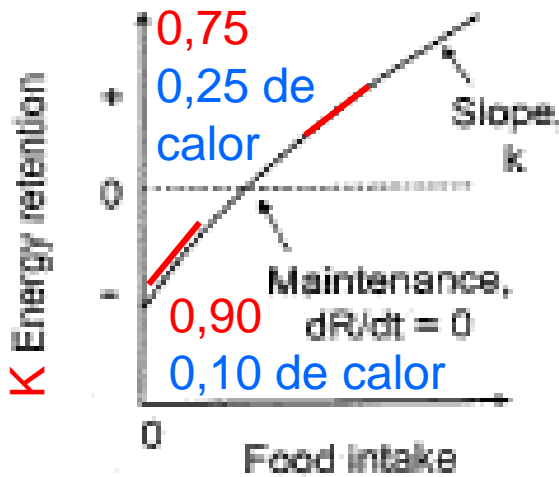
# ALMACENAMIENTO DE ENERGIA Y PRODUCCION DE CALOR

Una fracción de la energía metabolizable ME es retenida (R) por nuestro cuerpo, K, y una fracción se pierde en forma de calor, 1 – K. La pendiente  $k$  de la curva de retención R se denomina **Eficiencia de Utilización de la Energía Metabolizable**:

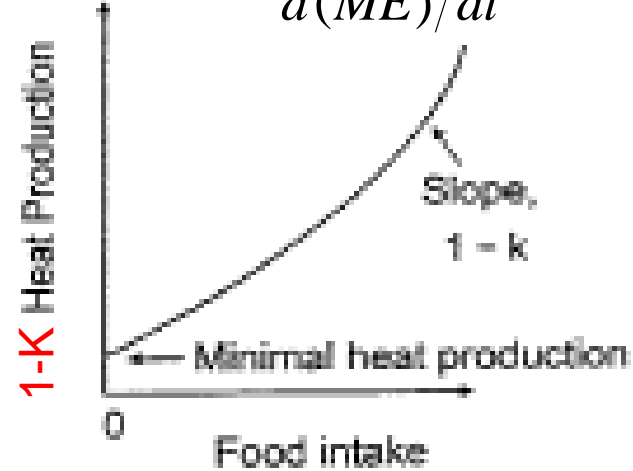
$$k = \frac{dR/dt}{d(ME)/dt}$$

Generación de energía almacenada

Consumo de energía almacenada



(a)



(b)

Fig. 6.2. Energy retention and heat production in the body vs. food intake. (Based on [298]) (1989)

Debajo (-) ← Retención de Energía = 0 → Encima (+)

Carbohidratos	0,94	0,78
Grasas	0,98	0,85
Proteínas	0,77	0,64
Promedio	0,90	0,75

# METABOLISMO BASAL

La Tasa de Metabolismo Basal (BMR) para una persona de 70 kg inactiva aunque consciente es del orden de 1680 kcal/día  $\approx$  70 kcal/hora  $\approx$  81 W.

**Table 6.17.** Metabolism of a resting person. (Using data from [300])

system	percentage of BMR	met. rate (kcal/min)	organ mass (kg) for a 65 kg man
liver and spleen	27	0.33	—
brain	19 ←	0.23	1.40 ←
skeletal muscle	→ 18	0.22	→ 28.0
kidney	10 ←	0.13	0.30 ←
heart	7 ←	0.08	0.32 ←
remainder	19	0.23	—
	36 %	sum = 1.22	2,02 kg $\approx$ 3 %

La Tasa de Metabolismo Basal (BMR) se determina según condiciones previas, como 1- Ayuno de 12 horas, 2- Haber tenido un sueño reparador, 3- Mantenerse por 30 minutos sentado y reclinado, 4- No sufrir excitaciones psíquicas o físicas, 5- Estar en una sala a 20-27°C. Las determinaciones varían dentro de 6 a 10%<sup>53</sup>

# EXPERIMENTOS CALORIMETRICOS IV

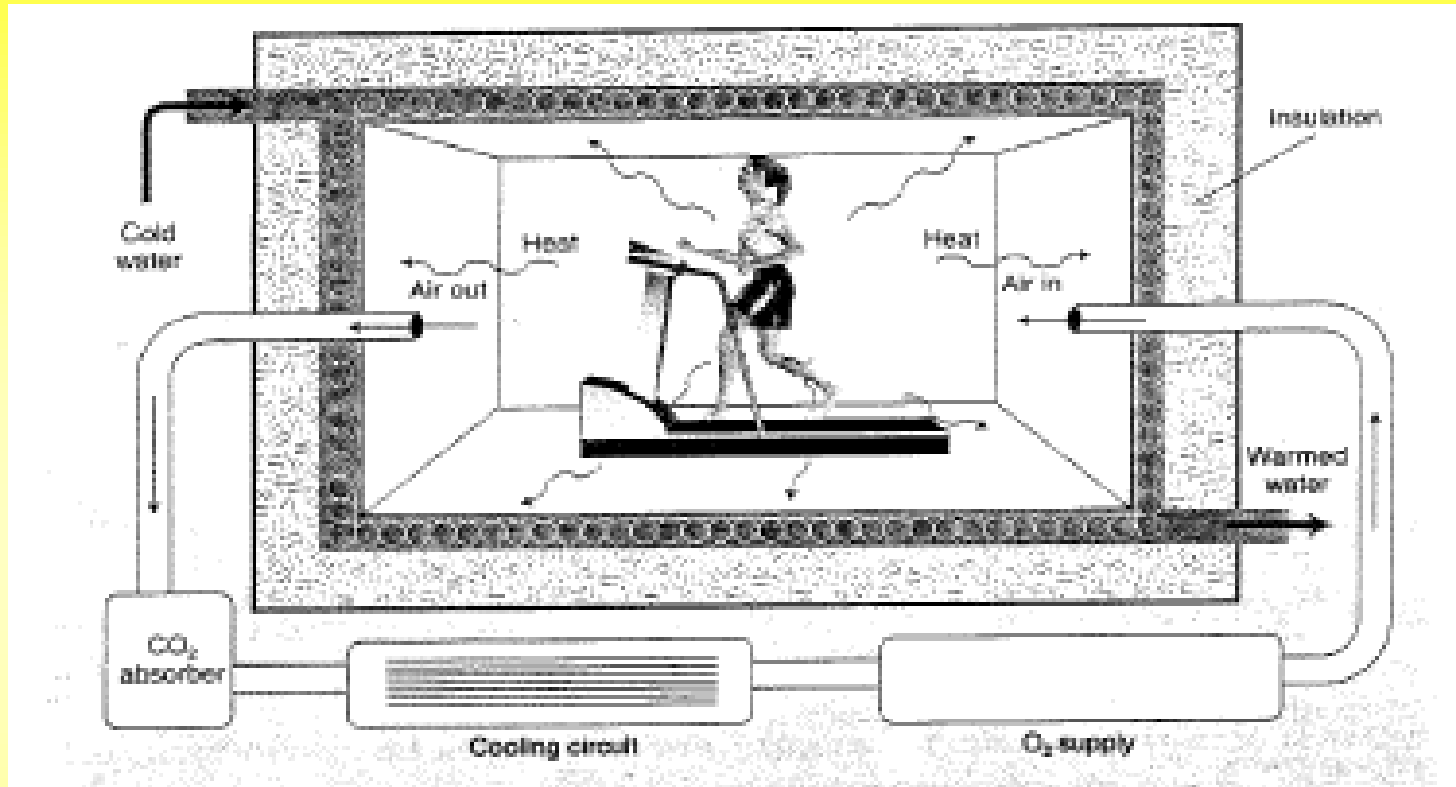


Fig. 6.6. In a calorimetric chamber for direct calorimetry, heat generated by the person is transferred to the air and chamber walls, and the heat produced – and therefore the metabolic rate – are determined by the measured temperature change in the air and the water flowing through the chamber. (From [340]. Used with permission)

En este procedimiento tipo “bomba calorimétrica” se supone que el 60% de la energía del ejercicio realizado por la persona se convierte en calor medible.

# EXPERIMENTOS CALORIMETRICOS V

$$RER = \frac{LCO_2}{LO_2} = \frac{\frac{dV_{CO_2}}{dt}}{\frac{dV_{O_2}}{dt}}$$



$$RER = \begin{cases} \approx 1,00 & \text{Carbo-} \\ \approx 0,71 & \text{hidrato} \\ & \text{s} \\ & \text{Grasas} \end{cases}$$

Fig. 6.7. Gas collection for indirectly measuring metabolic rates. (From [340]. Used with permission)

Una fracción de la energía metabolizable ME es retenida (R) por nuestro cuerpo, K, y una fracción se pierde en forma de calor,  $1 - K$ . La pendiente  $k$  de la curva de retención R se denomina **Eficiencia de Utilización de la Energía Metabolizable:**

$$k = \frac{dR/dt}{d(ME)/dt}$$

# METABOLISMO BASAL DEL CEREBRO I

¿Quemamos más calorías cuando nos esforzamos para pensar? Sí, pero la diferencia es mínima. La idea –muy difundida– de que el cerebro consume el **20%** de la energía corporal y su peso representa solo el **2%** de todo el cuerpo hace pensar que se trata de un órgano que consume mucha energía. Pero esto es válido sólo en el caso de que el cuerpo esté quieto. El ejercicio físico exige un gasto mucho mayor de calorías para activar los músculos, mientras que el pensamiento requiere sólo unas cuantas, incluso aunque nos haga sentir hambrientos.



# METABOLISMO BASAL DEL CEREBRO II

Un grupo de estudiantes trabajó intensamente en computadoras mientras otro descansaba. La energía que ambos usaron fue casi la misma. Sin embargo, al terminar su tarea, aquellos que hicieron trabajo mental ingirieron cerca de **200** calorías más.

Esto se debe a que el cerebro –como no almacena reservas– toma su energía directamente de la glucosa de la sangre por ello la concentración mental hace bajar los niveles de glucosa en sangre. Otra razón es que el cerebro nunca deja de controlar la respiración, la digestión y otras funciones corporales.

# METABOLISMO BASAL DEL CEREBRO III

Durante la noche el cerebro está ocupado soñando y durante el día procesando la información que le envían los sentidos. Todo esto consume menos de una caloría por minuto.

Por eso, aunque cuando hacemos esfuerzo para pensar se duplican las calorías que gastamos, esto representa un aumento muy pequeño si lo comparamos con cualquier actividad física.

# BMR EN LOS MAMIFEROS

Table 6.18. BMR determined for several mammals. (See, for example [324])

species terrestres	mass	BMR (kcal/day)
mouse	20 g	3
reference woman (25 years)	55 kg	1,260
reference man (25 years)	65 kg	1,500
elephant	5,000 kg	70,000

**Ley de Kleiber:**  $BMR = c m_b^{3/4}$ , siendo  $c \approx 90 \text{ kcal/kg}^{3/4}$ , partiendo de la suposición de que el BMR escala según la potencia máxima entregada por los músculos esqueléticos.

# LEY DE KLEIBER

$$\text{BMR} = c m_b^{3/4}, \text{ con } c \approx 90 \text{ kcal/kg}^{3/4} \quad |$$

•El BMR se supone que escala según la potencia máxima  $P_{\text{Máx.}}$  entregada por los músculos. La potencia  $P$  es proporcional a la fuerza muscular  $F = \sigma \cdot (\text{PCA})$  y a la velocidad  $v$  de contracción muscular.

Luego:  $\text{BMR} \propto P_{\text{Máx}} \propto F \cdot v \propto \sigma \cdot (\text{PCA}) \cdot v$ .

•Estudios sobre músculos de todas las especies muestran que  $\sigma$  y  $v$  no varían demasiado, por lo que  $\text{BMR} \propto \text{PCA}$ .

•A su vez, los miembros de los mamíferos que tienen músculos característicos para el movimiento son anchos ( $d$ ) y largos ( $L$ ), lo que permite asegurar que:

$$\text{PCA} \propto d^2 \quad \text{y que:} \quad m_b \propto d^2 \cdot L,$$

con lo que para encontrar una relación entre el BMR y  $m_b$ , debe encontrarse la relación entre  $L$  y  $d$ .

# LEY DE KLEIBER

$$\text{BMR} = c m_b^{3/4}, \text{ con } c \approx 90 \text{ kcal/kg}^{3/4} \quad \text{II}$$

•Se asegura que dicha relación es:  $L \propto d^{2/3}$ , considerando los siguientes argumentos:

- 1) La relación  $L \propto d^{2/3}$  vale para los primates.
- 2) La relación  $L \propto d^{2/3}$  vale para las plantas, siendo  $L$  su altura y  $d$  el diámetro de su tronco.
- 3) La misma regla vale para una columna de altura  $L$  y ancho típico  $d$  que por su propio peso entrará en pandeo con el enrollamiento de Euler en cuanto se la aparte de la vertical.
- 4) Para tratar de justificar la validez de  $L \propto d^{2/3}$  también se usa el caso de la viga de largo  $L$  y ancho  $d$  empotrada en un extremo y en cuyo extremo libre se le aplica una fuerza  $F$  que la defleca en  $y(L) = -F.L^3/3.Y.I_A$ . Suponiendo una viga cilíndrica de diámetro  $d$ , resulta  $I_A = \pi.d^4/64$ , y se puede expresar el ángulo de deflexión.

# LEY DE KLEIBER

$$\text{BMR} = c m_b^{3/4}, \text{ con } c \approx 90 \text{ kcal/kg}^{3/4} \quad \text{III}$$

- El ángulo de deflexión es  $\theta = |y(L)|/L = 64.F.L^2/3.\pi.Y.d^4$ .
- Esta expresión la utilizamos para los huesos largos, por lo que siguiendo un argumento de autosimilaridad –que  $\theta$  sea igual para todas las especies– la supondremos una **constante**.
- Si  $F$  es sólo gravitatoria:  $F = m_b.g = \rho.V.g$ , con  $V = \pi.d^2.L/4$ , con lo que:

$$\theta = [\rho.g.(\pi.d^2.L/4)]L^2/3.Y.(\pi.d^4/64) = (16/3).(\rho.g/Y).(L^3/d^2) = \text{cte.}$$

con lo que:  $L \propto d^{2/3}$ .

Luego, siendo  $m_b \propto d^2.L$ , queda:  $m_b \propto d^2.(d^{2/3}) = d^{8/3}$ , o  $d \propto m_b^{3/8}$ ,  
y como:

$\text{BMR} \propto \text{PCA} \propto d^2 = (m_b^{3/8})^2 = m_b^{3/4}$ , que es la **Ley de Kleiber**.

# LEY DE KLEIBER

$$\text{BMR} = c m_b^{3/4}, \text{ con } c \approx 90 \text{ kcal/kg}^{3/4} \quad \text{IV}$$

- El último argumento:

$\text{BMR} \propto \text{PCA} \propto d^2 = (m_b^{3/8})^2 = m_b^{3/4}$ , que justificaría la Ley de Kleiber, ha sido criticado porque la potencia necesaria para operar los músculos esqueléticos es del  $\approx 18\%$  del BMR y no del total, a pesar de que la proporcionalidad podría salvarse atendiendo a la constante  $c$ .

# ESCALEO DEL BMR EN HUMANOS I

La **Ecuación de Harris-Benedict**, como extensión de la **Ley de Kleiber**, introduce el género, la altura H (en cm) y la edad Y en años, según:

$$\text{BMR}_{\text{mujeres}} = 655,0955 + 9,563 m_b + 1,8496 H - 4,6756 Y$$

$$\text{BMR}_{\text{hombres}} = 66,4730 + 13,7516 m_b + 5,0033 H - 6,75505 Y$$

Estas ecuaciones pueden también expresarse como:

$$\text{BMR}_{\text{mujeres}} = 65,8 m_b^{3/4} [1 + 0,004 (30 - Y) + 0,010 (S - 43,4)],$$

$$\text{BMR}_{\text{hombres}} = 71,2 m_b^{3/4} [1 + 0,004 (30 - Y) + 0,010 (S - 43,4)],$$

donde Y es la edad en años y  $S = H(\text{en cm})/m_b^{1/3}$ .



# ESCALEO DEL BMR EN HUMANOS II

Existen otras fórmulas que permiten agrupar por grupos etarios según el género, con representación en Tablas como la siguiente:

**Table 6.19.** BMR (kcal/day) for different age groups. (Using data from [298], using [335])

age group (years)	BMR (males)	BMR (females)
Under 3	$59.5m_b - 30$	$58.3m_b - 31$
3-10	$22.7m_b + 504$	$20.3m_b + 486$
10-18	$17.7m_b + 658$	$13.4m_b + 693$
18-30	$15.1m_b + 692$	$14.8m_b + 487$
30-60	$11.5m_b + 873$	$8.1m_b + 846$
Over 60	$11.7m_b + 588$	$9.1m_b + 658$

$m_b$  is the body mass in kg.

**Table 6.22.** Estimated power output (metabolic rates) and power densities of biological cells and tissues (human, unless stated otherwise). (Using data presented in [308])

organelle, cell, or object	power output (picowatts) ←	volume ( $\mu\text{m}^3$ )	power density ( $\text{W}/\text{m}^3$ )
myosin muscle motor crossbridge →	0.000001 = 1aW	$5 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^6$
platelet (resting)	0.003–0.09	3	$0.1\text{--}3.0 \times 10^4$
red blood cell	0.008	94	$8.5 \times 10^1$
<i>E. coli</i> bacterium (basal)	0.05	2	$2.5 \times 10^2$
mitochondrion organelle	0.1–1.1	1	$0.1\text{--}1.1 \times 10^6$
platelet (activated)	0.7–7.0	3	$0.2\text{--}2.3 \times 10^6$
skin cell	1–3	1,000	$1.0\text{--}3.1 \times 10^3$
skeletal muscle (resting)	1–10 ←	2,000 ←	$0.5\text{--}4.9 \times 10^3$ ←
typical tissue cell (basal)	30 ←	8,000 ←	$3.8 \times 10^3$ ←
intestine/stomach cell	46–52	8,000	$5.6\text{--}6.5 \times 10^3$
neuron cell (basal)	70–110 ←	14,000 ←	$5.0\text{--}7.9 \times 10^3$ ←
heart muscle cell (typical)	87–290 ←	8,000 ←	$1.1\text{--}3.6 \times 10^4$
skeletal muscle cell (max., voluntary)	113	2,000	$5.7 \times 10^4$
kidney cell	155–346	8,000	$1.9\text{--}4.3 \times 10^4$
neuron cell (maximum)	255–330 ←	14,000 ←	$1.8\text{--}2.4 \times 10^4$ ←
typical tissue cell (maximum)	480 ←	8,000 ←	$6.0 \times 10^4$ ←
skeletal muscle cell (max., tetanic)	2,300 ←	2,000 ←	$1.2 \times 10^6$ ←
honeybee flight muscle cell	3,400	1,000	$3.4 \times 10^6$
heart muscle cell (maximum)	3,500–5,000 ←	8,000 ←	$4.4\text{--}6.3 \times 10^5$ ←
human brain	15–25 W	$1.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$	$1.1\text{--}1.8 \times 10^4$
human body (basal)	100 W	$0.1 \text{ m}^3$	$1.0 \times 10^3$
human body (maximum)	1,600 W	$0.1 \text{ m}^3$	$1.6 \times 10^4$
gasoline-powered automobile	200,000 W	$10 \text{ m}^3$	$2.0 \times 10^4$
The Sun	$3.92 \times 10^{26} \text{ W}$	$1.41 \times 10^{27} \text{ m}^3$	0.28

# POTENCIA Y DENSIDAD DE POTENCIA DE CELULAS Y TEJIDOS

Note that 1 W = 0.86 kcal/h.

Ver Diapositiva 30

# ESCALEO DEL BMR EN HUMANOS III

Otras fórmulas permiten agrupar los grupos etarios por el género, la altura, y la masa corporal atendiendo al Índice Q según Tablas como la siguiente:

**Table 6.20.** BMR (kcal/day) for adult men and women of different ages, assuming Quételet's index (or BMI)  $Q$  is 22 for men and 21 for women and the relations in Table 6.19. (Using data from [298], from [305])

height (m) (also ft., in)	mass (kg) (also lb)	age (yr)		
		18–30	30–60	over 60
<b>men</b>				
1.5 (4'11")	49.5 (109)	1,440	1,450	1,150
1.6 (5'3")	56.5 (124)	1,540	1,530	1,250
1.7 (5'7")	63.5 (140)	1,650	1,620	1,350
1.8 (5'11")	71.5 (157)	1,770	1,710	1,450
1.9 (6'3")	79.5 (175)	1,900	1,800	1,560
2.0 (6'7")	88.0 (194)	2,030	1,900	1,670
<b>women</b>				
1.4 (4'7")	41.0 (90)	1,100	1,190	1,030
1.5 (4'11")	47.0 (104)	1,190	1,240	1,090
1.6 (5'3")	54.0 (119)	1,290	1,300	1,160
1.7 (5'7")	61.0 (134)	1,390	1,360	1,230
1.8 (5'11")	68.0 (150)	1,500	1,420	1,310

# EFFECTO DEL HAMBRE SOBRE EL CONSUMO DE ENERGIA ALMACENADA EN EL CUERPO

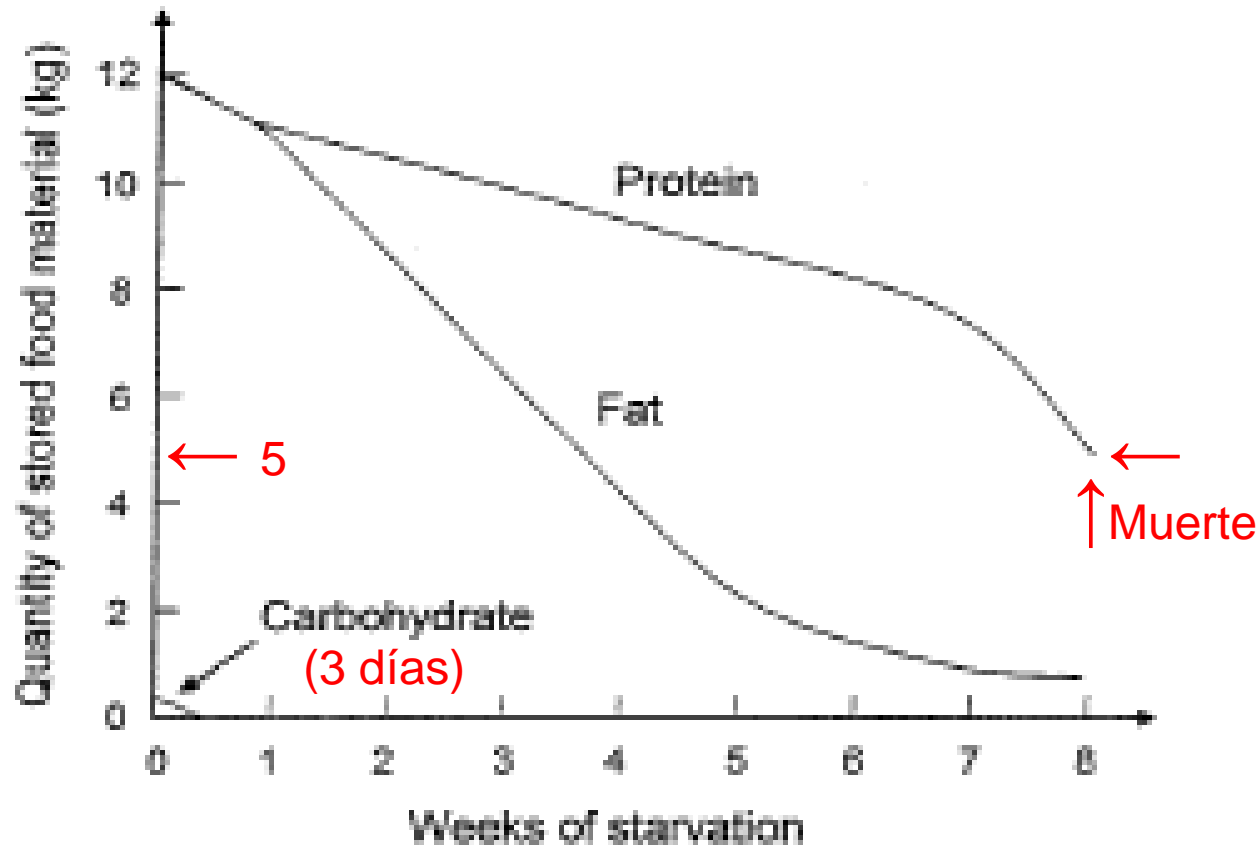


Fig. 6.12. Effect of starvation on energy supplies in the body. (Based on [314])

# TASAS METABOLICAS Y CONSUMO DE

# OXIGENO: $\frac{dV_{O_2}}{dt} = Q_t (p_a - p_v)$

$Q_t$ : Volumen de sangre bombeado por el corazón en función del tiempo.  
 $p_a - p_v$ : Diferencia de presiones parciales del  $O_2$  en arterias y en venas.

Table 6.21. Approximate total metabolic rates (MR) and oxygen consumption for different levels of activity for an average 70 kg person. (From [296] and [300])

activity	MR or equivalent heat production		$O_2$ consumption (L/min)
	(kcal/h)	(W)	
very low level activity			
sleeping	→ 71	83	0.24
sitting at rest	→ 103	120	0.34
standing relaxed	→ 108	125	0.36
light activity			
walking slowly, 5 km/h	→ 228	→ 265	→ 0.76
moderate activity			
cycling, 15 km/h (5 km/h)	→ 344 (114)	400 (133)	1.13 (0,38)
moderate swim	400	465	1.32
heavy activity			
soccer	500	580	1.65
quite heavy activity			
climbing stairs, 116 steps/min	589	685	1.96
cycling, 21 km/h	602	700	2.00
basketball	→ 688	800	2.28
extreme activity			
racing cyclist	1,400	1,600	4.62

$Q_t$  (L/min)

$MR = f \times (BMR)$

$f$ : factor que identifica actividad.

ROSQUILLAS  
 ESTADOUNIDENSES  
 Energía: 280 kcal

# RESULTADO DE DIETAS VARIADAS EN MUJERES DE IGUAL EDAD Y PESO COMPARABLES

Table 6.23. Food intakes and heat production for two 23-year-old women of comparable physical size. (Using data from [298], from the result of Warwick as quoted by [309])

	"large eater"	"small eater"	ratio
body mass (kg)	54.2	52.7	1.03
lean body mass (kg) #	45.1	43.6	1.03
average food intake (kcal/d)	2,370	1,550	1.54
heat production (kcal/d)	2,170	1,390	1.55
heat production at night (kcal/d)	1,720	1,100	1.56

# Descartando la grasa corporal

El BMR varía entre personas del mismo género, peso y condiciones en  $\pm 6 - 10\%$

# CALOR PRODUCIDO AL CAMINAR

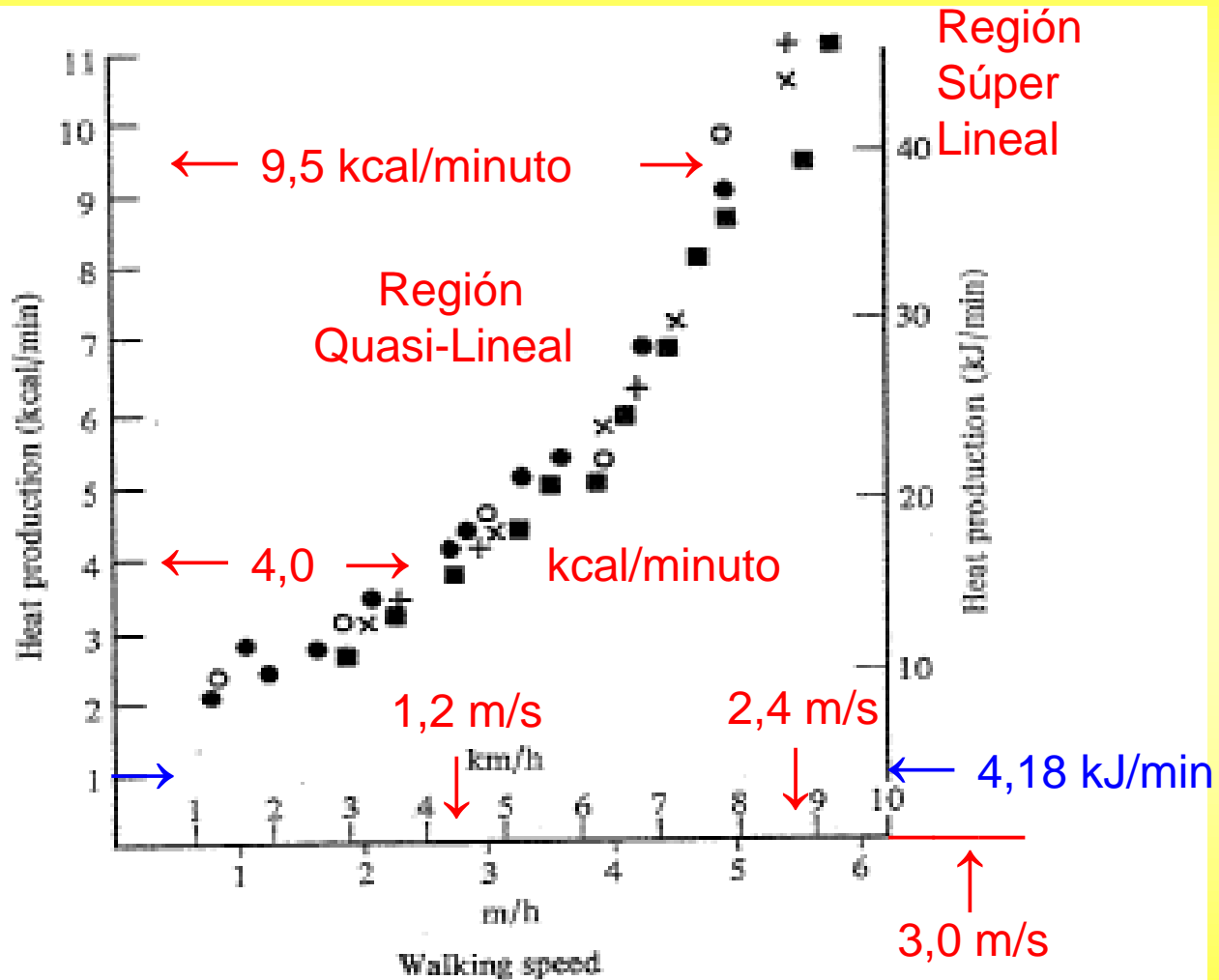
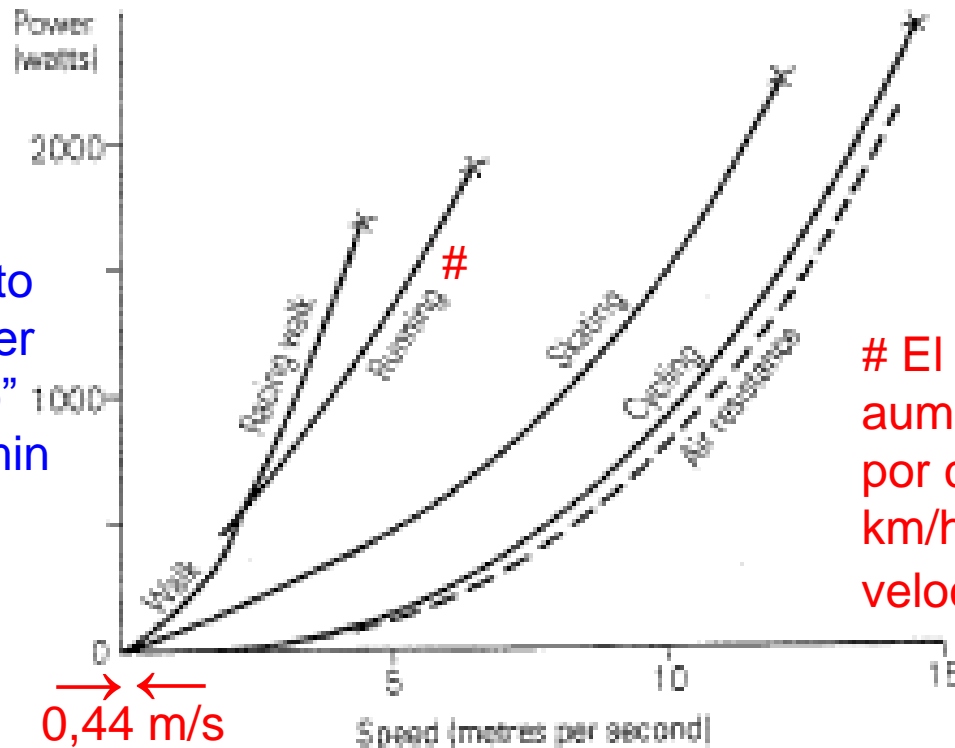


Fig. 6.8. Heat production (metabolic needs) of walking. (From [298], as summarized by [330])

# REQUERIMIENTO METABOLICO vs TIPO Y VELOCIDAD DE LOCOMOCION

El requerimiento de  $O_2$  de un "ser humano medio" es 3,5 mL/kg.min por MET.



# El requerimiento de  $O_2$  aumenta en 5,8 mL/kg.min por cada aumento de 1,6 km/h o 0,44 m/s en la velocidad de carrera.

Fig. 6.9. Metabolic needs vs. speed for several types of locomotion, extrapolated to world record speeds for 5 km races (for running) or 10 km races (for the others). The dashed line shows the power needed to overcome air resistance only. (From [294], based on data from [332]. Used with permission)



# EFEECTO DEL VIENTO AL CAMINAR Y CORRER

Table 6.25. The effect of wind on energy needs of walking and running. (Using data from [298], calculated using [333])

activity, speed (m/s) (or mph)	wind speed $w$ (m/s) (or mph)	oxygen consumption (L/min)	heat production (W)	increase in energy/ $w^2$ (W-s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
walking, 1.25 (2.80)	0.0 (0.0)	0.878	294	
	10.0 (22.4)	1.192	399	$\simeq 1.05$
	14.1 (31.5)	1.505	504	$\simeq 1.05$
walking, 2.08 (4.65)	0.0 (0.0)	1.649	552	
	10.0 (22.4)	2.221	744	$\simeq 1.91$
	14.1 (31.5)	2.792	935	$\simeq 1.91$
running, 3.75 (8.39)	0.0 (0.0)	2.836	950	
	10.0 (22.4)	3.243	1,086	$\simeq 1.36$
	14.1 (31.5)	3.710	1,243	$\simeq 1.36$
running, 4.47 (10.00)	0.0 (0.0)	3.010	1,008	
	10.0 (22.4)	3.710	1,243	$\simeq 2.52$
	14.1 (31.5)	4.525	1,516	$\simeq 2.52$

Note that the last column is the increase in heat production divided by the square of the wind speed for the particular walking or running condition.

# VALORES TIPICOS DEL MET I

Table 6.26. Typical MET values for self care. (Using data from [340])

self-care	MET
rest, sitting, standing, eating, conversation	1.0
dressing, undressing, washing hands and face, propelling wheelchair	2.0
walking 2.5 mph	3.0
showering	3.5
walking downstairs	4.5
walking 3.5 mph	5.5

Así como el MR escala según la actividad con la Tasa de Metabolismo Basal BMR:

$MR = f \times (BMR)$ ,  $f$  es un factor que identifica el tipo de actividad.

Se define el **Equivalente Metabólico** (MET) de cada actividad, de modo que un ser humano promedio “medio” consume:  $(3,5 \text{ mL O}_2/\text{kg} \cdot \text{min}) \times \text{MET}$ .

Habitualmente se considera que  $\text{MET} \approx f / 1,5$ ; pero existen divergencias.

Comparar la asignación de  $f$  según las Naciones Unidas y otras organizaciones.

# VALORES TIPICOS DEL MET II

Table 6.27. Typical MET values for housework. (Using data from [340])

housework	MET
handsewing	1.0
machine sewing, sweeping floor	1.5
polishing furniture	2.0
peeling potatoes, scrubbing, hand washing clothes, kneading dough	2.5
scrubbing floors, cleaning windows, making beds	3.0
ironing, mopping, wringing wash by hand,	
hanging wash by hand	3.5
beating carpets	4.0

# VALORES TIPICOS DEL MET III

Table 6.28. Typical MET values for occupations. (Using data from [340])

occupational	MET
sitting at desk, writing, riding in car, watch repair	1.5
typing	2.0
welding, radio assembly, playing musical instrument	2.5
parts assembly	3.0
bricklaying, plastering	3.5
heavy assembly work, wheeling wheelbarrow (115 lb, 2.5 mph)	4.0
carpentry	5.5
mowing lawn with hand mower, chopping wood	6.5
shoveling	7.0
digging	7.5

Trasladar materiales con carretilla

Carpintería Segar el campo con segadora manual

Palear tierra o arena Hachar leña

Puntear la tierra con la pala

# VALORES TIPICOS DEL MET IV

Table 6.29. Typical MET values for exercise. (Using data from [340])

exercise (level conditions)	MET
walking 2 mph	2.5
cycling 5.5 mph	3.0
walking 2.5 mph, cycling 6 mph	3.5
walking 3 mph; calisthenics	4.5
cycling 9.7 mph; swimming, crawl, 1.0 ft/s	5.0
walking 3.5 mph	5.5
walking 4 mph	6.5
jogging 5 mph	7.5
running 7.5 mph; cycling 13 mph	9.0
swimming, crawl, 2.0 ft/s	10.0
running 8.5 mph	12.0
running 10 mph; swimming, crawl, 2.5 ft/s	15.0
running 12 mph; swimming, crawl, 3.0 ft/s	20.0
running 15 mph; swimming, crawl, 3.5 ft/s	30.0

# VALORES TIPICOS DEL MET V

Table 6.30. Typical MET values for recreation. (Using data from [340])

recreational	MET
painting, sitting	1.5
playing piano, driving car	2.0
canoeing 2.5 mph, horseback riding (walk)	2.5
volleyball (recreational), billiards	3.0
bowling, horseshoes	3.5
golf, cricket	4.0
archery, ballroom dancing, table tennis, baseball	4.5
tennis	6.0
horseback riding (trot), folk dancing	6.5
skiing, horseback riding (gallop)	8.0
squash	8.5
fencing, basketball, football	9.0
gymnastics, handball, paddleball	10.0

# $f$ COMO FACTOR OCUPACIONAL

Considerando las ocupaciones de **un día de trabajo** se indica el  $f_{average}$  para diferentes niveles de esfuerzo físico y los resultados de los estudios son muy controversiales.

<b>Niveles de esfuerzo:</b>	$f_{average})_{UUNN}$	$f_{average})_{Otros}$
Trabajo liviano	$\approx 1,55$	$\approx 1,33$
Trabajo moderado	$\approx 1,78$	$\approx 1,50$
Trabajo pesado	$\approx 2,10$	$\approx 1,70$

1,33 corresponde casi a una persona sedentaria.

# TRABAJOS “INTERNOS” Y “EXTERNOS”

Elevar el centro de masa del cuerpo

Elevar el objeto sobre el nivel del piso

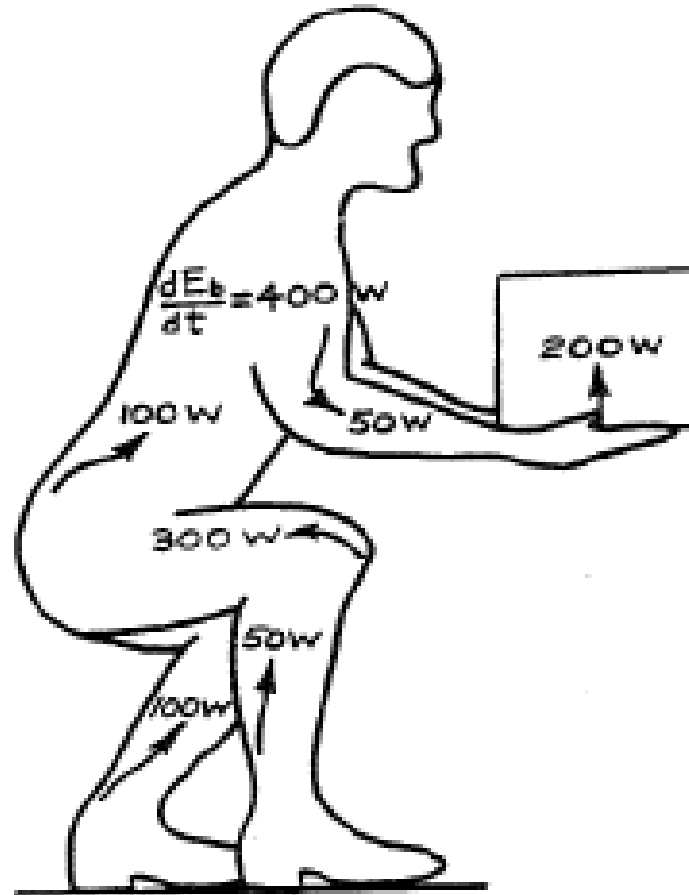


Fig. 6.10. “Internal” vs. “external” work in lifting an object. (From [341]. Reprinted with permission of Wiley)



# POTENCIA MECANICA Y EFICIENCIA DEL TRABAJO MECANICO HUMANO

Table 6.32. Mechanical power and efficiency of mechanical work. (Using data from [296])

task	mechanical power output		metabolic rate (W)	efficiency (%)
	(hp)	(W)		
cycling (typical)	0.15	112 ←	505 ↓	19
trammimg	0.12	90	525	17
shoveling sand	0.024	17.5	570	3

≈  
 $\epsilon$ : Eficiencia metabólica o muscular (22)

$\epsilon$  puede ser: 1- Trabajo mecánico muscular dividido por el trabajo metabólico muscular,

2- Suma de trabajos mecánicos interno y externo dividido el exceso requerido para realizarlo por sobre el BMR, 3- Trabajo mecánico externo dividido por el costo metabólico en exceso por sobre el costo metabólico por trabajo nulo.

La edad incrementa las ineficiencias por: 1- Disminución de la capacidad aeróbica, 2- Incompleta conversión de la energía metabólica en energía mecánica, 3- Fallas neurológicas para controlar la energía mecánica (feedback y control).

$\epsilon_{\text{Maquina de vapor}}$  17

$\epsilon_{\text{Motor a nafta}}$  38

# EFICIENCIA DEL TRABAJO MECANICO HUMANO SEGUN ACTIVIDADES

Table 6.33. Efficiencies of mechanical work. (Using data from [306])

exercise activity or task	efficiency (%)
cycling, level	24–34
cycling, uphill	19
ice skating	11
rowing	10–20
stepping machine	23
swimming, freestyle	2.9–7.4
walking, horizontal	20–35
walking, incline	21–43
Maquina de vapor	17
Motor a nafta	38

# POTENCIA MAXIMA LOGRADA POR PERSONAS DE OFICIO ENTRENADAS

Table 6.35. Approximate maximum mechanical power from well-conditioned humans. (Using data from [296])

power		duration		total energy		
(hp)	(W)			(kJ)	(kcal)	
2	1,500	10,000 $\omega$	6 s	1 $\tau$	9.0	2.2
1	750	5,000 $\omega$	1 min	10 $\tau$	45	10.8
0.35	260	1,733 $\omega$	35 min	350 $\tau$	546	130
0.2	150	1,000 $\omega$	5 h	3000 $\tau$	2,700	648
0.1	75		8 h day of a laborer		2,160	516

El signo “,” es la coma decimal

$$1\omega = 150 \text{ W}$$

$$1\tau = 6 \text{ s}$$

# CARACTERISTICAS TERMICAS DE TEJIDOS Y ORGANOS

Table 6.36. Thermophysical characteristics of body tissues and organs and other materials. (Using data from [308])

organ or tissue	thermal conductivity $K$ (W/m-K)	specific heat $c_v$ (MJ/m <sup>3</sup> -K)	density (approximate) $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
skin - very warm	2.80	3.77	1,000
skin - normal hand	0.960	3.77	1,000
skin - cold	0.335	3.77	1,000
subcutaneous pure fat	0.190	1.96	850
muscle - living	0.642	3.94	1,050
muscle - excised, fresh	0.545	3.64	1,050
bone - average	1.16	2.39	1,500
bone - compact	2.28	2.70	1,790
bone - trabecular	0.582	2.07	1,250
blood - water at 310 K	0.623	4.19	993
blood - plasma (Hct = 0%) at 310 K	0.599	4.05	1,025
blood - whole (Hct = 40%)	0.549	3.82	1,050
heart - excised, near fresh	0.586	3.94	1,060
liver - excised, near fresh	0.565	3.78	1,050
kidney - excised, near fresh	0.544	4.08	1,050
abdomen core	0.544	3.89	1,050
brain - excised, near fresh	0.528	3.86	1,050
brain - living	0.805	-	-
lung - excised, bovine	0.282	2.24	603
# whole body (average)	0,83 kcal/kg°C	4.12 #	1,156

**Calores específicos**  
 Agua 1 kcal/kg°C  
 Lípidos 0,507  
 Proteínas 0,299  
 Minerales 0,201  
 Hidratos de Carbono 0,272

Note that 1 MJ/m<sup>3</sup>-K = 239 kcal/m<sup>3</sup>-K and 1,000 kg/m<sup>3</sup> = 1 g/cm<sup>3</sup>.

# MODOS DE PERDIDAS DE CALOR Y ENERGIA GANADA NO METABOLICA

PERDIDAS EN ACTIVIDAD MUY INTENSA

≈ 80 %

Radiation ← ≈ 5 %

↓  
Sweat evaporation

Air temperature and humidity

Convection

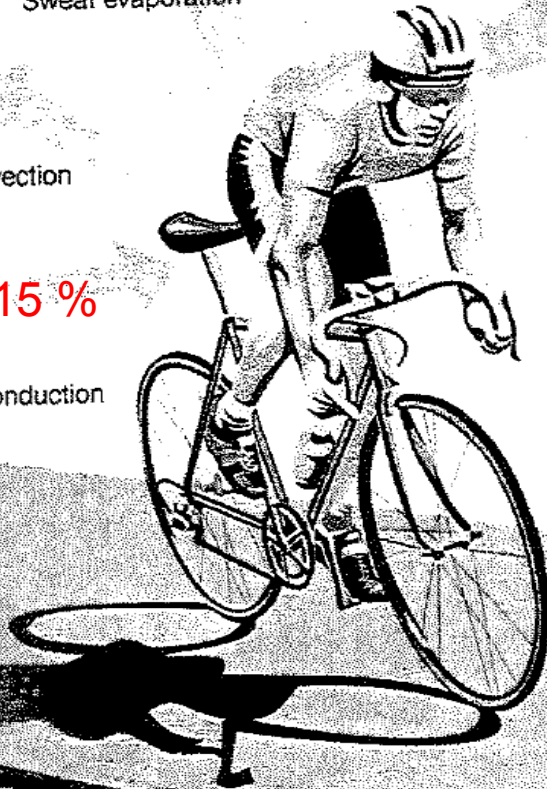


Metabolic heat storage

≈ 15 %

↓  
Conduction

Thermal radiation from the ground



Sky thermal radiation

≈ 0 %

↓  
Respiratory evaporation

Blood flow to the skin

Solar radiation

Reflected solar radiation

PERDIDAS EN REPOSO O BMR

Por:

Radiación ≈ 54 - 60 %

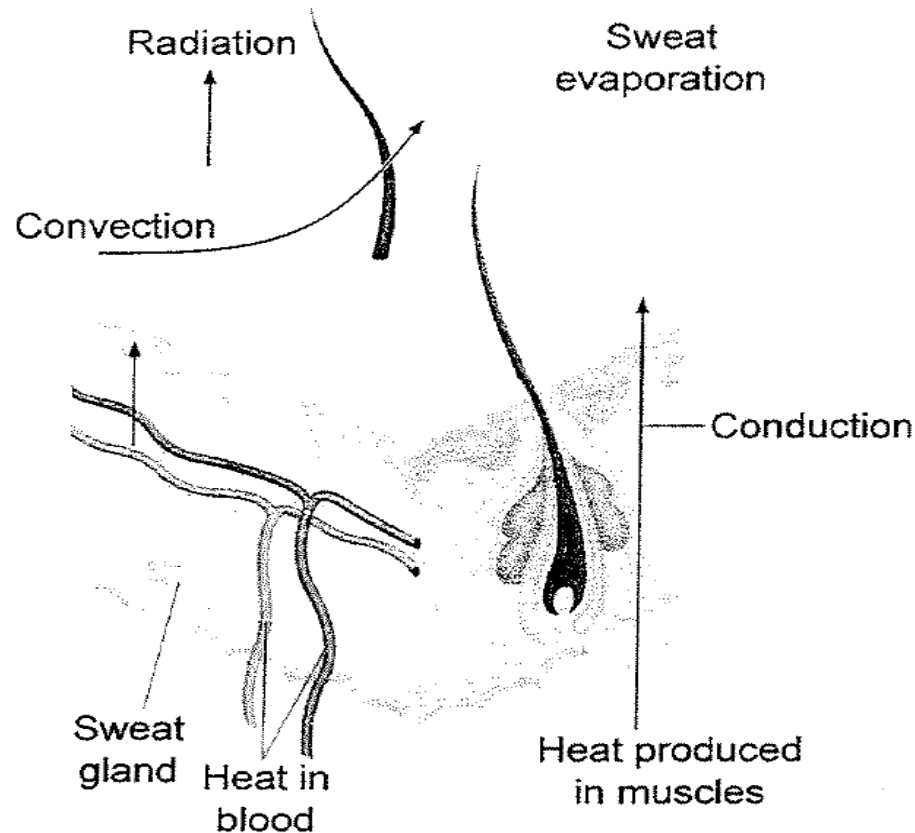
Convección y conducción ≈ 25 %

Evaporación por transpiración ≈ 7 %

Evaporación por respiración ≈ 14 %

Fig. 6.13. Overall body modes of loss of heat and nonmetabolic gain of energy. (From [340], adapted from [313]. Used with permission)

# VISION MICROSCOPICA DE LA PERDIDA DE CALOR POR LA PIEL



**Fig. 6.14.** More microscopic view of modes of heat loss by removal from the skin. When the skin temperature exceeds the environmental temperature, heat is removed by sweat evaporation, while when it is less than the environmental temperature there is net heat loss only by sweat evaporation. The skin is heated by arterial blood and by thermal conduction through subcutaneous (below the skin) tissue. (From [340]. Used with permission)

# EL HOMBRE ESTANDARD CILINDRICO

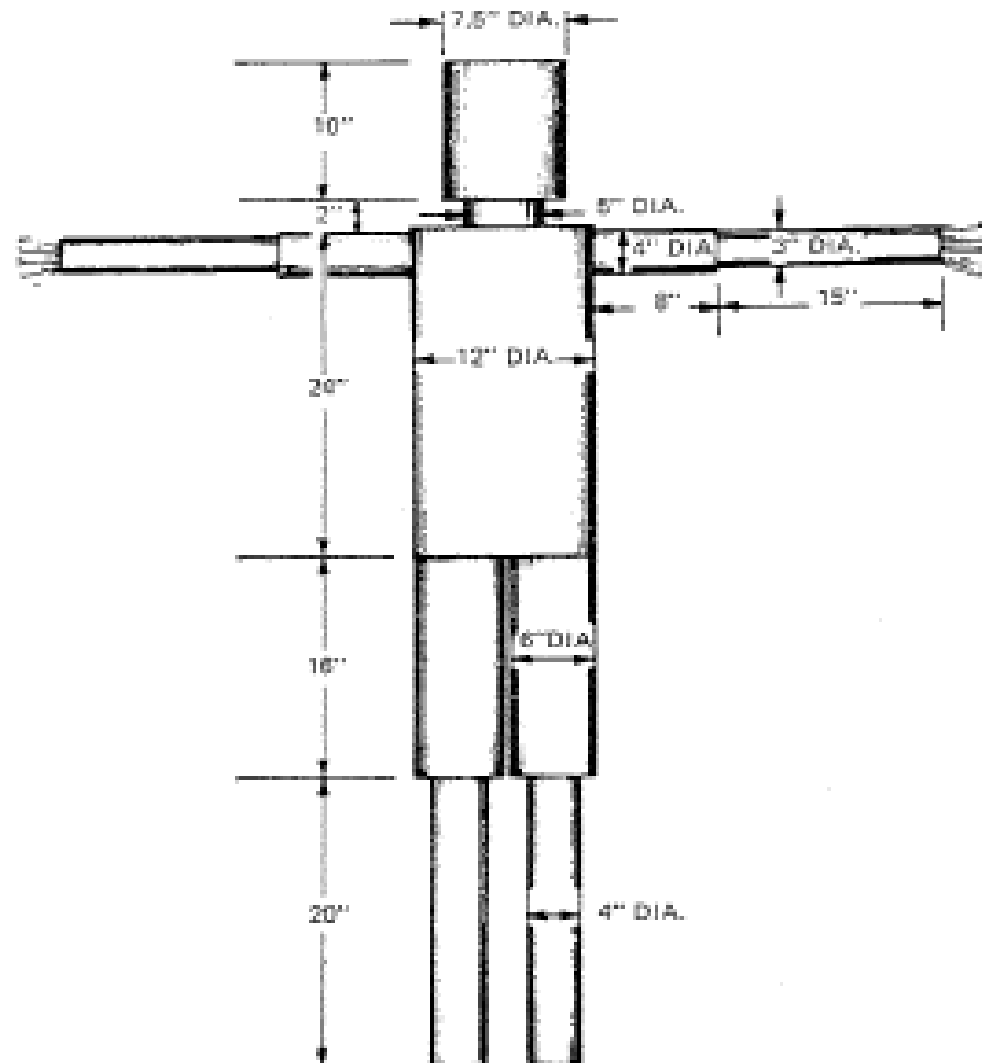
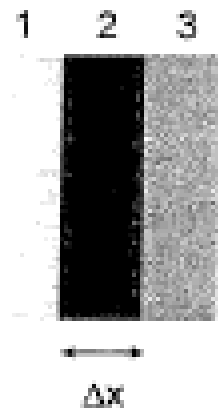


Fig. 1.17. Cylindrical model of a man used in studies of convective cooling. (From [34], adapted from [51])

# MODELOS GEOMETRICOS PARA EL FLUJO TERMICO



(a)



(b)



(c)

Esfera, se reemplaza  $\Delta x$  por:

$$r \Delta r / (r + \Delta r)$$

Fig. 6.15. Thermal flow between media 1 and 3, across medium 2, in different geometries: (a) rectangular slab, (b) cylindrical shell, (c) spherical shell. In common cases,  $\Delta r$  is much smaller than  $r$

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -K \frac{dT}{dx} \sim -K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Cilindro, se reemplaza  $\Delta x$  por:

$$r \ln(1 + \Delta r / r)$$



# CARACTERISTICAS TERMICAS DE VARIOS MATERIALES

Table 6.37. Thermophysical characteristics of materials. (Using data from [308])

material	thermal conductivity $K$ (W/m-K)	specific heat $c_v$ (MJ/m <sup>3</sup> -K)	density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
air	0.009246	0.00119	1.18
cotton fabric at 310 K	0.0796	0.0267	160
rubber	0.156	2.41	1,200
ethanol at 310 K	0.163	1.96	789
teflon	0.399	2.20	2,180
concrete	0.934	1.93	2,310
glass, plate	1.09	1.94	2,520
ice at 249 K (-42°C)	2.21	1.76	913
sapphire (normal to c-axis) at 310 K	2-20	2.89	3,970
stainless steel	13.8	3.68	7,910
aluminum	204	2.45	2,710
silver	405	2.59	10,500
diamond, natural	2,000	1.82	3,510

Note that 1 MJ/m<sup>3</sup>-K = 239 kcal/m<sup>3</sup>-K and 1,000 kg/m<sup>3</sup> = 1 g/cm<sup>3</sup>.

# Radiación del cuerpo negro

$$I(\lambda, T)d\lambda = \frac{2hc^2 \varepsilon / \lambda^5}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} d\lambda$$

where  $\varepsilon$  is a parameter known as the emissivity,  $h$  is Planck's constant ( $6.626 \times 10^{-34}$  J-s),  $k_B$  is Boltzmann's constant ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K), and  $T$  is the temperature in degrees Kelvin (K) ( $T(K) = T(^{\circ}C) + 273^{\circ}$ ). ( $I(\lambda, T)$  is actually the intensity per unit wavelength range.  $I(\lambda, T)d\lambda$  is the intensity covering the wavelength range from  $\lambda$  to  $\lambda + d\lambda$ , where  $d\lambda \ll \lambda$ . Intensity is energy/area-time.)

$$\lambda_{peak}(\mu m) = \frac{2,898}{T(K)} \quad \text{Ley de Wein}$$

$$T = 300K$$

$$R = \varepsilon\sigma T^4 \quad \text{Flujo de radiación}$$

$$\lambda_{peak} = 10\mu m$$

Ley de Stefan

$$T = 5000K$$

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{loss} = RA = \varepsilon_{skin}\sigma T_{skin}^4 A_{skin} = 932W$$

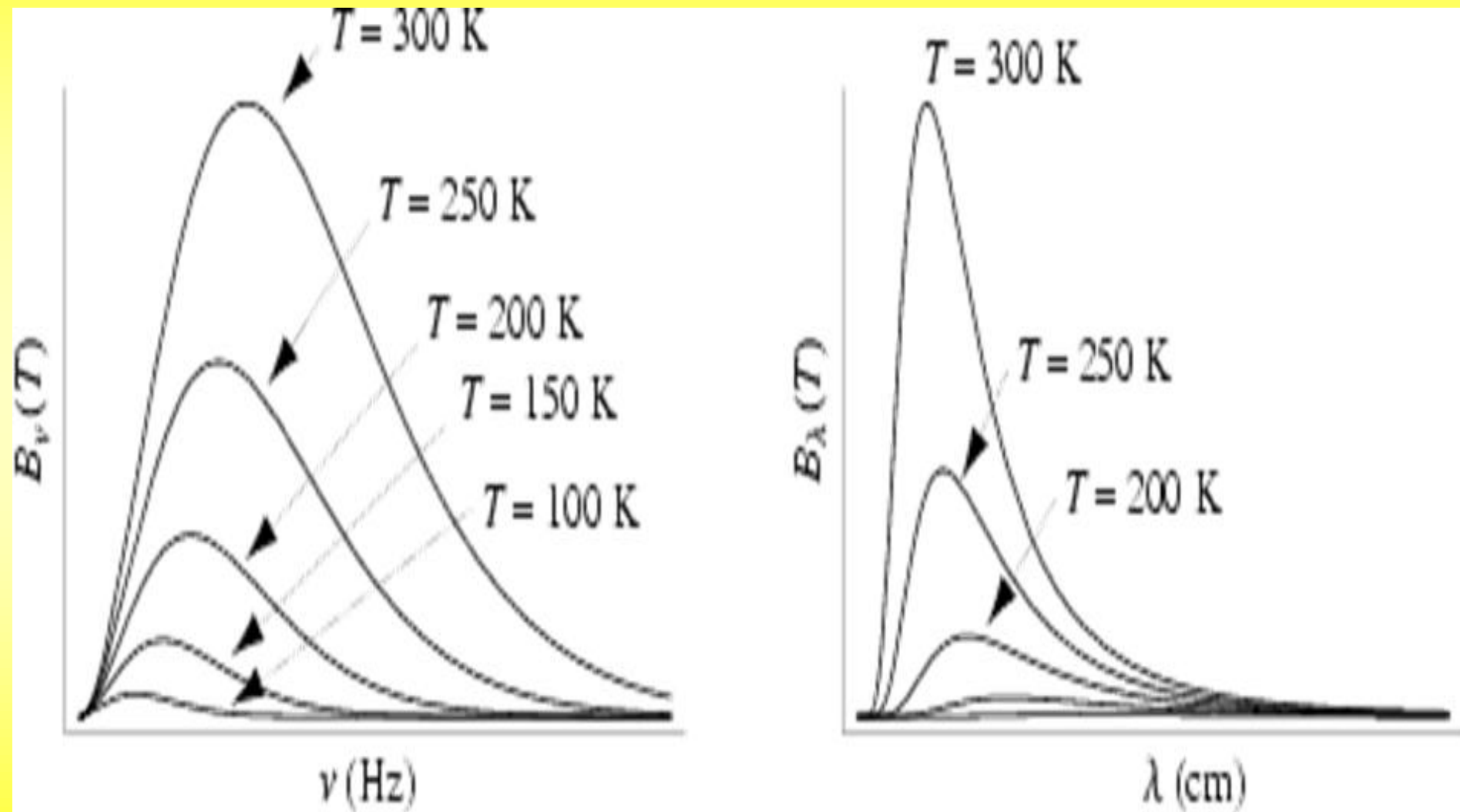
$$\lambda_{peak} = 600nm$$

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{gain} = RA = \varepsilon_{room}\sigma T_{room}^4 A_{skin} = 816W$$

$$T_{room} = T_{skin} - \delta$$

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_r = 4\sigma A_{skin} T_{skin}^3 (T_{skin} - T_{room})$$

# TERMOGRAFIA



# EMISIVIDAD EN EL INFRARROJO

Table 6.38. Infrared emissivities. (Using data from [298, 326, 327], and other sources)

fresh snow	0.89
ice	0.96
dry or wet sand	0.89
concrete	0.95
moist soil	0.97
grass surface	0.96
red brick	0.92
wood	0.90
white paint	0.93
aluminized paint	0.55
galvanized iron	0.28
aluminum foil	0.08
human skin	0.95–0.99

# EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Rayos-X

Ultravioleta

Visible

Infrarrojo

Ondas de radio.

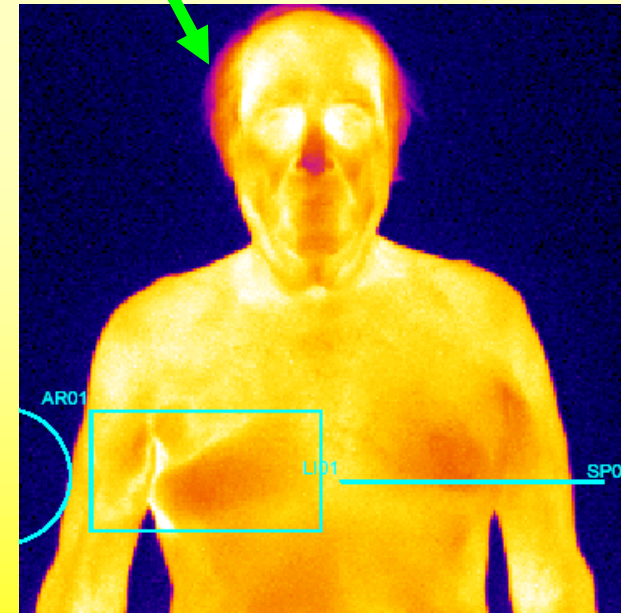
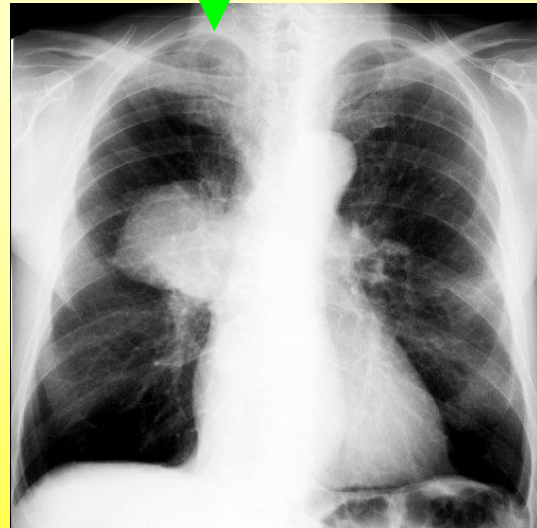
$\lambda$

0,01  $\mu\text{m}$

0,35  $\mu\text{m}$

0,75  $\mu\text{m}$

0,1 cm



# REFLECTANCIA EN EL VISIBLE

Table 6.39. Reflectance in the visible. (Using data from [298])

from	reflectance
clipped grass	0.24
dry sand	0.40
dry tar macdam (Compuesto asfáltico)	0.12
dry concrete	0.24
fresh snow	0.85
black human skin	0.18 (0.10 <sup>a</sup> )
white human skin	0.35 (0.42 <sup>a</sup> )

<sup>a</sup>From [297] for very black and very white human skin.

# PÉRDIDAS POR CONVECCIÓN Y CONDUCCIÓN

$$-\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{f.conv} = h_{f.conv} (T_{skin} - T_{room})$$

$$h_{f.conv} \propto \frac{1}{L} \left( \frac{Lw}{\nu} \right)^n \quad -\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{n.conv} = \frac{0.69}{L^{0.25}} (T_{skin} - T_{room})^{1.25}$$

$$-\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{cond.} = K \frac{dT}{dx} \approx K \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$-\frac{1}{A} \left( \frac{dQ}{dt} \right)_{cond.} = h_t \Delta T$$



# PÉRDIDAS POR CONVECCIÓN Y CONDUCCIÓN

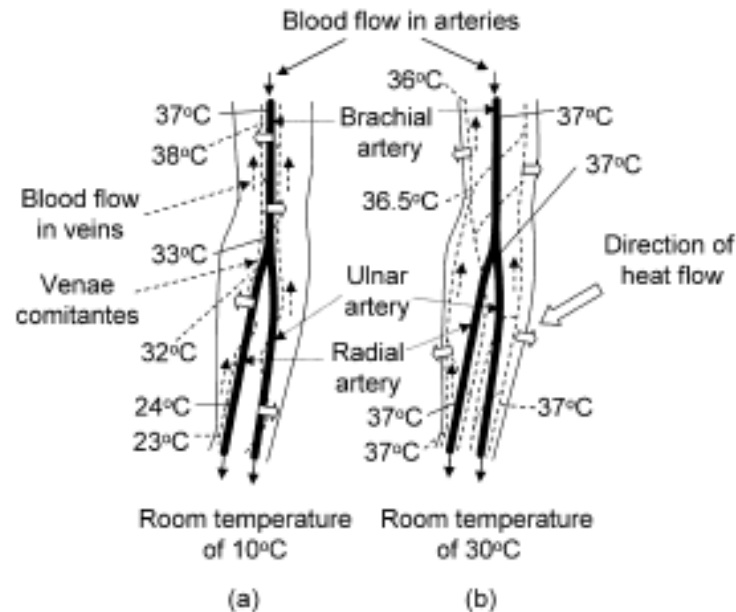


Fig. 6.17. Countercurrent heat exchange in the (right) arm for blood flowing through the brachial artery in (a). At the higher room temperatures (30°C) in (b) and during exercise the venous return flow occurs through superficial vessels to enable heat loss to the room. At the lower temperature (10°C) in (a) this return path is shifted to deep veins, which helps retain heat in two ways: Heat from the arteries is lost to the venous blood before it is lost to the room, which is countercurrent heat exchange (Fig. 6.16), and little heat is lost to the room from these veins because they are deep. Note that in the lower arm the temperature in the venae comitantes is 1°C lower than that in the artery. The venae comitantes are the veins accompanying the arteries in the limbs. Different types of arrows are used to denote blood flow in arteries (solid, narrow), blood flow in veins, (dashed, narrow), and heat flow (wide, gray). (Based on [299, 315])

# PÉRDIDAS POR RESPIRACION

$$Q = mc\Delta T$$

$$Q_p = m\Delta H_{vap}$$

$$-\left(\frac{dQ}{dt}\right) = \rho_{air}c_{p,air}(T_{exp} - T_{insp})\frac{dV_{air}}{dt} + \Delta H_{vap,water}(\rho_{w,exp} - \rho_{w,insp})\frac{dV_{air}}{dt}$$

## PERDIDAS DURANTE ESFUERZO (EJERCICIO)

Por Radiación  $\approx$  5 %

Convección y conducción  $\approx$  15 %

Evaporación por transpiración y respiración  $\approx$  80 %

# CONTROL DE LA TEMPERATURA

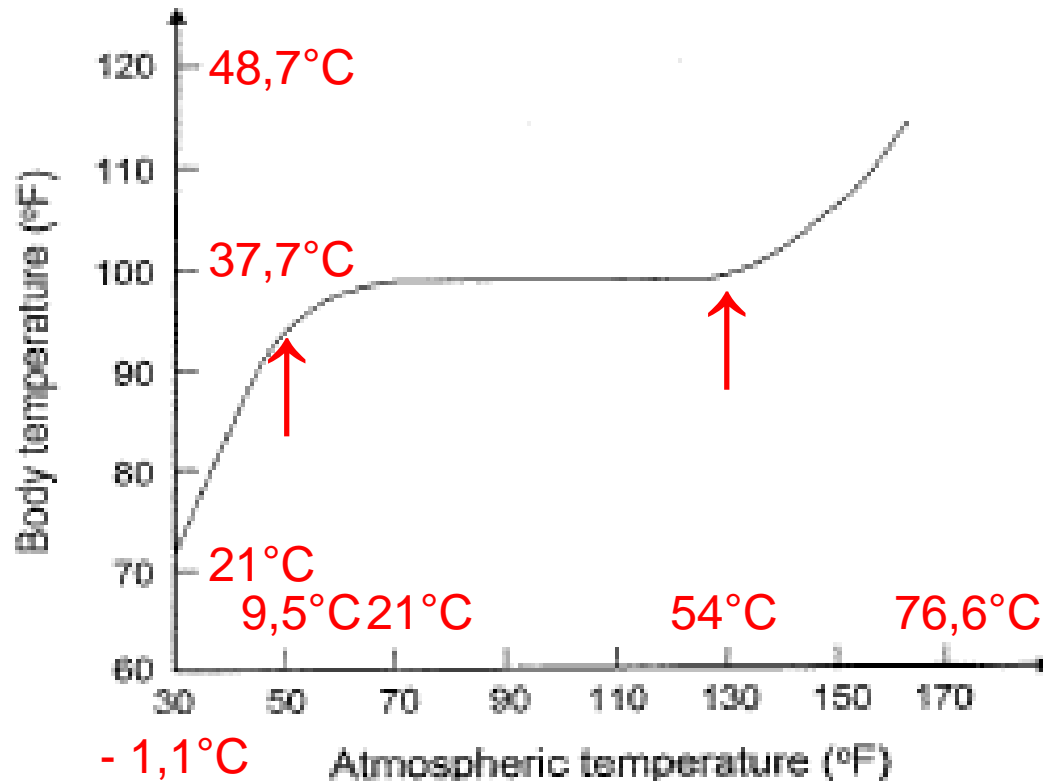


Fig. 6.18. Body control of core temperature for several hours with large variations in local environmental temperature, for dry air. Normal body temperature 98.6°F (37°C) is maintained for atmospheric temperatures from ~70 to 130°F (~21 to 54°C). The exact shape of this curve depends on the surroundings: humidity, air movement, thermal radiation to the body, and so on. (Based on [314])

# LIMITES MAXIMOS TOLERABLES

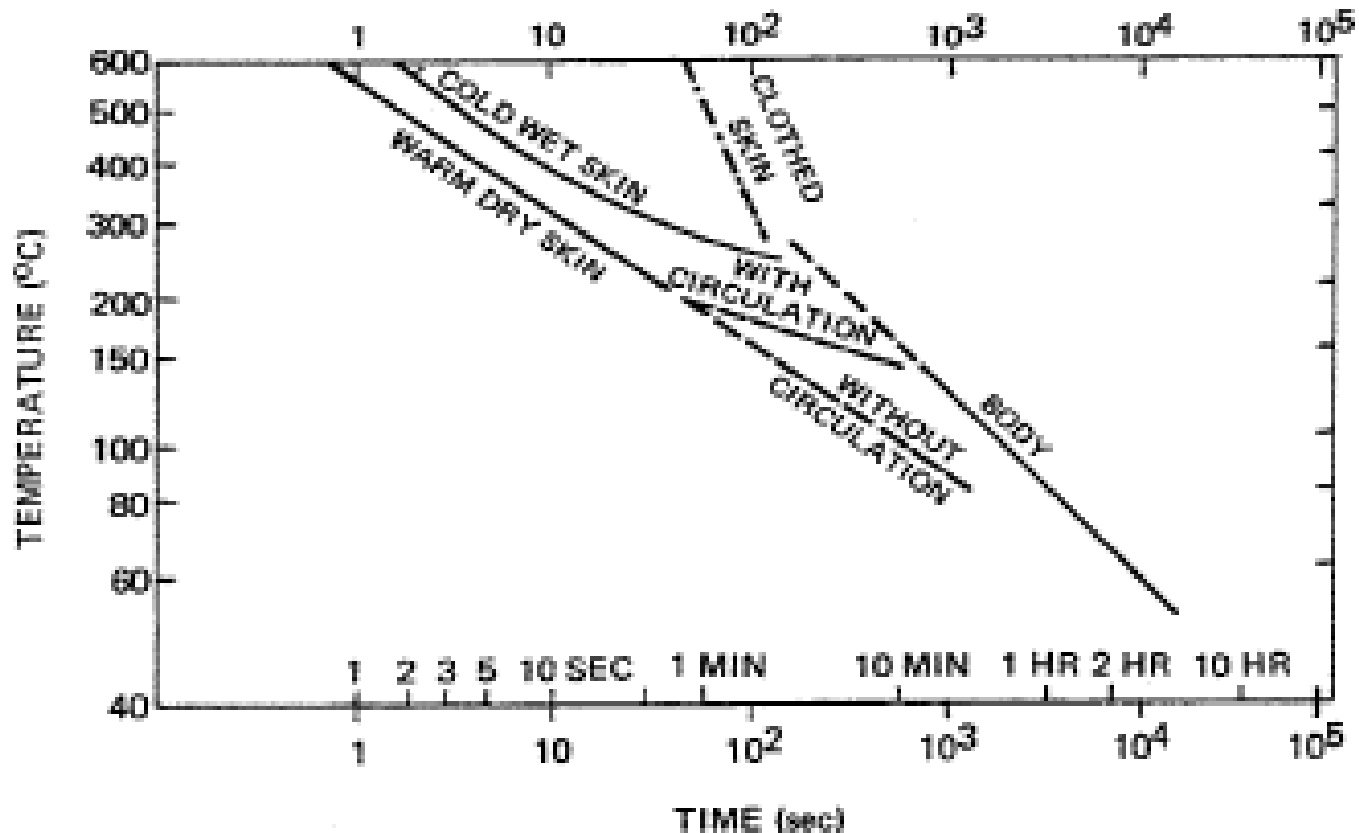


Fig. 6.19. Maximum tolerable elevated temperatures (of air) as a function of exposure times, for different body conditions. Tolerable conditions are below the lines for each skin condition and for the body, and intolerable conditions are above them. (From [297])

# SUPERVIVENCIA EN AGUA FRIA

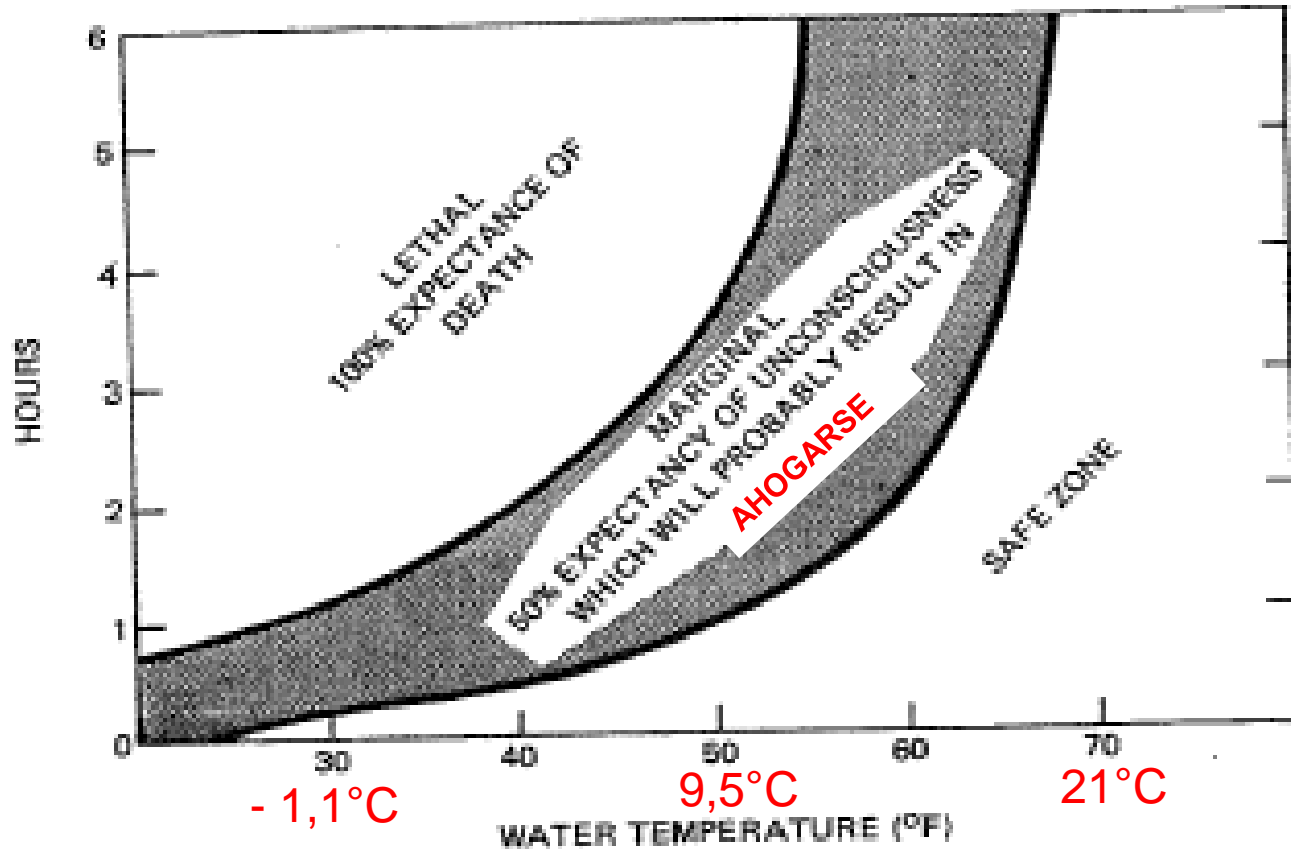
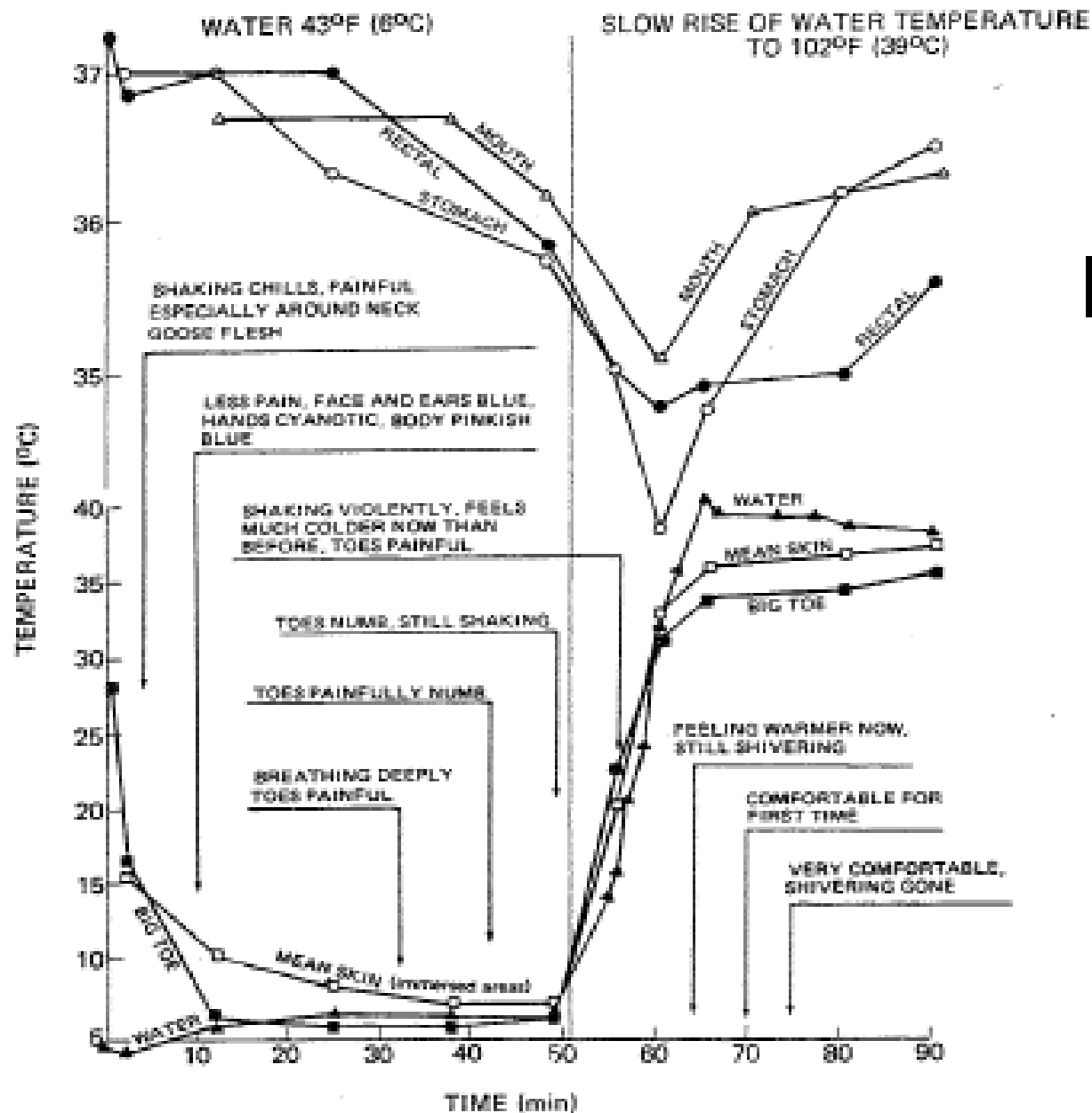


Fig. 6.20. Life expectancy of a person without an exposure suit in cold water for different times. (From [297])



INMERSION  
EN AGUA  
FRIA Y  
LUEGO  
EN AGUA  
CALIENTE

Fig. 6.21. Variation in skin and internal temperatures when a person is immersed in 6°C (43°F) water for 52 min and then warmed slowly using 39°C water. (From [297])

# TEMPERATURAS CRITICAS Y TEMPERATURA AMBIENTAL

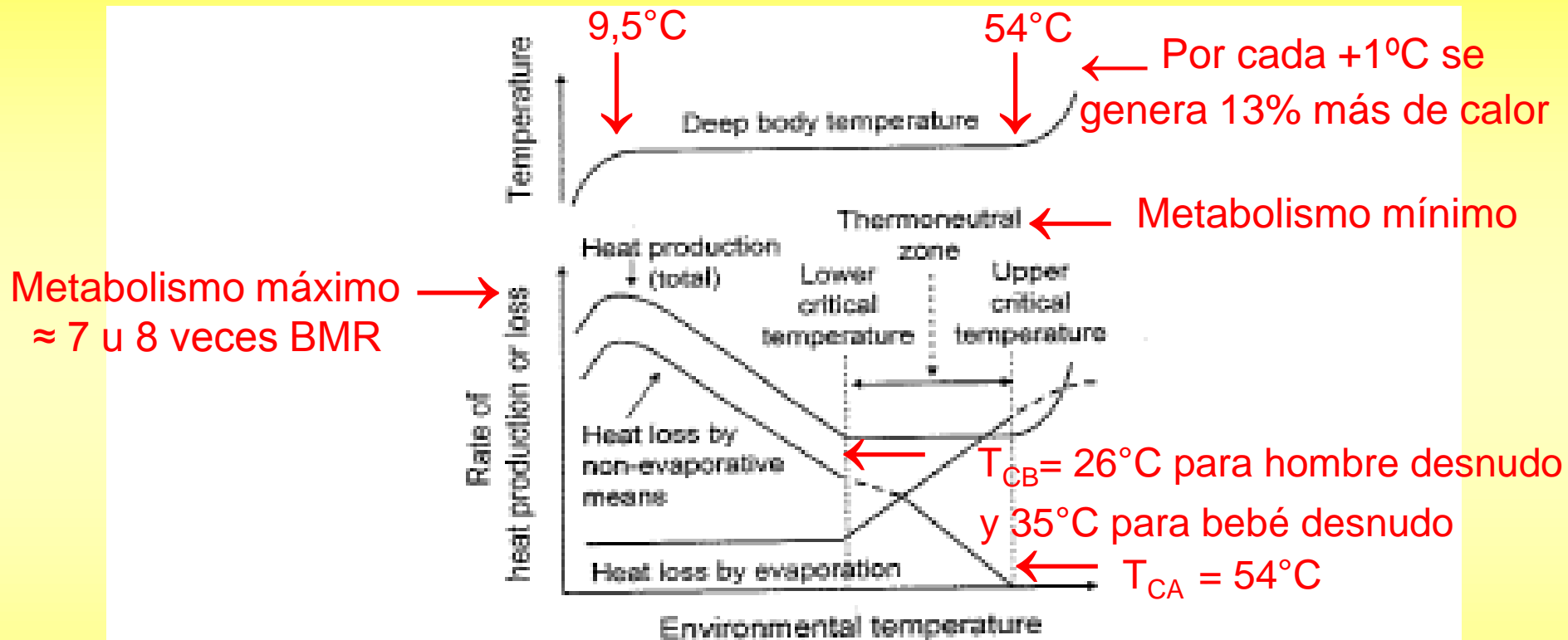


Fig. 6.22. Critical temperatures and relation between the environmental temperature and heat production in homeothermic animals (which are those having constant and relatively high body temperature, which means birds and mammals). (Based on [298, 328])

# TEMPERATURAS EN EL CUERPO HUMANO

Table 6.45. Core temperatures within the human body. (Using data from [308])

body region	normal temperature (°C)
skin	32–35
scrotum	34.0
liver	36.4–36.8
oral cavity	36.5–36.6
superior vena cava	36.65
esophagus, lungs	36.75
heart (right ventricle)	36.75
aorta, inferior vena cava	36.75
pulmonary artery and vein	36.75
kidney	36.85
spinal cord	36.95
stomach, rectum (mean)	37.0
rectum (range)	36.2–37.8
brain, uterus	37.3



# TEMPERATURAS EN EL CUERPO EN AMBIENTE FRIO Y CALUROSO

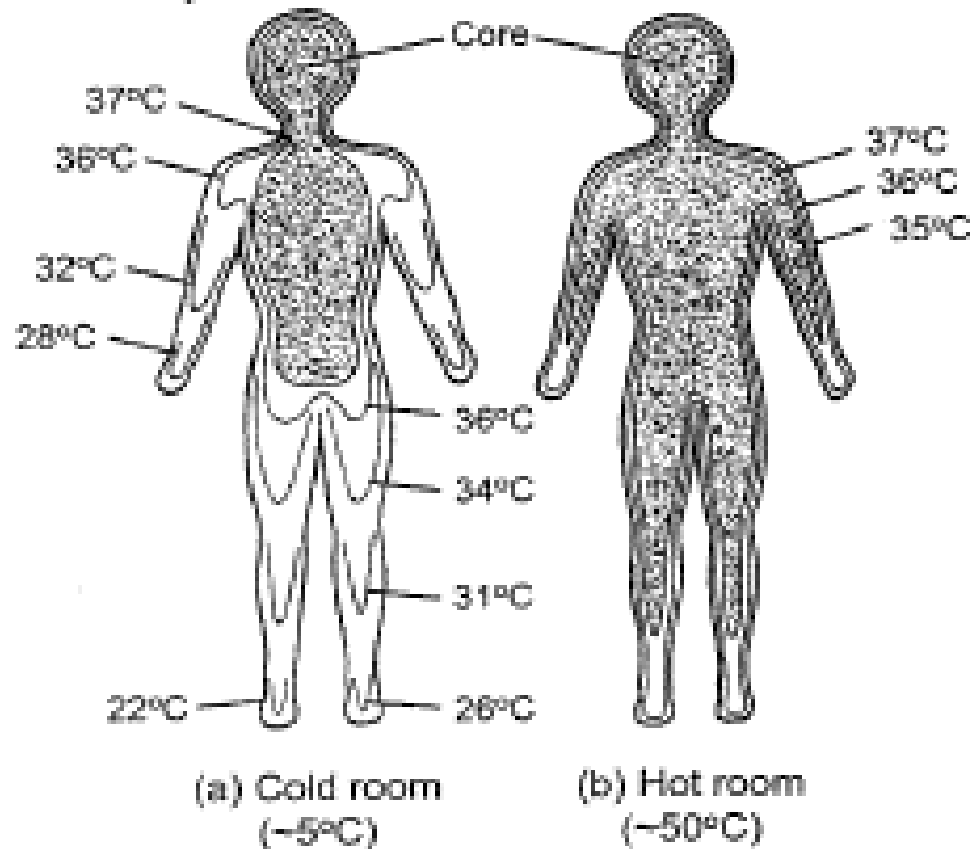


Fig. 6.23. Temperature in the body in cold and hot environments. (From [308]. Courtesy of Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, Vol. 1 (1999), <http://www.nanomedicine.com>)

# MODELO DE FLUJO DE CALOR DESDE EL INTERIOR HACIA EL AMBIENTE

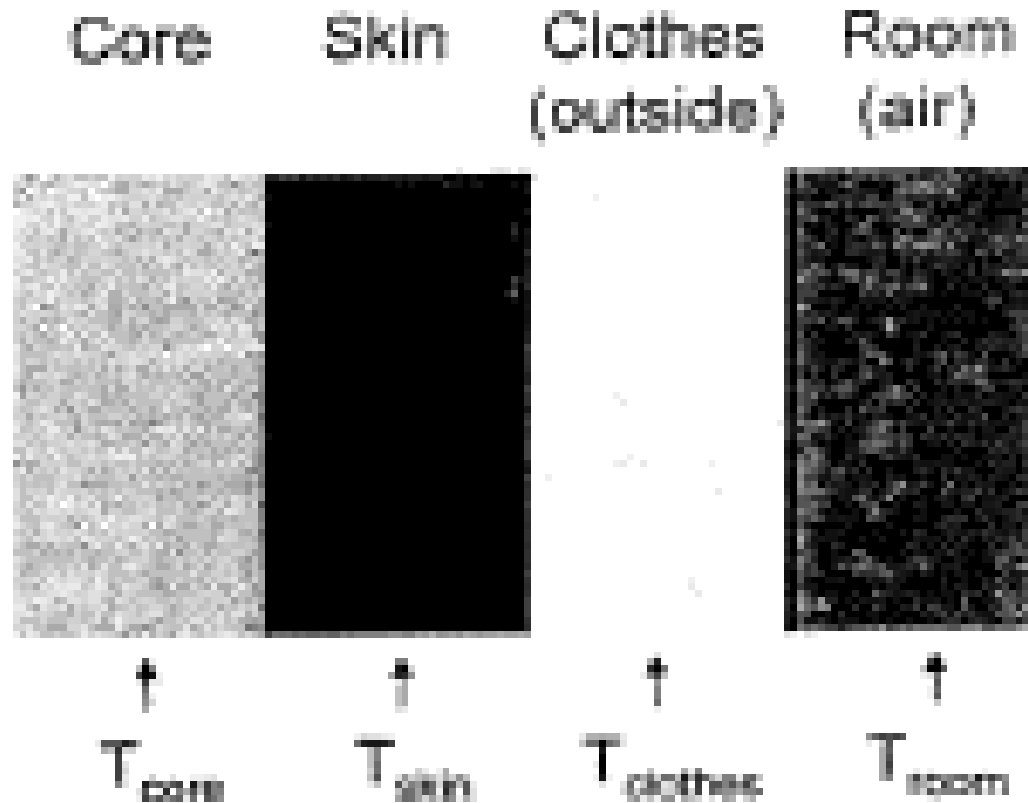


Fig. 6.24. Model of heat flow from the body core to air