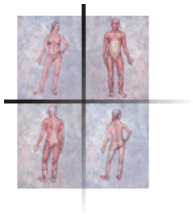
CAPÍTULO 8



MODELOS QUÍMICOS DE ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL DE DOS, TRES, Y CUATRO COMPARTIMENTOS

Robert Witbers, Joe Laforgia, Steven Heymsfield, Zi-Mian Wang y Robyn Pillans

1. MODELOS DE DOS COMPARTIMENTOS

1.1 Introducción

Los tres modelos de dos compartimentos para el análisis de la composición corporal (Tabla 1) involucran la determinación de la densidad corporal (DC) a través del peso hidrostático o hidrodesintometria, el de agua corporal total (ACT) a través de la dilución isotópica, y el potasio corporal total (KCT) a través del conteo de la radiación gamma emitida por el ^{40}K, el cual comprende el 0.01181 de todo el potasio que hay naturalmente. Estos métodos están basados en la premisa de que el cuerpo puede dividirse en dos compartimentos químicamente singulares (Figura 1), denominados masa grasa (MG) y masa magra (MM), o libre de grasa. La MG, definida como lípido extractable por el éter, se supone que tiene una densidad de 0.9007 $gr.cm^{-3}$ a 36 grados C, es anhidra y no contiene potasio, mientras que se considera que la MM tiene una densidad de 1.1000 $gr.cm^{-3}$ a 36 grados C, un contenido de agua del 72 %, y una concentración de potasio de 68.1 $mmol.kg^{-1}$- En los párrafos siguientes se describe y se critica la metodología para los modelos de dos compartimentos, ya que en muchos casos proporcionan el marco conceptual sobre el cual se basan los modelos mas sofisticados.

Modelos	**Presunciones**	**Cálculos**
Hidrodensitometría	Densidad MM = 1.1000 $gr.cm^{-3}$ Dens. MG = 0.9007 $gr.cm^{-3}$	% GC = 497.1/DC – 451.9 MM (kg)= peso (kg) – (MG) (kg)
Agua Corporal Total	ACT (kg)/MM (kg) = 0.72	MM (kg) = ACT (kg)/72 x 100
Potasio Corporal Total	KCT/MM = 68.1 $mmol.kg^{-1}$	KCT (mmol)=KCT(gr)/39.1 x 100
		MM (kg) = KCT (mmol)/68.1
MM = masa magra; DC = densidad corporal; % GC = porcentaje de grasa corporal; Mg = masa grasa; KCT = potasio Corporal Total; ACT = Agua Corporal Total.		

TABLA 1. *Modelos de dos compartimentos*

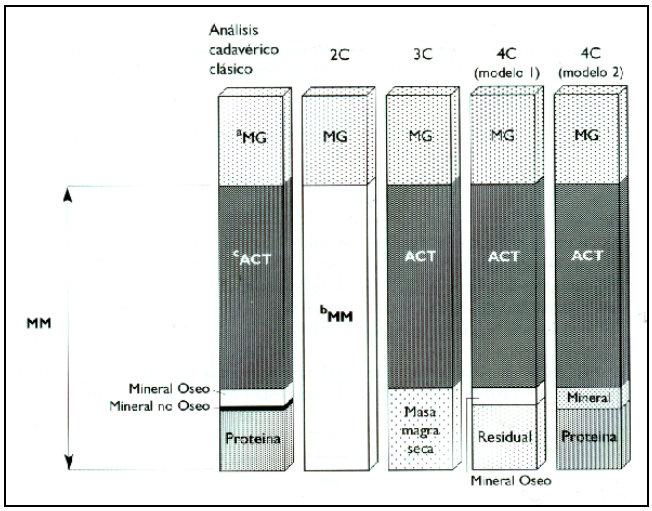


FIGURA 1. *Gráfico esquemático de los análisis clasicos de cadaveres (Brozek, Grande, Anderson, & Keys, 1963) y de los modelos químicos de 2, 3, y 4 Compartimentos, para el análisis de la composición corporal.*

[a]MG = masa grasa; [b]MM = masa magra; [c]ACT = agua corporal total.

1 .2 Descripción

1.2.1 Peso hidrostático subacuático (PHS) o Hidrodensitometría

El principio de Arquímedes establece que cuando un cuerpo se sumerge en un líquido experimenta ***un*** empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del líquido desalojado, la densidad de un objeto se define corno su peso por unidad de volumen (gr.crn^{-3}). Por lo tanto, si determinamos el peso de un sujeto, tanto en el aire como cuando está completamente sumergido en el agua, entonces se podría calcular su densidad de la siguiente manera:

Densidad (gr. Cm^{-3}) = Peso (gr) / volumen (cm^3)

= Peso del cuerpo en el aire (gr) / peso del cuerpo en el aire (gr) – peso del cuerpo en el agua (gr)

Además, se deben hacer correcciones y ajustes sobre la densidad del agua, la cual depende de la temperatura, y sobre el volumen residual ventilado ya que el peso hidrostático normalmente se toma cuando el sujeto ha realizado una espiración máxima Por lo tanto, la fórmula completa (Buskirk, 1961) es la siguiente:

normalmente se toma cuando el sujeto ha realizado una espiración máxima. Por lo tanto, la fórmula completa (Buskirk, 1961) es la siguiente:

$$DC = \frac{PC_{aire}}{\left(\frac{PC_{aire} - PC_{agua}}{DA}\right) - VR}$$

donde:
DC densidad corporal (gt.cm^{-3} o gr.m^{-1})
PC aire = peso corporal en el aire (gr)
PC agua = peso corporal (gr) cuando el sujeto está sumergido en el agua
DA = densidad del agua (gr.cm^3 o gr.ml-')
VR volumen respiratorio residual (mi)

Luego, la DC normalmente es convertida a porcentaje de grasa corporal (% GC) utilizando la ecuación de Brozek y cols. (1963), la cual está derivada en la Figura 2:

$$\%GC = \frac{497.1}{DC} - 451.9$$

Por lo tanto, si un hombre de 75.00 kg tiene un peso sumergido de 3.00 kg, a una temperatura de agua de 35 grados C (DA = 0.9941 gr.cm^3), y su volumen residual es de 1.300 mi, entonces:

$$DC = \frac{75000}{\left(\frac{75000 - 3000}{0.9941}\right) - 1300} = 1.05445 gr.cm^{-3}$$

$$\frac{1}{{}^{c}DC} = \frac{MG}{{}_{densidad}MG} + \frac{MM}{{}_{densidad}MM}$$

$$MG = {}_{densidad}MG\left[\frac{1}{DC} - \left(\frac{1 - MG}{{}_{densidad}MM}\right)\right]$$

$$MG = 0.9007\left[\frac{1}{DC} - \left(\frac{1 - MG}{1.1000}\right)\right]$$

$$MG = \frac{0.9007}{DC} - 0.818818 + 0.818818\ MG$$

$$0.181182\ MG = \frac{0.9007}{DC} - 0.818818$$

$$MG = \frac{4.971}{DC} - 4.519$$

$$\%\ MG\ \ o\ \ \%\ GC = \frac{497.1}{DC} - 451.9$$

***FIGURA 2**. Derivación del modelo de dos compartimentos ([a]MG y [b]MM) para estimar la adiposidad corporal relativa, a través del peso hidrostático subacuático o hidrodensitometría.*

Presunciones: *Densidad de la MG = 0.9007 gr.cm-^{3} a 36º C (Fidanza, Keys, y Anderson, 1953)*
Densidad de la MM = 1.1000 gr.cm^{-3} a 36º C (Brozek y cols., 1963)

Si el peso corporal (kg) es igual a la unidad (es decir, 1), y; los dos compartimentos son representados como proporciones, de tal modo que la MG + MM = 1.0, entonces la fórmula puede derivarse simplemente como se muestra arriba, donde: [a]MG = masa grasa; [b]MM = masa magra; [c]DC = densidad corporal.

La ecuación de Sin % GC = 495/DG - 450; Siri, 1956) puede utilizarse para convertir la DG en % GG. Sin embargo, esta ecuación utiliza un valor de 0.9000 gr.cnr^{-3} para la densidad de grasa a 37 gr C. A pesar de que la temperatura interna es aproximadamente de 37 gr C, la temperatura corporal media, bajo condiciones basales de reposo y en un medio ambiente confortable, probablemente sea 1 o 2 gr C más baja (Burton, 1935). Además, la temperatura corporal media, probablemente sería de ~ 36 gr C durante el peso hidrostático (PHS) cuando la temperatura del agua es mantenida en ~ 35 gr C. Por lo tanto, hemos utilizado 0.9007 gr.cm^{-3} para la densidad de la grasa a 36 gr C. De cualquier modo, las ecuaciones de Siri (1956) y Brozek y cols. (1963) dan resultados dentro del 1 % de GC en el rango de 1.03-1.10 gr.cm^{-3}.

Es importante que se mida el VR cuando el sujeto está sumergido en el agua ya que el efecto neto de la presión hidrostática (disminuye el VR), el congestionamiento vascular pulmonar (disminuye el VR), y la menor cornpliancia (aumenta el VR), es la reducción del VR ventilado. En un estudio (Withers & Hamdorf, 1989) se observó que la inmersión en agua disminuía el VR en 292 ml, y que esto aumentaba la grasa corporal relativa estimada de 15.2 ^{0}/o a 17.1 %.

Distintas razones han contribuido para que el PHS sea el modelo de dos compartimentos más frecuentemente utilizado para estimar la composición corporal. Los sistemas básicos de PHS pueden armarse fácilmente consiguiendo un contenedor de agua, que puede ser un tonel de vino, un sistema de caldera, y una balanza de autopsia. Además, el VR puede medirse a través del lavado de N_2 usando analizadores de CO_2 y O2 los cuales son aparatos básicos del equipamiento de cualquier laboratorio de Fisiología del Ejercicio. Además, es más expeditivo que el método del ACT, en el cual el sujeto normalmente espera en el laboratorio durante 3-3.5 horas hasta que el isótopo se equilibre con los fluidos corporales. Además, el costo de un contador total de K corporal total podría ser prohibitivo.

La DC puede medirse con gran precisión. Buskirk (1961) señaló un error técnico promedio definido como el desvío standard de las diferencias entre las series 1 y 2, de 0.0021 gr.cm-^{3}, para 7 estudios. Las series de reproductibilidad en nuestro laboratorio con 6 personas entre 20 y 30 años dieron un coeficiente de correlación intraclase de 0.999 (DS de las diferencias = 0.0011 gr.cm^{3}) y un error técnico de medición (ETM) de 0.3 % GC (Figura 3).

Mientras que la inmersión completa puede hacer que este método no sea adecuado para algunas personas como los mayores, este problema se podría evitar utilizando técnicas pletismográficas (Garrow y cols., 1979; Gundlach & Visscher, 1986), las cuales tienen precisiones comparables a las reportadas en este párrafo.

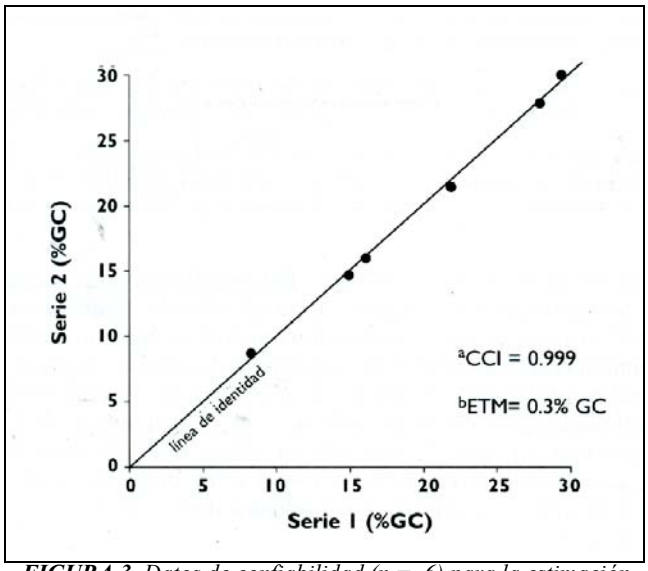


FIGURA 3. *Datos de confiabilidad (n = 6) para la estimación del % GC a través de la técnica hidrodensitométrica. [a]CCI = coeficiente de correlación intraclase, [b]ETM = error técnico de medición.*

1.2.2 Agua corporal total ACT), a través de la ilusión isotópica

EI cálculo del ACT está basado en el principio de dilución:

$$C_1 m_1 = C_2 m_2$$

donde:
C_1 = concentración del trazador en solución experimental
m_1 = masa o peso de la solución experimental
C_1 = concentración en equilibrio del trazador en el fluido biológico de interés (plasma, orina, o saliva)
m_2 = nasa o peso de ACT

Esta ecuación puede reorganizarse:

$$m_2 = \frac{C_1 m_1}{C_2}$$

ACT (gr) = ***[trazador] en solución experimental x solución experimental (gr)*** / ***concentración del trazador en equilibrio***

Por lo tanto,

ACT (gr) = ***dosis de trazador (gr)*** / ***concentración del trazador en equilibrio***

Existe una variedad de trazadores o «tracers» (tritio, deuterio, y^{18}O) y de técnicas de medición (trino: conteo centellográfico; deuterio y^{18}O: espectroscopía de absorción infrarroja y espectroscopía de masa de cociente isotópico) utilizadas para determinar el ACT. Sin embargo, el deuterio ha surgido como el trazador de preferencia porque es un isótopo estable sin los riesgos de radiación del tritio, y además, es mucho más económico que el H_2 ^{18}O La espectroscopía de masa de cociente isotópico también es el procedimiento de elección porque se pueden lograr mediciones con una precisión < 1.0 %. La dosis de óxido de deuterio ($^2H_2$ O) normalmente es administrada en forma oral en una solución con agua destilada. Sin embargo, se necesitan hacer correcciones para la concentración pre-dosis en el fluido biológico experimental, y por el hecho de que el ACT es sobreestimada en ~ % (Schoeller & Jones, 1987) debido al intercambio de deuterio con hidrógeno no acuoso en el cuerpo. Por lo tanto, la ecuación precedente necesita ser modificada:

ACT real (gr)= ***dosis de "tracer" de ^2H_2O(gr) x dosis de agua enriquecida (ppm), en exceso al valor de base en saliva*** / ***saliva enriquecida, en equilibrio (ppm) – valor de base en saliva (ppm)***

Supongamos que el valor de base natural de deuterio en la saliva, en un adulto de 70 kg es de 155 ppm, y que una dosis de ^{2}H, O con un enriquecimiento deuterio de 23.907 ppm aumente la concentración de deuterio en la saliva a 211 ppm en equilibrio. Estos datos llevan a un valor real de ACT de:

$$ACT\ real = \frac{\left(\frac{103.12x(23907-155}{211-155}\right)}{1.04} = 42055\ gr\ o\ 42.055\ kg$$

Por lo tanto, la MM es de 58.41 kg, con una grasa corporal relativa del 16.6 %. El lector interesado puede referirse a Schoeller y cols. (1980), cuyo trabajo también contiene un factor de corrección para la diferencia de peso molecular entre el H,O (18.016) y el ^{2}H,O (20.028). La estandarización estricta de nuestros procedimientos para determinar el ACT nos ha permitido alcanzar un coeficiente de correlación intraclase y un ETM de 0.983 y 0.5 % GC, respectivamente, para 2 series de medición en 5 sujetos (Figura 4).

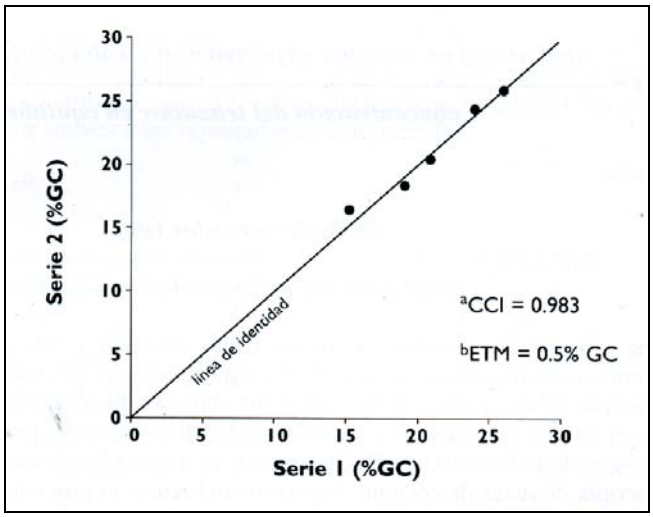


FIGURA 4. *Datos de confiabilidad (n= 5) para el % GC, a partir de la determinación del agua corporal total a través de la dilución isotópica (de deuterio).*

[a]CCI = coeficiente de correlación intraclase, [b]ETM = error técnico de medición

1.2.3 Potasio corporal total (KCT)

El ^{40}K radioactivo es detectado por contadores corporales totales, muy sensibles, que deben ser examinados a partir de la radiación de base ya que la concentración de este isótopo es muy baja. También se necesita una tolerancia para la atenuación del conteo por cada tamaño y forma corporal del sujeto; la precisión, adicionalmente, depende de factores tales como el tipo de sistema de conteo junto con su diseño, y la eliminación de contaminadores cercanos. La Tabla 1 indica cómo calcular la MM a partir del KCT. Nuestras series de confiabilidad test-retest (n= 6), usando un contador del KCT en el Departamento de Medicina Nuclear del Hospital Royal Adelaide produjeron un coeficiente de correlación intraclase de 0.886 y un ETM *de* 2.4 % GC. Estos resultados son inferiores a nuestras precisiones, reportadas previamente, para la DC y el ACT.

1.3 Crítica

1.3.1 Peso hidrostático Subacuático (PHS) o Hidrodensitometría

El modelo hidrodensitométrico de dos compartimentos arrojará valores incorrectos para el % GC si:

- la densidad de grasa extractable por éter, la cual compone la masa grasa, no es de 0.9007 gr.cnr^{-3}.
- *las densidades y proporciones relativas de los cuatro compartimentos de la MM [agua, proteínas, mineral óseo, mineral no óseo (tejido blando)] difieren de los valores para los análisis cadavéricos clásicos (Tabla 2 y Figura 1), de tal modo que la densidad de la MM no sea 1.1000 gr.cm^{-3}.

Sustancia	Peso (gr)	Volumen a 36° C (ml)	Densidad a	% (le MM
Agua	624.3	628.2	0.99371	73.72
Proteínas	164.4	122.7	1.34	19.41
Mineral óseo	47.7	16.0	2.982	5.63
Mineral no óseo	10.5	3.2	3.317	1.24
Total	846.9	770.1	1.100	100.00

***TABLA** 2. Pesos y volúmenes de los compartimentos químicos de la MM, por kilogramo de peso corporal, a una temperatura corporal media (Brozek y cols., 1963).*

Por lo tanto, es apropiado examinar la validez de estas constantes, ya que también son utilizadas en los modelos multi-compartimentos:

(a) Grasa

Fidanza y cols. (1953) reportaron que la densidad de 20 muestras de grasa extractable por éter del tejido intra-abdominal y subcutáneo de 5 sujetos fue de 0.9007 +/- 0.00068 gr.cm^{-3} (media +/- DS) a 36 gr C, con un coeficiente de expansión térmica de 0.00074 gr.cm^{-3}/gr C^{-1}, en el rango de 15 a 37 gr C. Por lo tanto, el pequeño coeficiente de variación de 0.08 % valida la suposición de una densidad hidrodensitométrica de la MG de 0.9007 gr.cm^{-3}. Sin embargo, en el interés de la precisión científica, hay que hacer una pequeña advertencia. Los análisis precedentes fueron llevados a cabo principalmente con triglicéridos. Mientras que la combinación de colesterol (densidad = 1.067 gr.cnr^{3}) y fosfolípidos (densidad = 1.035 gr.cm') comprende sólo el 1 % de la grasa extractable por éter del tejido adiposo del conejo

(Méndez, Keys, Anderson, & Grande, 1960), cifras similares para la grasa extraída de los sistemas muscular y nervioso central de animales pueden tener un promedio tan elevado como 37 y 75 %, respectivamente (Méndez y cols., 1960). De cualquier modo, se ha estimado que los lípidos en el cerebro adulto, médula espinal, y nervios llegan solamente a 200-300 gr (Keys & Brozek, 1953), y Méndez y cols. (1960) han propuesto una cantidad similar para los lípidos musculares. Heymsfielc y cols. (1991) han propuesto concordantemente que los triglicéridos suman el 99 % de lípidos extractables por éter. Por lo tanto, el error en la densidad de la MG, probablemente, sea insignificante.

(b) Masa Magra

La presunción de una densidad de la MM de 1.1000 gr.cm^{-3} (Tabla 2 y Figura 1) está basada en la media para los análisis químicos de sólo tres cadáveres masculinos de 25, 35, y 46 años (Brozek y cols., 1963) pero sin embargo es aplicada independientemente de la edad, sexo, dote genética y entrenamiento de los sujetos. Este supuesto ha sido desafiado por muchos investigadores (Deurenberg, Weststrate, & van der Kooy, 1989; Haschke, Fomon, & Ziegler, 1981; Lohman, 1981; Womersley, Durnin, Boddy, & Mahaffy, 1976), ya que las personas con una densidad menor a 1.1000 gr.cm^{-3} tendrán un porcentaje sobreestimado de GC. Ejemplos típicos de individuos en esta categoría son los niños que tienen una hidratación de la MM mayor al 73.7 %, aquellas personas que están sobrehidratadas o edematosas, y los mayores, particularmente las mujeres, cuyos minerales óseos han sido depletados por la osteoporosis. Lo opuesto, se aplicará si la MM es mayor a 1.1000 gr.cm$^{-3,}$ como en el caso de las personas deshidratadas y aquellos con una proporción mayor a la normal de mineral óseo. Sir¡ (1956; 1961) reconoció esta limitación y estableció que la variabilidad biológica en la densidad de la MM resultaba en un error con un desvío standard de 3.8 % GC (~ 0.0084 gr.cm^{-3}) para la hidrodensitometría. Lohman (1981) formuló la hipótesis de que este error se reduce a 2.7 GC (~ 0.006 gr.cm^{--3}) para poblaciones específicas. Ninguna de las estimaciones precedentes incluye el pequeño error técnico asociado con la medición de la DC. A continuación, se presenta una valoración crítica de las densidades y porcentajes relativos de los cuatro compartimentos de la MM (Tabla 2):

- **AGUA** - La densidad del agua a distintas temperaturas, la cual se puede conseguir fácilmente en tablas científicas (Lentner, 1981, Tabla 50; Weast, 1975, Tabla F-5), está más allá de toda disputa.

  La literatura contiene los siguientes datos (media +/- DS: 72.0 +/- 3.7 %) para la hidratación de la MM de cinco cadáveres masculinos: 67.4 y 70.4 (Forbes & Lewis, 1956); 77.56 (Mitchell, Hamilton, Steggerda, & Bean, 1945); 72.1 (Shohl, 1939), y 72.62 % (Widdowson, McCance, & Spray, 1951). Si bien la media de 72.0 % puede utilizarse para estimar el % GC a través del modelo de dos compartimentos de dilución isotópica (Tabla 1), se debería observar la variabilidad. Además, algunos investigadores utilizan 73.72 % para la hidratación de la MM (Tabla 2). Quizás, los datos más válidos para la hidratación de la MM son los reportados «in vivo», usando modelos de varios compartimentos para el análisis de la composición corporal. La literatura contiene valores medios en el rango de 71.9-74.4 % (Baumgartner, Heymsfield, Lichtman, Wang, & Pierson, 1991; Friedl, deLuca, Marchitelli, & Vogel, 1992; Fuller, Jebb, Laskey, Coward, & Elia, 1992; Heymsfield y cols., 1989a; 1990; 1991) para hombres y mujeres adultos, pero las comparaciones entre estudios es difícil, debido a factores tales como distintos valores para el intercambio de hidrógeno no acuoso, y a la medición del VR en el aire, en oposición con la medición en el agua.

- **PROTEÍNAS -** Las densidades de la mayoría de las proteínas en el estado cristalino seco son cercanas a 1.27 gr.cm^{-3} (Haurowitz, 1963, p.119). Sin embargo, las proteínas son las principales sustancias: que se combinan con el agua en los seres humanos y la hidratación resultante está acompañada por una contracción de volumen, tanto del soluto como del solvente. Por lo tanto, el volumen específico disminuye hasta que la densidad es de 1.34 gr.cm^{-3} (Haurowitz, 1963, p.119), lo cual parece ser la mejor estimación disponible para la proteína hidratada en la célula viva. Pero se sabe que las proteínas difieren en densidad y colágeno, el cual se estima que compone el 25-30 % de la proteína corporal total (principalmente en hueso y piel), tiene una densidad media en seco de 1.36 gr.crri ^{3} (Hulmes & Miller, 1979). Por lo tanto, parece que la estimación de la densidad utilizada para

las proteínas es mucho más tenue que la utilizada para las grasas y el agua, para las cuales los coeficientes de expansión térmica también son conocidos.

Se estimó la masa de proteína cruda en los tres cadáveres (Tabla 2) a partir del nitrógeno corporal total (NCT), suponiendo que todo el nitrógeno está incorporado en las proteínas, la cual comprende 16 % de nitrógeno (proteínas = NCT x 6.25). Bajo circunstancias normales, > 99 % del NCT está incorporado en las proteínas (Heymsfield, Wang, & Withers, en prensa). Knight, Beddoe, Streat, y Hill (1986) han reportado cocientes de proteína/nitrógeno (P/N) de 5.80, 6.3, y 7.29 para el colágeno, actinomiosina, y albúmina, respectivamente. Sin embargo, los análisis químicos con dos personas que murieron de cáncer arrojaron cocientes corporales totales (media +/- DS, P medido 10 veces y N medido 20 veces) de 6.33 +/- 0.19 y 6.40 +/- 0.22. Ellos concluyeron que estos datos no brindaban una justificación para cambiar el cociente P/ N supuesto de 6.25. Los tres cadáveres resumidos en la Tabla 2 tenían 16.4, 19.5, y 23.4 % de proteínas en sus MM. Este rango tan grande, probablemente, se deba a diferencias en la masa músculo-esquelética, la cual es la única fuente más grande de proteínas. Es posible comparar los análisis cadavéricos precedentes (media = 19.8 % de proteínas en la MM) con datos recientes «in vivo», donde el total de proteínas corporales ha sido medido por análisis de activación neutrónica gamma (P = NCT x 6.25), el cual tiene una precisión de 2.7 % (Heymsfield y cols., 1991) y luego es expresado como porcentaje de la MM determinada por análisis de varios compartimentos. Cuatro estudios (Heymsfiled y cols., 1989x; 1989b; 1990; 1991) han reportado dicha información con hombres y mujeres adultos normales, en un amplio rango de edad. Mientras que todas las medias (19.5-20.8 %) fueron muy cercanas a las de los análisis cadavéricos clásicos, los valores individuales de 16.4-22.3 % resaltan la variabilidad biológica para este componente de la MM.

- **MINERAL OSEO -** La validez de las presunciones para las densidades de mineral óseo (MO) y mineral no óseo (MNO) también puede ser cuestionada. El anterior valor de 2.982 $gr.cm^{-1}$ está basado en la media de sólo cuatro muestras (Méndez y cols., 1960) aislada de los huesos largos de animales (tibia de la vaca a 36 gr C: 2.9930 y 3.0066 $gr.cm^{-3}$; fémur y tibia del perro a 36.7 gr C: 2.9624 y 2.9667 $gr.cm^{-3}$), pero Brozek y cols. (1963) verificaron posteriormente este valor contra el valor obtenido por estequiometría para el prototipo de mineral de hidroxi-apatita, luego de la tolerancia de la cristalización del agua y CO_2. Méndez y cols. (1960) también citaron un trabajo anterior de Dallemagne y Melon (1945), quienes reportaron densidades de minerales óseos y dentales de 2.99 y 3.01 $gr.cm^{-3}$, respectivamente. La Tabla 2 indica que el MO comprendía el 5.63 % de la MM para los tres cadáveres; sin embargo, el rango era de 4.69 a 6.36 % (Brozek y cols.,1963). El advenimiento de la absorciometría fotónica dual (DPA), y su sucesora, la absorciometría dual con Rayos X (DEXA), facilitaron la medición del MO "in vivo". Por lo tanto, ahora es posible comparar los datos cadavéricos precedentes con los recolectados «in vivo», en los casos en que se ha determinado también la composición corporal a través de métodos de varios compartimentos. Friedl y cols. (1992) reportaron valores más elevados (media +/- DS: 6.81 +/- 0.67 % MM) en 10 soldados, mientras que se observaron valores inferiores (Baumgartner y cols., 1991) en hombres (media +/- DS: 74.1 +/- 7.7 años, n = 35, 5.00 % MM) y mujeres (media +/- DS: 74.7 +/- 5.9 años, n = 63, 4.96 % MM) mayores. Doce jóvenes atletas varones de «endurance» altamente entrenados (media +/DS: 22.2 +/- 4.9 años) registraron valores bastante homogéneos (media +/- DS: 5.50 +/ - 0.28 % MM) con una media que se aproximaba a la de los tres cadáveres (Withers, Smith, Chatterton, Schultz, & Gaffney, 1992). Datos más heterogéneos (media +/- DS: 5.42 +/- 0.62 % MM) fueron obtenidos, en forma comprensible, en 14 hombres y mujeres que tenían un rango de edad entre 29 y 94 años Heymsfield y cols., 1989a). Las investigaciones precedentes enfatizan la variabilidad biológica en la fracción de MO de la MM.

- **MINERALES NO OSEOS (TEJIDO BLANDO) -** Los análisis cadavéricos clásicos suponían que todo el calcio estaba contenido dentro del hueso, y que estaba acompañado por las mismas cantidades de fósforo, sodio, y magnesio en forma de ceniza ósea (Brozek y

cols., 1963). Este parece una razonable presunción ya que el calcio extra-esquelético representa menos del 0.4 % del total de calcio corporal (Snyder, 1975). La densidad total de los restantes minerales extra-esqueléticos o MNO se calculaba, allá entonces, que era aproximadamente de 3.317 gr.crn i (Brozek y cols., 1963). Es posible estimar los MNO «in vivo» midiendo: el total de calcio corporal, sodio, y cloruro a través del análisis de activación neutrónica gamma, el calcio óseo a partir de la absorciometría dual con Rayos X, y el potasio corporal total mediante conteo de la radiación gamma emitida por el ^{40}K. Sin embargo, los datos publicados (Heymsfield y cols., 1989a; 1989b; 1990; 1991) dan respaldo a porcentajes mucho menores de la MM (0.80 - 0.90 %) que el 1.24 % MM, reportado para los tres cadáveres (Brozek y col., 1963). Estas discrepancias están probablemente relacionadas con las distintas presunciones formuladas para las mediciones «in vitro» e <4n vivo, Un desvío standard (le 0.051 % MM (media = 0.821 % MM), en 14 hombres y mujeres en el rango de edad de 24-94 años, indica la variabilidad biológica de los MNO en los adultos sanos (Heymsfielcl y cols., 1989a). Sin embargo, a pesar de su elevada densidad, los MNO representan una fracción tan pequeña de la MM que su impacto sobre la densidad total de la MM también es mínimo.

1.3.2 Agua corporal total (ACT) a través de la dilución isotópica

Ya se discutió la variabilidad en la hidratación de la MM. Si la MM tiene una hidratación mayor que el 72 %, entonces el método del ACT de dos compartimentos subestimará el GC. Por ejemplo, una hidratación de la MM del 75.7 %, en un sujeto de 75 kg con un ACT de 45 kg, resultaría en una subestimación del 4.0 %. Sorprendentemente, lo contrario se aplica a la hidrodensitometría porque el aumento del agua disminuye la densidad de la MM. Otra consideración es que el tejido adiposo contiene cerca del 15 % de agua y 2 % de proteínas.

Esta agua está incluida en la MM ya que la MG es lípido extractable por éter, el que es anhidro. Por lo tanto, el contenido de agua del tejido magro es del 88 % (15/17 x 100) lo cual es más que la constante supuesta de hidratación de la MM del 72 %. Por lo tanto, las personas más obesas tendrían lógicamente una hidratación de la MM mayor al 72 %.

Existen además algunos problemas no resueltos asociados con la medición del ACT «in vivo». En primer lugar, algunos investigadores han comparado el espacio de dilución de isótopos (EDI) con el criterio de ACT medida por desecación. Este trabajo ha sido resumido por Schoeller y Jones (1987), quienes concluyeron que la mayoría de estas comparaciones indican que el E-DI sobreestima el ACT entre un 1 y 6 %. Esto se debe principalmente al intercambio de los isótopos con los constituyentes corporales no acuosos (Culebras & Moore, 1977; Schoeller y cols., 1980). Sin embargo, los errores en la técnica de dilución pueden suceder a partir de una pérdida de isótopos y consecuente sobreestimación del ACT, mientras que los errores en el método de criterio de desecación son causados por secado incompleto, y consecuente subestimación del ACT. Por lo tanto, estos errores opuestos tenderían a acentuar las diferencias entre el ACT a través de la dilución isotópica y de la desecación. Sin embargo, el uso simultáneo de deuterio y $H_2\ ^{18}0$ en seres humanos lleva a un EDI del 3-5 % mayor para el primer método (Schoeller y cols., 1980; Wong y cols., 1988). Además, se ha demostrado que el EDI a través del $H_2\ ^{18}O$ es de 0.4 a 2.1 % mayor que el ACT a partir de la desecación (Lifson, Gordon, & McClintock, 1955; Nagy, 1980; Whyte, Bayley, & Schwarcz, 1985), y los cálculos teóricos respaldan una sobreestimación de aproximadamente 1 % del ACT a través del $H_2\ ^{18}0$ (Schoeller y cols., 1980). Por lo tanto, Schoeller y Jones (1987) concluyeron que los espacios de dilución de $H_2\ ^{18}O$ y $^{2}H_2\ 0$ son de 1 +/- 1 (media +/- DS) y 4 +/- 1 % mayores, respectivamente, que el ACT. Mientras que estas recomendaciones han sido adoptadas por muchos investigadores, algunos utilizan un factor de corrección del 2 % para el ACT a través de la dilución de deuterio (Friedl y cols., 1992; Hewitt, Going, Williams, & Lohman, 1993). Sin embargo, si uno acepta que el EDI de $H_2\ ^{18}0$ sobreestima el ACT en un 1 %, entonces la recomendación de Schoeller y Jones (1987) para estimar el ACT a partir de la dilución de deuterio está respaldada consecuentemente por Coward (1990), quien indicó que los cocientes del EDI ($^{2}H_20/H_2\ ^{18}0$) estuvieron estrechamente enclaustrados alrededor de una media de 1.03, en 9 estudios diferentes, llevados a cabo por la Unidad de Nutrición Dunn de la Universidad de Cambridge. Otro problema metodológico es que el EDI cambia continuamente, ya que mientras el isótopo se está equilibrando con el «pool» de agua corporal, se está continuamente eliminando de él. Las rutas de pérdida de isótopos y entrada de agua han sido cuantificadas por Schoeller, Kushner, Taylor, Dietz, & Bandini (1985). En la práctica, la mayoría de los investigadores sólo hacen

compensación del trazador eliminado en la orina e ignoran la pérdida insensible de trazador. Los problemas finales se refieren al fraccionamiento isotópico de las muestras y a la variabilidad inter-individual en el tiempo que toma el trazador para equilibrarse con el «pool» de agua corporal, si se utiliza el método de «plateau» (Wong y cols., 1988).

1.3.3 Potasio corporal total (KCT)

La conversión de KCT a MM está basada en la presunción de que la MM contiene 68.1 mmol de $K.kg^{-1}$ (Forbes, Gallup, & Hursh, 1961), que es la media para cuatro análisis cadavéricos. Por lo tanto, al igual que los dos modelos anteriores de dos compartimentos, esta suposición ignora la variabilidad biológica. La MM de sujetos muy musculados podría obviamente ser sobreestimada porque el músculo esquelético contiene 78-90 nmiol K.kg' (Forbes, 1987, pag. 39). De cualquier modo, la medición del KCT «per se» es utilizada en otros modelos que serán discutidos más adelante, en este capítulo.

1.4 Resumen

Por lo tanto, podría concluirse que la mayor parte del error asociado con estos tres modelos de dos compartimentos recae, no tanto en la precisión técnica de las mediciones, sino en la variabilidad biológica o inter-individual, lo cual es una seria amenaza para la validez de las presunciones previamente señaladas. Este último punto está destacado en los análisis de error contenidos en la Tabla 3. Está claro que la variación en la composición de la MM puede causar considerables errores individuales en los modelos de dos compartimentos cuando los sujetos se encuentran en los extremos de la población adulta. Sin embargo, los errores para las medias grupales serán mucho menores que los estipulados en la Tabla 3. Por ejemplo, la media hidrodensitométrica (en el modelo de dos compartimentos) de 15.3 % (DS = 6.7 % GC), para los 29 sujetos (cuyos datos están graficados más adelante, en este capítulo) fue 2.9 % GC menor que la de 18.2 % GC (DS = 6.3 % GC) del modelo de criterio de cuatro compartimentos (ver sección 3.2.1), el cual controla la variabilidad inter-individual en el ACT ; y el MO. Un problema agregado con los modelos de composición corporal de dos s compartimentos ocurre cuando la MG es la variable de interés. En este caso, los errores biológicos y de medición para el componente mayor de MM (MM determinada por dilución isotópica, o por KCT) se propagan al componente menor del modelo, que es la MG, la cual se calcula por sustracción. Por lo tanto, un error del 3 % para la MM (supongamos: peso = 80 - kg: MM = 68 kg; MG = 12 kg) se traslada a un error del 17 % para la MG.

		Modelo de dos compartimentos		Modelo de3 comp.(d)	Modelo de4 comp. (d)
Cambio en % MM para	**límites de confianza del 95% (b)**	**Hidrodensitometría**	**agua corporal total**		
AGUA	+1.02 0 -3..92	+6.22 0 -6.00	-4.52 0 +4.52	0 0 0	0 0 0
PROTEINA	+3.90 0 -3.90	-3.22 0 +3.45	+4.12 0 -4.12	+0.97 0 -0.92	+0.30 0 -0.26
MINERAL OSEO	+1.35 0 -1.35	-3.36 0 +3.58	+1.21 0 -1.21	-0.75 0 +0.80	0 0 0
MINERALES NO OSEOS	+0.11 0 -0.11	-0.17 0 +0.40	+0.09 0 0.09	-0.05 0 +0.09	-0.08 0 +0.12

TABLA 3. *Errores (a) en la estimación de la grasa corporal relativa para un sujeto masculino (15 % GC), cuando el componente de la MM aumenta (b), o disminuye (b), mientras las cantidades absolutas (kg) de grasa y MM permanecen constantes (c).*

(a). Una densidad de 1.064682 $gr.cm^{-3}$ resulta en un 15 % GC, usando la ecuación de Brozek y cols. (1963). Sin embargo, el aumento en la hidratación de la MM de 73.72 % a 77.64 % disminuye la MM, y las densidades corporales totales a 1.082482 y 1.050675 gr.cm-3, respectivamente. La hidrodensitometría convencional arroja una GC del 21.22 %, lo cual es 6.22 % superior que el valor real de 15. % GC.

(b). Estos aumentos y disminuciones en el % GC representan los límites de confianza del 95 % para mediciones «in vivo», en 13 hombres y mujeres con un rango de edad entre 24 y 94 años (Heymsfield y cols., 1 989a). Este rango, presumiblemente, abarca el 95 % de la variabilidad en la población adulta.

(c). Por lo tanto, si aumenta el ACT, entonces los otros tres compartimentos de la MM disminuyen proporcionalmente, para mantener una MM del 85 % del peso corporal.

(d). Los modelos de tres y cuatro compartimentos son derivados más adelante en este capítulo.

2. MODELOS DE TRES COMPARTIMENTOS

2.1 Introducción

Cada uno de los modelos de tres compartimentos, presentados en esta Sección, controlan la variabilidad biológica de un componente de MM. El peso y el volumen del componente medido «in vivo» se restan luego del peso y volumen (peso/densidad) de todo el cuerpo. El resto es luego repartido en dos compartimentos (MG y otro)», de densidades conocidas o supuestas.

2.2 Los modelos

2.2.1 Siri

La MM comprende: agua, proteínas, MO y MNO (Figura 1). La Tabla 2 indica que el agua tiene un impacto significativo sobre la densidad (le la MM porque tiene la densidad mas baja', pero comprende por lejos la mayor fracción de cualquiera de los cuatro compartimentos. Además, la hidratación de la MM es variable. Siri (1961) identificó la variación en la hidratación de la MM (DS = 2 % del peso corporal) como la mayor fuente de error en el modelo hidrodensitométrico de dos compartimentos. En consecuencia, Siri propuso un modelo de tres compartimentos (MG, agua, sólidos secos libres de grasa, o magros) el cual estaba basado en mediciones tanto de la DC; como del ACT. Este modelo se muestra en la Figura 1, y nuestra fórmula modificada está derivada en la Figura 5.

EI modelo original utilizaba densidades de MG y sólidos secos magros de 0.9000 y 1.565; $gr.cm^{-3}$ respectivamente. Nosotros hemos utilizado el valor previamente justificado de 0.9007 $gr.cm^{-3}$ para la densidad de la MG (a 36 gr C) y nuestra densidad de 1.569 $gr.cm^{-3}$ para sólidos magros supone un cociente minerales/proteínas de 0.354, el cual corresponde exactamente al de la media de los tres cadáveres analizados en la Tabla 2. Siri (1961) alegó que el error total para este modelo podía reducirse solamente si el desvío standard para el cociente total de minerales/proteínas era < 0.1. Mediciones en vivo en 31 hombres y mujeres (media +/- DS: 58 +/- 20 años) llevadas a cabo por Heymsfield y cols. (1990) demostraron posteriormente que el cociente minerales/proteínas es de 0.33 +/- 0.08. Por lo tanto, el error podría ser algo menor que el pensarlo originalmente por Siri (1961). El sugirió que el desvío standard del error para el modelo hidrodensitométrico de dos compartimentos de 1.0 % GC, que se debe a una combinación de variabilidad biológica en la densidad de la MM con el error técnico, se reduciría a 2 % GC para su modelo de tres compartimentos, si el error para la medición del ACT' fuera del 2 % del peso corporal. La reducción del último error a 1 % del peso disminuiría el desvío standard para el error total a 1.5 % CC. Sin embargo, pocos investigadores han utilizado este modelo que no está influenciado por una hidratación normal. Un problema menor con este modelo y con el hidrodensitométrico es que ignoran el componente de glucógeno, que presumiblemente no fue considerado en los análisis cadavéricos debido a la cantidad relativamente pequeña (~ 300-500 gr o ~ 1 % MM), y a la rápida autólisis post-mortem. Mientras que ahora se pueden estimar las reservas glucogénicas en vivo, usando espectroscopía con resonancia magnética nuclear ^{13}C su densidad (glucosa = 1.562 $gr.cm^{-3}$; Weast, 1975, C-311) es similar a la de las proteínas y los magros sólidos. Además, la mayoría de las mediciones de composición corporal se llevan a cabo temprano en la mañana, cuando el sujeto está en estado de post-absortivo, de manera que las reservas glucogénicas podrían ser lajas. Por lo tanto, cualquier error probablemente sea mínimo.

$$\frac{1}{DC} = \frac{MG}{{}_{densidad}MG} + \frac{{}^{b}A}{{}_{densidad}A} + \frac{SMS}{{}_{densidad}SMS}$$

$$MG = {}_{densidad}MG\left[\frac{1}{DC} - \frac{A}{{}_{densidad}A} - \left(\frac{1 - MG - A}{{}_{densidad}SMS}\right)\right]$$

$$MG = 0.9007\left[\frac{1}{DC} - \frac{A}{0.9937} - \left(\frac{1 - MG - A}{1.569}\right)\right]$$

$$MG = \frac{0.9007}{DC} - 0.906410\ A - 0.574060 + 0.574060\ MG + 0.574060\ W$$

$$0.425940\ MG = \frac{0.9007}{DC} - 0.332350\ A - 0.574060$$

$$MG = \frac{2.114617}{DC} - 0.780274\ A - 1.347749$$

$$\%\ MG\ o\ \%\ GC = \frac{211.5}{DC} - 78.0\ {}^{d}A - 134.8$$

***FIGURA 5**. Derivación del modelo de tres compartimentos (aMG, bACT, cSMS), para estimar la grasa corporal relativa- la partir de las mediciones de la DC[e] y ACT.*

Presunciones: *Densidad de la MG = 0.9007 gr.cm^{-3} a 36º C (Fidanza y cols.,(1953)*
Densidad del agua (A) = 0.9937 gr.cm^{-3} a 36º C (Lentner, 1981, 50;Weast, 1975, F-5)
Densidad de los sólidos magros secos (SMS) = 1.569 gr.cm-3 a 36º C (Brooke y cols., 1963)

Si el peso corporal (kg) es igual a la unidad (es decir, 1), y los tres compartimentos son representados como proporciones de tal manera que MG + A + SMS = 1.0, entonces la fórmula puede ser derivada simplemente como se muestra arriba, donde [a]MG = masa grasa; [b]ACT o A = agua corporal total; [c]SMS = sólidos magros secos; [d] = igual que la ecuación de Siri (1961), excepto los valores utilizados para «$_{densidad}$ MG» y «$_{densidad}$ SMS»; [e]DC = densidad corporal; Agua = Agua (kg)/peso corporal (kg).

El aumento en la validez alcanzado por la combinación de la DC y ACT (modelo de tres compartimentos), en oposición con la medición de la DC solamente (modelo de dos compartimentos) está señalado en la Figura 6, en la cual las diferencias en el % GC entre estos dos modelos están graficadas vs. los % GC a través del modelo de criterio de cuatro compartimentos, el cual se describe más adelante. Las desviaciones de la línea punteada horizontal (en el cero del eje de las Y en la Figura 6) representan los grandes errores (rango = -1.3 a 6.1 % GC) que ocurren cuando el evaluador no controla la variabilidad biológica en cl ACT, sino que en cambio supone que la hidratación de la MM es del 73.7 % (Tabla 2). La variabilidad de estos errores se debió al amplio rango de la hidratación de la MM, el cual, según indica la Figura 7, fue del 70.1 al 75.1 % (media +/- DS: 72.1 +/- 1.1 %). Esta cifra también muestra claramente una relación lineal negativa entre la hidratación de la MM y las diferencias entre los dos modelos. Esto es porque, siendo todas las otras cosas iguales, la densidad de la MM aumenta a medida que disminuye su hidratación, por debajo de la constante asumida por el PHS del 73.7 %, ya que el agua tiene la densidad más baja que cualquiera de los cuatro compartimentos de la MM. Por lo tanto, a medida que aumenta la densidad de la MM por encima de la constante supuesta de 1.1000 gr.cm-^{3}, mayor será el grado al cual el modelo de PHS de dos compartimentos subestimará el % GC. Lo opuesto ocurre a medida que aumenta la hidratación de la MM por encima del 73.7 %; esto se aplica a dos puntos de los datos en la Figura 7. No obstante la falta de independencia entre variables en ambos ejes de las Figuras 6 y 7, los datos indican que el modelo de tres compartimentos es más válido que el de dos compartimentos porque controla la variabilidad inter-individual en el ACT, la cual tiene la mayor proporción y la menor densidad de los cuatro componentes de la MM.

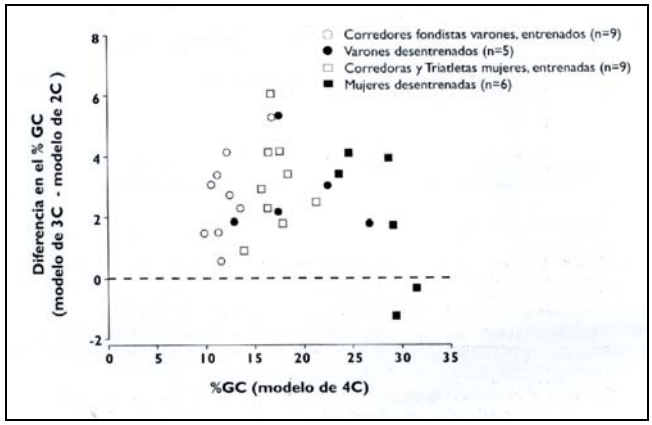


***FIGURA 6.** Diferencias en el % GC entre los modelos de 3 y 2 compartimentos (C), graficados vs. el %, CC a través del modelo de 4 compartimentos.*

Los datos en estos sujetos de 18-36 años (media +/- DS: 23 +/- 5 años) fueron recolectados en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio de la Universidad de Australia del Sur, y en el Departamento de Medicina Nuclear del Hospital Royal Adelaide.

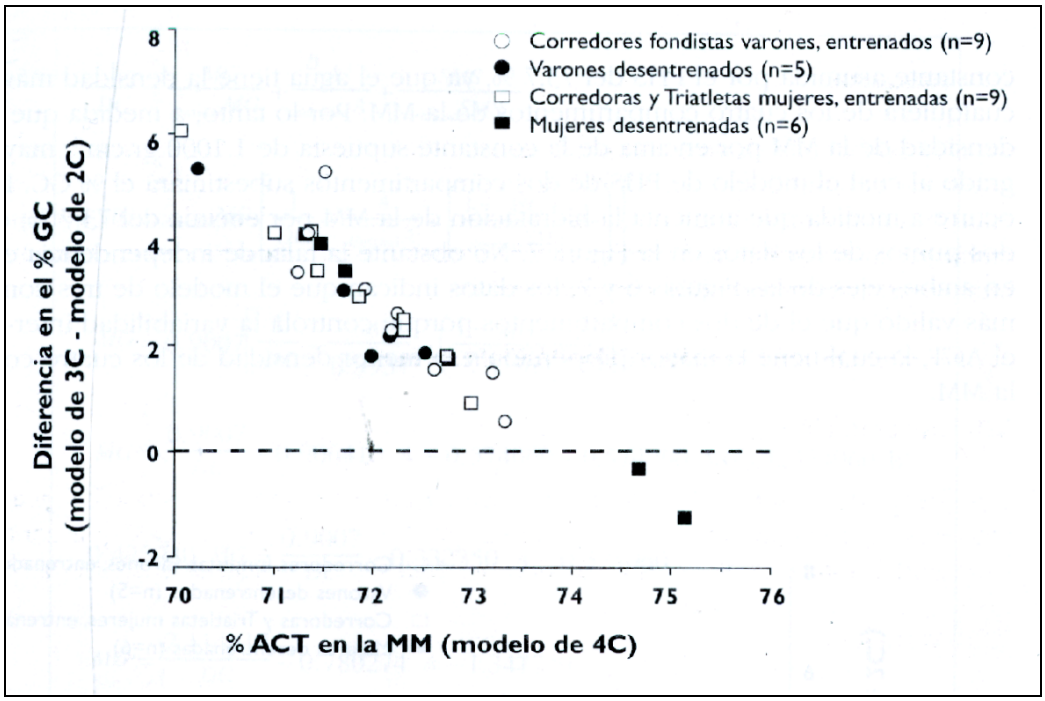


***FIGURA** 7. Diferencias en el % GC entre los modelos de 3 y 2 compartimentos (C), graficados vs. el %, de agua corporal total (ACT) en la MM, determinado a través del modelo de 4 compartimentos.*

Los datos en estos sujetos de 18-36 años (media +/- DS: 23 +/- 5 años) fueron recolectados en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio de la Universidad de Australia del Sur, y en el Departamento de Medicina Nuclear del Hospital Royal Adelaide.

2.2.2 Lohman

Lohman (1986) utilizó el mismo marco conceptual que Siri (1961; ver nuestra Figura 5) para derivar el siguiente modelo de tres compartimentos (grasa, minerales, [proteínas + agua]):

$$\%GC = \frac{638.6}{DC} + 396.1m - 609.0$$

donde, m = minerales, corlo una fracción del peso corporal

Este modelo asume densidades para la grasa, minerales, y [proteínas más agua]) de 0.9007, 3.037, y 1.0486 gr.cm^{-3}, respectivamente (Lohman, 1992, p.19). El investigador reconocía que, si bien la ecuación no es ideal para niños y Jóvenes, debido a los cambios conocidos en la proporción agua/proteínas durante el crecimiento, podría ser útil para los adultos y los sujetos mayores. La ventaja de este modelo sobre la hidrodensitometría de dos compartimentos es que tiene en cuenta la variabilidad biológica en los MO, los cuales componen ~ 5.6 % de la MM con una densidad relativamente elevada de 2.982 gr.cm^{-3}. Sin embargo, la discusión en la sección 3.2.1 demuestra que, para algunos grupos, se logra escasa precisión adicional midiendo los MO.

2.3 Resumen

La ecuación de Siri de tres compartimentos (1961) parece ser la más lógica para utilizar, ya que tiene en cuenta la variabilidad biológica en el ACT. Los análisis de error en la Tabla 3 enfatizan concordantemente su superioridad sobre los modelos de dos compartimentos. Sin embargo, la ecuación de Lohman (1986) constituye una mejoría sobre el modelo hidrodensitométrico de dos compartimentos.

3. MODELOS DE CUATRO COMPARTIMENTOS

3.1 Introducción

Los dos modelos siguientes, de cuatro compartimentos, son extensiones lógicas de los modelos de tres compartimentos previamente discutidos, en cuanto a que controlan la variabilidad inter-individual en más de uno de los cuatro componentes de la MM.

3.2 Modelos

3.2.1 Modelo 1

El advenimiento de la DPA, y su sucesora la DEXA, dio un impulso a la investigación en composición corporal porque permitieron medir la masa de mineral óseo «in vivo». Esta técnica está descripta en a literatura (Mazess, Peppler, & Gibbons, 1984; Mazess, Barden, Bisele, & Hanson, 1990). La tecnología actual expone al sujeto a menos de la quinta parte (0.3 µSv) de la radiación diaria (~ 2 µSv). El contenido ele mineral óseo (CMO) medido por DEXA representa ceniza de hueso (Frield y cols., 1992). Méndez y cols. (1960) han reportado que un gramo de mineral óseo lleva a 0.9582 gr de ceniza, porque los compartimentos lábiles, tales como H_2 O y CO_2, se pierden durante el calentamiento a más de 500 gr C (Heymsfield y cols., 1989b). El CMO necesita, por lo tanto, ser convertido a MO aumentándolo un 4.36% (Brozek y cols., 1963; Heymsfield y cols., 1989a; 1989b). Las series de mediciones para confiabilidad para MO (utilizando DEXA), llevadas a cabo en el Departamento de Medicina Nuclear del Hospital Royal Adelaide en un grupo de seis sujetos, produjeron un coeficiente de correlación intraclase de 0.998 y un ETM de 25 gr o 0.9 % (Figura 8).

Por lo tanto, es posible proponer un modelo de cuatro compartimentos (grasa, agua, MO, masa residual), el cual está basado en las mediciones de la DC, ACT, y MO. En este modelo, los pesos y los volúmenes para el agua y el MO son sustraídos del peso y del volumen (peso/ densidad) de todo el cuerpo permitiendo, por lo tanto, que el resto sea dividido en dos compartimentos (MG y masa residual), de densidades conocidas o presuntas. Este modelo está presentado en la Figura 1 y la fórmula está derivada en la Figura 9.

Modelos similares de cuatro compartimentos han sido propuestos por otros investigadores (Baumgartner y cols., 1991; Friedl y cols., 1992; Fuller, Jeb, Laskey, Coward, & Elia, 1992; Heymsfield y cols., 1990; Lohman, 1986), quienes también midieron la DC, el ACT, y el MO. La mayoría de estos científicos estimaron los MNO a partir del cociente entre esta variable y los MO para los análisis cadavéricos clásicos (Tabla 2), para arribar a un valor total de minerales corporales; y luego dividieron el resto en masa grasa y proteínas. Sin embargo, Friedl y cols. (1992) utilizaron un componente residual (principalmente proteínas, algo de minerales no óseos, algo de glucógeno) con una densidad de 1.39 gr.cm-^{3,} el cual estuvo basado en mediciones reales llevadas a cabo por Allen, Krzywicki, y Roberts (1959) en muestras en animales y tejido humano a 15 y 37 gr C. La densidad combinada de proteínas y MNO para los datos en la Tabla 2 también es de 1.39 gr.cm-$^{3.}$ Sin embargo, nosotros preferimos, en cambio, basar nuestra densidad residual en las 364 muestras de tejido que fueron medidas a 37 gr C (Allen y cols., 1959). Estos datos arrojan una densidad residual de 1.404 gr.cm-$^{3.}$ La densidad levemente superior de este componente libre de grasa y hueso, en comparación con la de la combinación entre proteínas y MNO en la Tabla 2, podría deberse al pequeño componente glucogénico (glucosa = 1.562 gr.cm-^{3}; Weast, 1975, C-311).

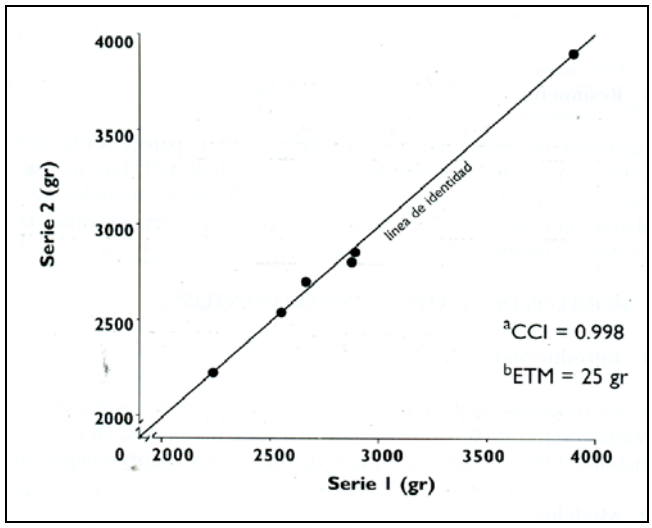


FIGURA 8. *Datos de confiabilidad (n= 6) para la medición de mineral óseo, a través de la absorciofnetría de doble energía por Rayos X.*

[a]CCI = coeficiente de correlación intraclase; [b]ETM = error técnico de medición.

Los modelos de tres y cuatro compartimentos son, en teoría, más válidos que los de dos compartimentos porque están asociados con un menor error, cuando las proporciones de agua, proteínas, y minerales en la MM varían de las indicadas en la Tabla 2. Sin embargo, cuando las diferencias en el % GC entre los modelos de cuatro y tres compartimentos están graficadas vs. el % GC surgido del modelo de criterio de cuatro compartimentos (Figura 10), las desviaciones individuales del cero son muy pequeñas (rango = -0.4 a 0.8 % GC). Estas diferencias con respecto al cero representan el error remanente, luego del control de la variabilidad inter-individual en el ACT, pero no en los MO. Claramente, se logra poca precisión adicional midiendo los MO. Los diferentes efectos en el control de la variabilidad biológica en el ACT y MO (comparar las Figuras 6 y 10) se deben principalmente al cociente total MO/MM (%) de 5.92 % (DS = 0.48 %), siendo mucho más cercano al valor

cadavérico clásico de 5.63 % que a los correspondientes valores de 72.1 +/- 1.1 % y 73.72 %, respectivamente, para la hidratación de la MM. Una consideración secundaria es que la variabilidad, como un % MM, es mayor para el ACT (DS = 1.1 % MM) que para el MO (DS = 0.48%).

$$\frac{1}{DC} = \frac{MG}{{}_{densidad}MG} + \frac{{}^{b}A}{{}_{densidad}A} + \frac{MO}{{}_{densidad}MO} + \frac{R}{{}_{densidad}R}$$

$$MG = {}_{densidad}MG\left[\frac{1}{DC} - \frac{A}{{}_{densidad}A} - \frac{MO}{{}_{densidad}MO} - \left(\frac{1 - MG - A - MO}{{}_{densidad}R}\right)\right]$$

$$MG = 0.9007\left[\frac{1}{DC} - \frac{A}{0.9937} - \frac{MO}{2.982} - \left(\frac{1 - MG - A - MO}{1.404}\right)\right]$$

$$MG = \frac{0.9007}{DC} - 0.906410\ A - 0.302046\ MO - 0.641524 + 0.641524\ MG$$

$$+ 0.641524\ A + 0.641524\ MO$$

$$0.358476\ MG = \frac{0.9007}{DC} - 0.264886\ A + 0.339478\ MO - 0.641524$$

$$MG = \frac{2.512581}{DC} - 0.738923\ A + 0.947003\ MO - 1.789587$$

$$\%\ MG\ \ o\ \ \%\ GC = \frac{251.3}{DC} - 73.9\ {}^{g}A + 94.7\ {}^{h}MO - 179.0$$

FIGURA 9. *Derivación del modelo de cuatro compartimentos ([a]MG, [b]ACT, [c]MO, [d]R), para estimar la grasa corporal relativa a partir de las mediciones de la DCe, ACT, y MO.*

Presunciones: Densidad de la MG = 0.9007 gr.cm^{-3} a 36º C (Fidanza y cols.,(1953).
Densidad del agua (A) = 0.9937 gr.cm-3 a 36º C (Lentner, 1981, 50; Weast, 1975, F-5)
Densidad del mineral óseo (MO) = 2.982 gr.cm^{-3} (Méndez y cols., 1960)
Densidad (f) de la masa residual (R) = 1.404 gr.cm^{-3} (Allen y cols., 1959).

Si el peso corporal (kg) es igual a la unidad (es decir, 1), y los cuatro compartimentos son representados como proposiciones, de tal modo que MG + A + MO + R = 1.0, entonces la fórmula puede ser derivada simplemente como se muestra arriba, donde [a]MG = masa grasa; [b]ACT o A = agua corporal total; [c]MO = mineral óseo; [d]R = masa residual; [e]DC= densidad corporal; media de peso calculada por Al len y cols. (1959), en muestras a 37º C; [g]A = Agua (kg)/masa corporal (kg); [b]MO = CMO a partir de DEXA x 1.0436 (kg)/masa corporal (kg).

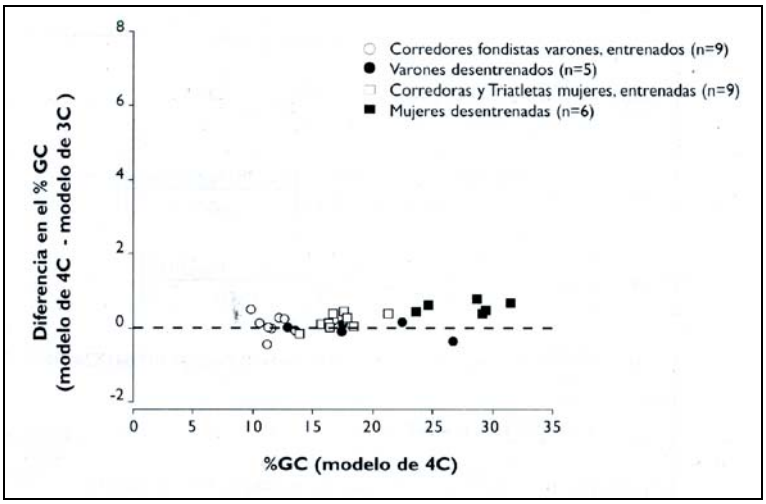


FIGURA 10. *Diferencias en el % GC entre los modelos de 4 y 3 Compartimentos (C), graficados vs. el % GC, determinado a través del modelo de 4 compartimentos. Los datos en estos sujetos de 18-36 años (media +/- DS: 23 +/- 5 años) fueron recolectados en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio de la Universidad de Australia del Sur, y en el Departamento de Medicina Nuclear del Hospital Royal Adelaide.*

3.2.2 Modelo 2

Este modelo está presentado en la Figura 1. Cohn y colaboradores (Cohn, Vaswani, Yasumura, Yuen, & Ellis, 1984) en el Laboratorio Nacional Brookhaven, fueron de los primeros en desarrollar el modelo 2, el cual posteriormente fue mejorado por Heymsfield y cols. (1990). Tres compartimentos (ACT, proteínas, combinación de MO y MNO) de la MM, mostrados en el análisis cadavérico clásico de la Figura 1, son medidos y luego sustraídos del peso corporal para llegar a la MG:

- ACT - determinada por dilución de tritio ($^3H_2,O$) utilizando los mismos principios anteriormente señalados para la dilución de deuterio (^2H_2O). Este trazador expone a los sujetos a una dosis de radiación de 120 µSv (Heymsfield y cols., 1991).
- Proteínas - se mide el nitrógeno corporal total a través del análisis de la activación neutrónica gamma (exposición a la radiación = 260 µSv; Heymsfield & Waki, 1991). Como se explicó previamente, las proteínas se estiman suponiendo un cociente P/N de 6.25.
- Total de minerales corporales - el total de calcio corporal, sodio y cloruro es determinado por análisis de activación neutrónica gamma demorada, el cual produce una exposición total a la radiación de 2.500

Por lo tanto, el modelo 2 supone la exposición del sujeto a una radiación considerablemente mayor que el modelo 1 (2800 µSv vs. 0.3 µSv). Además, está mucho menos disponible a nivel mundial, y es más complejo y más costoso de implementar.

3.3 Resumen

Los modelos químicos de cuatro compartimentos para el análisis de la composición corporal son teóricamente más válidos que los de tres compartimentos, debido a su control adicional sobre la variabilidad biológica de los compartimentos de la MM. Esto se señala en el análisis de error teórico de estos modelos, en la Tabla 3. Claramente, gran parte del aumento en la validez resulta de pasar del modelo de dos compartimentos al de tres. La medición adicional del MO sólo aporta un pequeño incremento en la precisión. Si bien las proporciones «in vivo» de dos o más componentes de la MM pueden diferir simultáneamente de las proporciones de los análisis cadavéricos clásicos (Tabla 2), un modelo simple ha sido adoptado por la Tabla 3, en el cual cada componente difiere independientemente de los otros tres. En conclusión, existe la duda si el control adicional resultante sobre la variabilidad biológica de la MM podría ser compensado por la propagación del error de medición, asociado con las determinaciones de la DC, ACT, y MO.

Este error total o propagado puede ser calculado suponiendo que los cuadrados de los errores o las variancias del error (error standard de la estimación^2 [SEE^2] o ETM ^{2}) son independientes y aditivos:

DS del error total = $\sqrt{SEE^2{}_a + SEE^2{}_b + SEE^2{}_c}$ o, $\sqrt{ETM^2{}_a + ETM^2{}_b + ETM^2{}_c}$

donde:

a = cálculo del % GC, a partir de la DC
b = cálculo del % GC, a partir del ACT
c = efecto del mineral óseo sobre el % GC

Los datos de confiabilidad test-retest recolectados en nuestro laboratorio arrojaron desvíos standard, para el error propagado o total, de 0.9 y 0.6 % GC para el SEE y ETM, respectivamente. El SEE incluye tanto la variancia de error entre sujetos corno intra-sujeto, mientras que el ETM, definido como el error standard de una medición única (Dahlberg, 1940: pp. 122-132), considera sólo el último. Por lo tanto, el desvío standard para el error total vía el ETM < SEE. De cualquier modo, estos errores son mucho menores que el ocasionado por la variabilidad biológica en la densidad de la MM (DS = 3.8 % GC) cuando la composición corporal es estimada a través del método hidrodensitométrico de los compartimientos (Siri, 1956; 1961). Nuestros errores propagados pueden bien representar el límite técnico de precisión para la estimación de la composición corporal a través del método indirecto de cuatro compartimentos. Sin embargo, si bien se puede confiar en los valores utilizados para las densidades del agua y grasa extraída químicamente, habrá algunos errores no contabilizados, debido a las presunciones en el modelo de cuatro compartimentos, tales como las densidades de las proteínas, MO, y MNO, la validez de las mediciones del CMO, y el uso del factor de corrección de 4 % para el intercambio de hidrógeno no acuoso, cuando se estima el ACT a través de la dilución de deuterio.

4. MODELOS MAS COMPLEJOS Y DESARROLLOS FUTUROS

Han surgido modelos químicos más sofisticados de cinco compartimentos (Ryde, Birks, Morgan, Evans, & Dutton, 1993) y del carbono corporal total (CCT; Heymsfield y cols., 1991). El último método es digno de mencionar ya que actualmente representa lo más moderno en el análisis de la composición corporal. Este método está basado en la observación de que el carbono corporal está incorporado en los cuatro compartimentos en el nivel molecular: grasas, proteínas, glucógeno, y MO. El método del CCT fue derivado de los siguientes cuatro modelos simultáneos, donde todas las unidades están en kilogramos:

(1) CCT = 0.77 x grasa + 0.532 x proteínas + 0.444 x glucógeno + carbono en MO

(2) NCT = 0.16 x proteínas

(3) Glucógeno = 0.044 x proteínas

(4) Carbono en MO = 0.05 x CGT a

Las ecuaciones simultáneas pueden ser resueltas:

(5) grasa = 1.30 x CCT - 4.45 x NCT – 0.06 x CCT a

En la ecuación 5, CCT, CCT a, y NCT son el carbono, el calcio, y el nitrógeno corporal total, los cuales son medidos por escaneo inelástico, análisis de activación neutrónica gamma demorado y rápido, respectivamente. El método del CCT tiene dos características intrínsecas: está basado en modelos altamente estables que no están afectados (en un grado apreciable) por la edad, el sexo, o las características étnicas, y brinda estimaciones de la adiposidad que son independientes cíe los métodos clásicos de dos compartimentos. Si bien el error propagado del método del M' para la medición de la grasa corporal es de 3.4-4.0 %, los investigadores (Heymsfield y cols., 1991) apuntan a desarrollar el método hacia un nivel de - precisión igual, o superior, a los análisis químicos directos de cadáveres. Por lo tanto, aunque el método del CCT no es utilizado ampliamente, debido a la necesidad de contar con tres sistemas de activación neutrónica, es importante en el estudio total de la composición corporal del ser humano.
También se están introduciendo nuevas tecnologías poderosas que prometen expandir las posibilidades de medición de variables hasta ahora no evaluadas, tales como el músculo esquelético y el glucógeno. Por lo tanto, el estudio de la composición corporal ofrece un amplio potencial para la investigación futura.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Allen, TH., Krzywicki, H.J., & Roberts, J.E. (1959).
Density, fat, water and solids in freshly isolated tissues.
Journal of Applied Physiology, 14, 1005-1008.

Baumgartner, R.N., Heymsfield, S.B., Lichtman, S., Wang, J., & Pierson, R.N. (1991).
Body composition in elderly people: effect of criterion estimates on predictive equations.
American journal of Clinical Nutrition, 53, 1345-1353.

Brozek, J., Grande, F., Anderson, J.T., & Keys, A. (1963).
Densitometric analysis of body composition: revision of some quantitative assumptions.
Is of the NewYork Academy of Sciences, 110, 113-140.

Burton, A.C. (1935).
Human calorimetry II.The average temperature of the tissues of the body.
Journal of Nutrition, 9, 261-279.

Buskirk, E. R. (1961).
I It inderwater weighing and body density: a review of procedures.
In j Brozek & A. Henschel (Eds.), **Techniques for measuring body composition**
(pp 90-106).
Washington DC: National Academy of Sciences - National Research Council.

Cohn, S.H .Vaswani,A.N.,Yasumura, S.,Yuen, M.S., & Ellis, K.J. (1984).
Improved models for determination of body fat *by in vivo* neutron activation.
American journal of Clinical Nutrition, 40, 255-259.

Coward A. (1990).
Calculation of pool sizes and flux rates.
In A. M. Prentice (Ed.), **The doubly-labelled water method for measuring energy expendinditure** (pp. 48-68). Vienna: International Atomic Energy Agency.

Culebras, J.M., & Moore, F.D. (1977).
Total body water and the exchangeable hydrogen. I. Theoretical calculation of nonaqueous exchangeable hydrogen in man.
American journal of Physiology (Regulatory, Integrative and Comparative Physiology), 232, R54-R59.

Dahlberg, G. (1940).
Statistical methods for medical and biological students.
London: George Allen and Unwin Ltd.

Dallemagne, M.J., & Melon, J. (1945).
Le poids spécifique et I'indice de réfraction de Vos, de I'émail, de la dentine et du cément.
Bulletin de la Société de chimie biologique, 27, 85-89**.**

Deurenberg, P. Weststrate, J.A., & van der Kooy, K. (1989).
Is an adaptation of Siri's formula for the calculation of body fat percentage from body density in the elderly necessary?
European Journal of Clinical Nutrition, 43, 559-568.

Fidanza. F., Keys, A.. & Anderson, J.T. (1953).
Density of body fat in man and other mammals.
Journal of Applied Physiology, 6, 252-256.

Forbes, G.B., & Lewis, A.M. (1956).
Total sodium, potassium and chloride in adult man.
Journal Clinical Investigation, 35, 596-600.

Forbes, G.B., Gallup, J., & Hursh, J.B. (1961).
Estimation of total body fat from potassium-40 content.
Science, 133, 101-102.

Forbes, G. B. (1987).
Human body composition: growth, aging, nutrition, and activity (p. 39).
New York: Springer-Verlag.

Friedl, K.E., DeLuca, J.P, Marchitelli, L. J., Vogel, J.A. (1992).
Reliability of body-fat estimations from a four-component model by using density, body water, and bone mineral measurements.
American Journal of Clinical Nutrition, 55, 764-770.

Fuller, N.J., Jebb, S.A., Laskey, M.A., Coward,W.A., & Elia, M. (1992).
Four-component model for the assessment of body composition in humans:
comparison with alternative methods, and evaluation of the density and hydration of fat-free mass.
Clinical Science, 82, 687-693.

Garrow, J.S.. Stalley, S., Diethelm, R., Pittett, P.H., Hesp, R., & Halliday, D. (1979).
A new method for measuring the body density of obese adults.
British Journal of Nutrition, 42,173-183.

Gundlach, J.S., & Visscher, G.J.W. (1986).
The plethysmographic measurement of total body volume.
Human Biology, 58, 783-799.

Haschke, F, Fomon, S.L., & Ziegler, E.E. (1981).
Body composition of a nine-year-old reference boy.
Pediatric Research, 15, 847-849.

Haurowitz, F (1963).
The chemistry and function of proteins (p. 119)
New York: Academic Press.

Hewitt, M.J., Going, S.B.,Williams, D.P, & Lohman,TG. (1993).
Hydration of the fat-free body mass in children and adults: implications for body composition assessment.
American Journal of Physiology (Endocrinology and Metabolism), 265, E88-E95.

Heymsfield, S.B., Wang, J., Kehayias, J., Heshka, S., Lichtman, S., & Pierson, R.N. (1989a).
Chemical determination of human body density *in vivo:* relevance to hydrodensitometry.
American Journal of Clinical Nutrition, 50, 1282-1289.

Heymsfield, S.B., Wang, J., Lichtman, S., Kamen, Y, Kehayias, J., & Pierson, R.N. (1989b).
Body composition in elderly subjects: a critical appraisal of clinical methodology.
American Journal of Clinical Nutrition, 50, 1167-1175.

Heymsfield, S.B., Lichtman, S., Baumgartner, R.N., Wang, J., Kamen, Y., Aliprantis, A., & Pierson, R.N. (1990).
Body composition of humans: comparison of two improved four-compartment models that differ in expense, technical complexity, and radiation exposure.
American Journal of Clinical Nutrition, 52, 52-58.

Heymsfield, S.B.,Waki, M., Kehayias, J., Lichtman, S., Dilmanian, FA., Kamen, Y., Wang, J., & Pierson, R.N. (1991). Chemical and elemental analysis of humans in *vivo* using improved body composition models.
American Journal of Physiology (Endocrinology and Metabolism), 261, E190E198.

Heymsfield, S.B., & Waki, M. (1991).
Body composition in humans: advances in the development of multicompartment chemical models.
Nutrition Reviews, 49, 97-108.

Heymsfield, S.B., Wang, Z.M., & Withers, R.T (in press).
Multicompartment molecular-level models of body composition analysis.
In A.F Roche, S.B. Heymsfield, & TG. Lohman (Eds.),
Human body composition. Champaign, IL: Human Kinetics.

Hulmes, D.J.S., & Miller, A. (1979).
Quasi-hexagonal molecular packing in collagen fibrils.
Nature (London), 282, 878-880.

Keys, A., & Brozek, J. (1953).
Body fat in adult man.
Physiological Reviews, 33, 245-325.

Knight, G.S., Beddoe, A.H. Streat, S.J.; & Hill, G.L. (1986).
Body composition of two human cadavers by neutron activation and chemical analysis.
American Journal of Physiology (Endocrinology and Metabolism), 250, E 179-
E 185.

Lentner, C. (Ed.). (1981).
Geigy scientific tables: Vol. I. Units of measurement, body fluids, composition of the body, nutrition.
Basle: Ciba Geigy Ltd.

Lifson, N., Gordon, G.B., & McClintock, R. (1955).
Measurement of total carbon dioxide production by means of D_20^{18}.
Journal of Applied Physiology, 7, 704-710.

Lohman,TG. (1981).
Skinfolds and body density and their relation to body fatness: a review.
Human Biology, 53, 181-225.

Lohman,T.G. (1986).
Applicability of body composition techniques and constants for children and youths (1986).
In K.B. Pandolf (Ed.), **Exercise and Sport Sciences Reviews, Volume 14** (pp. 325-357).
New York: Macmillan Publishing Company.

Lohman,T.G. (1992).
Advances in body composition assessment.
Champaign, Illinois: Human Kinetics Publisher

Mazess, R.B., Peppler, WW., & Gibbons, M. (1984).
Total body composition by dual-photon (^{153}Gd) absorptiometry.
American Journal of Clinical Nutrition, 40, 834-839.

Mazess, R.B., Barden, H.S., Bisek, J.P, & Hanson, J. (1990).
Dual-energy X-ray absorptiometry for total body and regional bone-mineral and soft-tissue composition.
American Journal of Clinical Nutrition, 51, 1106-1112.

Méndez, J., Keys, A., Anderson, J.T., & Grande, F (1960).
Density of fat and bone mineral of the mammalian body.
Metabolism, 9,472-477.

Mitchell, H.H., Hamilton,TS., Steggerda, FR., & Bean, H.W. (1945).
The chemical composition of the adult human body and its bearing on the biochemistry of growth.
Journal of Biological Chemistry, 158, 625-637.

Nagy, K.A. (1980).
CO^2 production in animals: analysis of potential errors in the doubly labelled water method.
American Journal of Physiology (Regulatory, Integrative and Comparative Physiology),
238, R466-R473.

Ryde, S.J.S., Birks, J.L., Morgan, WD., Evans, C.J., & Dutton, J. (1993).
A five-compartment model of body composition of healthy subjects assessed using in *vivo*
neutron activation analysis.
European Journal of Clinical Nutrition, 47, 863-874.

Schoeller, D.A., van Santen, E., Peterson, D., Dietz, W., Jaspan, J., & Klein, RD. (1980).
Total body water measurements in humans with ^{18}0 and ^{2}H labelled water.
American Journal of Clinical Nutrition, 33, 2686-2693.

Schoeller, D.A., Kushner, R.F.,Taylor, R, Dietz, W.H., & Bandini, L. (1985).
Measurement of total body water: isotope dilution techniques.
In **Report of 6th Ross Conference on medical research: body composition assessments in youth and adults** (pp. 24-29).
Columbus, OH: Ross Laboratories.

Schoeller, D.A., & Jones, P.J.H. (1987).
Measurement of total body water by isotope dilution: a unified approach to calculations.
In K.J. Ellis, S.Yasumura &WD. Morgan (Eds.), **In vivo body composition studies** (pp. 13 1-137).
London: Institute of Physical Sciences in Medicine.

Shohl, A.T. (1939).
Mineral metabolism (pp. 13-21)
New York: Reinhold Publishing Corporation.

Siri, W.E. (1956)
The gross composition of the body.
In J.H. Lawrence & C.A.Tobias (Eds.), **Advances in biological and medical physics**

(pp. 239-280). New York: Academic Press Inc.

Siri, W.E. (1961).
Body composition from fluid spaces and density: analysis of methods.
In J. Brozek & A. Henschel (Eds.), **Techniques for measuring body composition**
(pp. 223-244).
Washington DC: National Academy of Sciences - National Research Council.

Snyder, W.S. (Chairman.) (1975).
Report of the Task Group on Reference Man.
New York: Pergamon Press.

Weast, R.C. (Ed.). (1975).
Handbook of chemistry and physics.
Cleveland: CRC Press.

Whyte, R.K., Bayley, H.S., & Schwarcz, H.P (1985).
The measurement of whole body water by H^2 ^{18}O dilution in newborn pigs.
American Journal of Clinical Nutrition, 41, 801-809.

Widdowson, E.M., McCance, R.A., & Spray, C.M. (1951).
The chemical composition of the human body.
Clinical Science, 10, 113-125.

Withers, R.T, & Hamdorf, PA. (1989).
Effect of immersion on lung capacities and volumes: implications for the densitometric estimation of relative body fat.
Journal of Sports Sciences, 7, 21-30.

Withers, R.T, Smith, D.A., Chatterton, B.E., Schultz, C.G., & Gaffney, R.D. (1992).
A comparison of four methods of estimating the body composition of male endurance athletes.
European Journal of Clinical Nutrition, 46, 773-784.

Womersley, J., Durnin, J.V.G.A., Boddy, K., & Mahaffy, M. (1976).
Influence of muscular development, obesity, and age on the fat-free mass of adults.
Journal of Applied Physiology, 41, 223-229.

Wong, W.W, Cochran, W.J., Klish, W.J., Smith, E.O., Lee, L.S., & Klein, PD. (1988).
In vivo isotope-fractionation factors and the measurement of deuterium- and oxygen- 18-dilution spaces from plasma, urine, saliva, respiratory water vapor, and carbon dioxide.
American Journal of Clinical Nutrition, 47, 1-6.