

# Análisis Teórico de la Presión Sanguínea Arterial Sistémica de los Mamíferos

## A Theoretical Analysis of Systemic Arterial Blood Pressure of Mammals

GABRIELA DIAZ, JUAN SAAD, MARIA SOLEDAD TASCÓN

Unidad de Fisiología, Facultad de Medicina Occidente, Universidad de Chile, Casilla 10455, Santiago, Chile

(Recibido el 14 de noviembre de 1979, y en versión corregida el 8 de abril de 1980)

DÍAZ, G., SAAD, J., TASCÓN, M.S. Análisis teórico de la presión sanguínea arterial sistémica de los mamíferos. (A theoretical analysis of systemic arterial blood pressure of mammals). *Arch. Biol. Med. Exp.* 13:259-264, 1980

The theoretical reduced exponent  $b$  calculated for the arterial pressure, in accordance with Huxley's allometric equation, is 0; however the experimental value has shown different figures. In this paper it is proposed that systemic arterial pressure with exponent zero is in accordance with that of those arteries found at a greater distance of the heart but above cardiac level.

We postulate that the cerebral arteries have an experimental exponent  $b = 0$ . We have calculated this exponent for the cephalic arterial pressure (arterial pressure at cardiac level minus hydrostatic pressure for cephalic level).

With this correction, we have found a better correlation between experimental and theoretical figures in accordance with the theory of biological similarities.

En el presente estudio se intenta dilucidar la causa de la discrepancia entre la teoría de similitudes biológicas (4, 6) y los valores experimentales de la presión arterial sistémica (Pas), expresados como ecuación alométrica.

En dicha ecuación alométrica:

$$y = aW^b \quad (1)$$

en que "y" es una función biológica cualquiera, "W" es el peso corporal del animal,  $a$  y  $b$  son parámetros, se observa que entre cualquier función y el peso corporal, existe una relación que puede ser lineal si  $b = 1.0$ , constante si  $b = 0$ , o bien, exponencial si  $b$  es diferente de 0 y de 1.

El exponente  $b$  puede determinarse tanto en forma teórica como a partir de resultados experimentales.

Como se ha dicho anteriormente, en el caso de la presión sanguínea arterial, el valor teóri-

co del exponente reducido  $b$  no coincide con el exponente  $b$  obtenido a partir de los datos experimentales. En el presente estudio se intenta explicar esta discrepancia utilizando datos de presiones arteriales obtenidos de la Fisiología Comparada de los mamíferos.

### MÉTODOS

#### a) Cálculo teórico del exponente $b$

Mediante el análisis dimensional (4, 6), es posible expresar magnitudes físicas como función potencia de la masa  $M$ , de la longitud  $L$ , y del tiempo  $T$ . Si "Q" es una función cualquiera:

$$Q = M^\alpha L^\beta T^\gamma \quad (2)$$

Cuando se comparan funciones homólogas, por ejemplo entre prototipo (p) y modelo (m), la expresión es:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \frac{M_p^\alpha L_p^\beta T_p^\gamma}{M_m^\alpha L_m^\beta T_m^\gamma} \quad (3)$$

Las razones entre masas  $\mu$ , longitudes  $\lambda$  y tiempos  $\tau$ , de prototipo y modelo, permite simplificar la expresión:

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \mu^\alpha \lambda^\beta \tau^\gamma \quad (4)$$

y la función en el prototipo resulta ser:

$$Q_p = Q_m \mu^\alpha \lambda^\beta \tau^\gamma \quad (5)$$

Según los postulados de la similitud biológica (4, 5) se establece que:

$$\begin{aligned} \lambda &= \tau \\ \mu &= \lambda^3 \end{aligned}$$

y entonces es posible expresar  $Q_p$  en función de una de las razones, por ejemplo  $\mu$ :

$$Q_p = Q_m \mu^{\alpha + \beta/3 + \gamma/3} = Q_m \mu^b \quad (6)$$

Por otra parte, la razón de pesos ( $W_p / W_m = \omega$ ) es igual a la razón de masas ( $\mu$ ), por cuanto la densidad  $\rho$  se considera como una constante. Si además se asume para el modelo un peso unitario, la función del prototipo queda finalmente:

$$Q_p = a W^b \quad (7)$$

resultado que coincide con la ecuación (1) de la alometría.

El valor teórico de  $b$  para la función "presión arterial sistémica" (Pas), se puede obtener a partir del análisis dimensional de la presión y de los coeficientes de  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$  para la similitud biológica. Siendo la dimensión de la presión =  $[M^1 L^{-1} T^{-2}]$ , entonces  $\alpha = 1$ ;  $\beta = -1$ ;  $\gamma = -2$ .

Como  $b = \alpha + \beta/3 + \gamma/3$ , el exponente teórico para la "presión" será:

$$b = 1 - \frac{1}{3} - \frac{2}{3} = 0; \text{ es decir}$$

$$Pas = a \cdot W^{0-0} \quad (8)$$

Si se expresa en otra forma este resultado, dicha relación (Ecuación 8) significa que Pas es independiente del peso corporal ( $W$ ), o que Pas es constante en todos los animales, o bien, que si Pas es la variable dependiente, su representación gráfica en función del peso corporal es una recta paralela al eje de  $W$ . (Fig. 1).

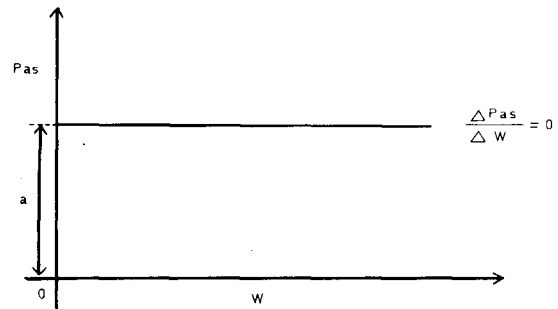


Fig. 1: Relación entre el peso corporal ( $W$ ) y la presión arterial sistémica (Pas) cuando el exponente reducido  $b$  es cero, es decir  $Pas = a W^0 = a$ .

Sin embargo, los valores experimentales de  $b$  son diferentes de cero, y ellos se obtienen de la relación entre los pesos corporales ( $W$ ) de distintos animales (2) y sus correspondientes presiones arteriales (Pas), lo cual permite obtener estadísticamente —por el método del cálculo de correlación— el valor empírico del exponente  $b$ .

Debido al hecho de haberse obtenido un valor experimental de  $b$  distinto del teórico y dada la diversidad de tamaño de los animales, postulamos la hipótesis siguiente. Es probable que exista una mínima presión, cuyo valor sea constante en todos los animales, y que asegure el flujo sanguíneo y el intercambio de sustancias con el compartimento intersticial. Por otra parte este valor mínimo y constante debe ser el de las arterias de las zonas distales, que por la posición del cuerpo son antigravitacionales en lo que a circulación sanguínea se refiere; éste es el caso de las arterias cerebrales. A los argumentos señalados, hay que agregar la importancia que los centros y las estructuras encefálicas en general tienen en la regulación de las funciones vitales.

Se puede calcular la presión sanguínea arterial de las arterias cerebrales (o de cualquier parte del sistema circulatorio), aplicando el teorema de Bernoulli, que relaciona las energías (E) que se encuentran en un fluido:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{presión}} + E_{\text{posición}} + E_{\text{cinética}}$$

El factor  $E_{\text{cinética}}$  en el sistema circulatorio es mínimo, (en reposo constituye sólo un 1% de la energía total), de modo que, despreciando esta energía de movimiento, la  $E_{\text{total}}$  en las arterias cerebrales será:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{presión}} - E_{\text{posición}} \quad (9)$$

El signo (-) de la  $E_{\text{posición}}$  o hidrostática, se debe a la dirección antigraavitacional de todo flujo sanguíneo que esté por sobre el nivel cardíaco.

La energía de posición es prácticamente nula cuando el animal está en decúbito horizontal (acostado), que es la forma en que se miden las presiones arteriales de reposo; es por ello que la presión arterial sistémica que experimentalmente se consigna como tal, corresponde a la "energía de presión" y no incluye la energía de posición; dicho en otras palabras, la presión hidrostática en estas condiciones es cero, por lo cual la presión medida en una arteria periférica grande corresponde al nivel cardíaco. A esto se agrega el hecho que en las grandes arterias (carótida, femoral), la pérdida de energía por roce es mínima (5), de tal modo que la presión medida en ellas tiene el valor de la presión arterial central.

Otra observación que nos ha inducido a plantear esta hipótesis, es el comportamiento del animal que presenta el mayor problema hemodinámico en cuanto a la magnitud de la altura de su cabeza con respecto al nivel cardíaco, cual es la jirafa. De acuerdo a la descripción de Warren (8), cuando el animal pasa de la posición recostada a la de pie, no lo hace en forma brusca, sino paulatinamente: primero se "sienta", luego de algunos segundos se pone de pie, y después comienza a caminar. Esta descripción estaría indicando una regulación postural de la presión, evitando así una hipotensión a nivel de la circulación cerebral.

#### b) Valores de presión arterial y distancia corazón-cabeza

Los valores numéricos de la presión arterial y peso corporal en los diferentes animales, se obtuvieron de mediciones efectuadas por numerosos investigadores (1, 3, 7, 8). Las cifras señaladas corresponden, por lo general, a los valores promedios, por lo cual son cifras representativas de los valores de presión arterial sistémica en cada especie animal.

Al considerar estos valores, es necesario tener presente que la teoría de similitud biológica considera valores experimentales promedio; las conclusiones que con ella se puedan deducir serán tanto o más valederos cuanto menores sean las variaciones individuales y cuanto mayor sea el número de casos utilizados para obtener dicho promedio.

Otro dato necesario para este estudio fue la distancia "corazón-cabeza" (d) definida como la altura a que está la cabeza con respecto a un plano horizontal que pasa por el corazón. Esta distancia se midió en la mayoría de los animales, y sólo fue preciso calcularla en la jirafa. (Fig. 2).

En cuanto a las mediciones directas, la distancia "corazón-cabeza" se midió en varios

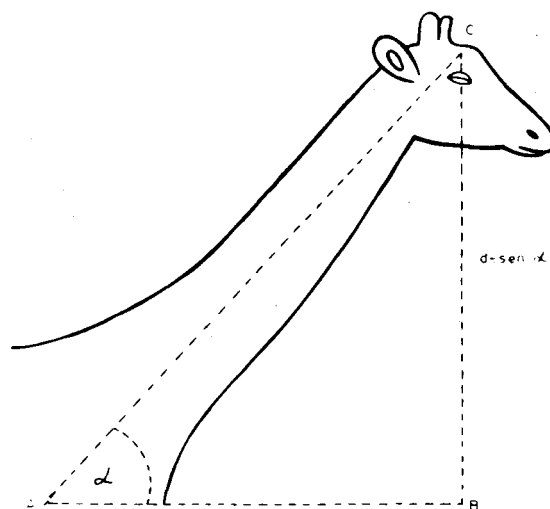


Fig. 2: Cálculo de la distancia corazón-cabeza (d). En el triángulo rectángulo ABC, A corresponde al corazón del animal y C es la parte más alta de la cabeza.

Si se conoce la distancia AC y el ángulo que forma el cuello de la jirafa con la horizontal, la distancia corazón-cabeza (d) = AC sen.

animales y se utilizó el promedio aritmético de dicha distancia para cada especie.

Una vez que se conocieron estas alturas, se calculó la presión hidrostática de la columna sanguínea:

$$P = \rho g h$$

en que P = presión hidrostática;  $\rho$  = densidad de la sangre, asumida como  $1.06 \text{ g. cm}^{-3}$ ; g = aceleración de gravedad =  $980 \text{ cm. seg.}^{-2}$ ; h = altura (distancia corazón-cabeza).

Estas presiones se expresaron en mm Hg. Se designó como "presión arterial cefálica" a la presión resultante de restar la presión hidrostática a la presión sistólica (presión cefálica sistólica), o a la presión diastólica (presión cefálica diastólica) y a la presión media (presión cefálica media).

## RESULTADOS

En la Tabla 1 se encuentran consignados los valores siguientes: peso corporal (2); presiones arteriales sistólica, diastólica y media (1, 3, 7, 8); la distancia corazón-cabeza; el número de animales en que se midió esta distancia, la presión hidrostática equivalente y las presiones cefálicas sistólica, diastólica y media, calculadas para las diferentes especies.

La relación entre las presiones arteriales sistémicas, sean éstas sistólica, diastólica o media, no es constante, y ni siquiera lineal. Las ecuaciones alométricas correspondientes son:

1) Presión arterial sistólica (mm Hg) =

$$112.1 W^{0.0488} \text{ (kg)}$$

TABLA 1

Valores de presiones arteriales medidas y calculadas en diferentes especies animales

Especie	Peso corporal W (kg)	Presión arterial sistólica (mmHg)	Presión arterial diastólica (mmHg)	Presión arterial media (mmHg)	Distancia corazón-cabeza (cm)	Número de animales	Presión hidrostática equivalente (mmHg)	Presión arterial sistólica cefálica (mmHg)	Presión arterial diastólica cefálica (mmHg)	Presión arterial cefálica media (mmHg)
ratón (1)	0.021	113	81	94.76	1.00	20	0.78	112.22	80.22	93.98
rata (1)	0.266	129	91	107.34	3.18	20	2.48	126.52	88.52	104.86
cobayo (1)	0.320	77	47	59.90	3.70	5	2.88	74.12	44.12	57.02
gato (1)	1.500	120	75	94.35	10.00	1	7.79	112.21	67.21	86.56
conejo (1)	2.250	110	80	92.90	7.50	4	5.84	104.16	74.16	87.06
perro (1)	10.900	112	56	80.08	19.00	5	14.81	97.19	41.19	65.27
hombre (1)	60.000	123	76	96.21	44.00	3	34.29	88.71	41.71	61.92
caballo (3)	407.400	121	85	100.48	49.55	40	38.62	82.38	46.38	61.86
bovino (1)	529.400	134	88	---	---	---	---	---	---	---
girafa (7)(8)	1.200.000	260	160	203.00	210.00	1	132.41	127.59	27.59	70.59

Los datos de presiones arteriales sistólica, diastólica y media se obtuvieron de la bibliografía citada en cada especie. La distancia corazón-cabeza se midió en animales cuyo número se especifica en columna adyacente.

2) Presión arterial diastólica (mm Hg) =

$$73.1 \frac{W^{0.0428}}{(\text{kg})}$$

3) Presión arterial media (mm Hg) =

$$90.44 \frac{W^{0.0504}}{(\text{kg})}$$

Se observa, que en los tres casos, el valor del exponente alométrico *b* es diferente de cero.

En la Fig. 3, se han representado las "presiones cefálicas" sistólica, diastólica y media, en relación doblemente logarítmica con el peso corporal. Las ecuaciones alométricas que de ellas derivan son las siguientes:

1) Presión cefálica sistólica (mm Hg) =

$$101.9 \frac{W^{0.0046}}{(\text{kg})}$$

2) Presión cefálica diastólica (mm Hg) =

$$60.9 \frac{W^{-0.0841}}{(\text{kg})}$$

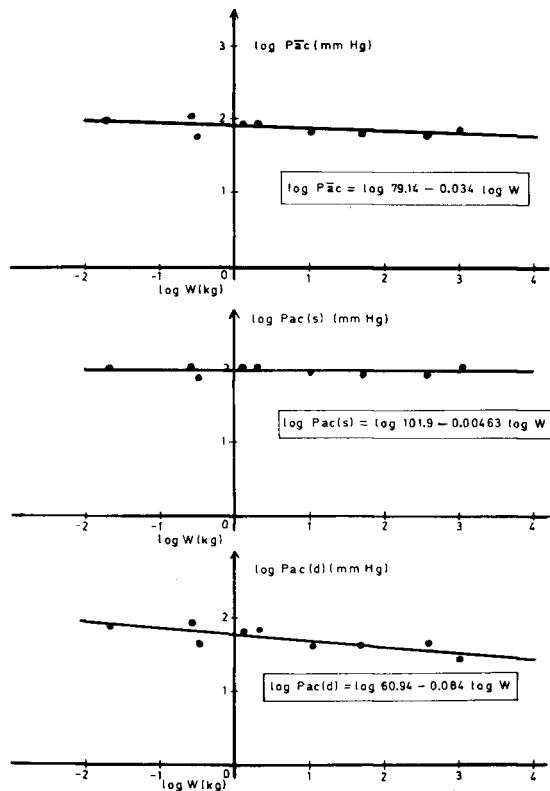


Fig. 3: Representación doblemente logarítmica de las presiones cefálicas sistólica (Pac (s)), diastólica (Pac (d)) y media (Pac) versus el peso corporal.

3) Presión cefálica media (mm Hg) =

$$79.14 \frac{W^{-0.0338}}{(\text{kg})}$$

Calculados los valores promedio y su desviación standard, se obtuvo lo siguiente:

- 1) Presión cefálica sistólica (mm Hg) = 102.79 ± 18.79
- 2) Presión cefálica diastólica (mm Hg) = 56.79 ± 21.09
- 3) Presión cefálica media (mm Hg) = 76.57 ± 17.06.

DISCUSION

Si se considera la gran diversidad de tamaño —desde un ratón de 20 g hasta la jirafa de 1.200.000 g— y en particular la distancia corazón-cabeza —desde 1 cm hasta 210 cm— parece poco probable que la presión sanguínea arterial pudiese ser constante, ya que desde un punto de vista hemodinámico, se puede predecir que los animales que naturalmente permanecen con la cabeza a distancias considerables del corazón, requieren a lo menos una presión mínima que asegure la irrigación cerebral normal. Por otra parte, si la norma para el valor de la presión arterial la constituye la de los animales con distancia "corazón-cabeza" considerable, aquellos animales que habitualmente mantienen su cabeza a poca distancia del nivel cardíaco, estarían manteniendo una presión adicional innecesaria, lo que significaría un gasto energético circulatorio adicional.

En los resultados obtenidos, se constata que las presiones arteriales "cefálicas", sistólica y media presentan un exponente *b* mucho menor, que las presiones sanguíneas arteriales medidas a nivel cardíaco.

Es indudable, que las variaciones de los pesos corporales y de las distancias "corazón-cabeza", introducen un grado de error, que explica el por qué el exponente reducido *b* experimental no sea exactamente igual a cero, pero se acerca mucho al valor teórico (*b* = 0.0), que se calcula según las reglas de similitud biológica (4, 6).

Tal como lo postula Warren (8), estos resultados inducen a suponer que la "norma" para la presión sanguínea arterial, es la presión a

nivel de las arterias cerebrales. Cabe preguntarse dónde se capta la información de estos valores de referencia. Podría postularse la existencia de tensoceptores en las propias arterias cerebrales, o bien, cada especie animal regula una presión arterial dada, que asegure una presión cefálica mínima compatible con una buena irrigación cerebral. Warren (8) ha postulado la existencia de un "barostato", que asegure una presión arterial cefálica constante.

#### RESUMEN

El exponente teórico  $b$  de la presión arterial en la ecuación alométrica de Huxley es cero, en cambio el valor experimental tiene cifras diferentes. En este trabajo se postula que la presión arterial sistémica cuyo exponente es cero, es la de las arterias que están más alejadas del corazón y sobre el nivel cardíaco (arterias cerebrales). Se calculó el expo-

nente  $b$  para la presión arterial cefálica (presión arterial a nivel cardíaco menos la presión hidrostática a la altura cefálica correspondiente). Con esta corrección se encontró una mejor correlación entre los valores experimentales y teóricos descritos en la teoría de similitud biológica.

#### REFERENCES

1. ALTMAND, P.L., & DITTMER, D.S. (Editors) *Biology Data Book*. p. 238-240, Fed. Amer. Soc. Exp. Biol. Washington D.C., 1964.
2. DITTMER, D.S., & GREBE, R.M. (Editors) *Handbook of Respiration*. p. 22-24, W.B. Saunders. Philadelphia, 1958.
3. GRAUWILER, J., *Herz und Kreislauf der Säugetiere*. Birkhauser, Basel, 1965.
4. GUNTHER, B., *Physiol. Revs.* 55:659-1975.
5. GUYTON, A., *Tratado de Fisiología Médica*. p. 237. W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1977.
6. GUNTHER, B., *Fortschritte Exp. Theoret. Biophys.* 19:1-111, 1975.
7. VAN CITTERS, R.L., KEMPER, W.S., FRANKLIN, D.L., *Comp. Biochem. Physiol.* 24:1035-1041, 1968.
8. WARREN, J.V., *Scientific Amer.* 231:96-105, 1974.