

ANALES DE OTORRINOLARINGOLOGÍA; 2: 13-23

Calor y estimulación vestibular

SIERRA GALERA, G.; FERNÁNDEZ DÍAZ, F.; ROQUETTE GAONA, JM.; BARTUAL PASTOR, J;
CATALÁN ORELLANA, E.

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ. CÁTEDRA DE O.R.L., SERVICIO DE O.R.L. HOSPITAL UNIVERSITARIO DE
PUERTO REAL (SAS). DIRECTOR: PROF. J. BARTUAL PASTOR.

FECHA DE RECEPCIÓN: JULIO 1999.

FECHA DE ACEPTACIÓN: AGOSTO 1999

CORRESPONDENCIA:

G. SIERRA GALERA

HOSPITAL UNIVERSITARIO.

CTRA. N-IV Km. 665, 11500 PTO. REAL (CÁDIZ)

BIBLID [0213-9162 (1999): 2; 13-23]

Resumen

Bàrány en 1905 analizó con detenimiento el nistagmo aparecido durante la irrigación del oído con agua fría y caliente, justificando este fenómeno en base a corrientes convectivas en el canal semicircular lateral. Esta hipótesis ha sido aceptada hasta que fue puesta en cuestión a partir de las experiencias llevadas a cabo en el Skylab.

De los diversos mecanismos barajados como responsables en la estimulación vestibular en las pruebas calóricas, los que suponen corrientes de convección o dilatación de la endolinfa necesitarían, pensamos, de gradientes térmicos muy superiores a los puestos en juego durante dichas pruebas, que según nuestros cálculos, siempre favorecedores de dichas hipótesis, parecen insuficientes.

Palabras clave: canal semicircular, convección, nistagmo, calor.

Summary

In 1905 Bàrány analyzed the nystagmus that appears during the irrigation of the ear with cold and hot water, justifying phenomenon due to con-

vectives currents in the horizontal semicircular canal. This hypothesis has been widely accepted until doubt was casted on it by the experiences carried out in the Skylab.

Of the various mechanisms that could be responsible for the vestibular stimulation in the caloric tests, those which entail convection currents or endolymph expansion would need, we think, thermal gradients very superior to those which occur during these tests, that according to our calculations, always in favor of such hypothesis, seem insufficient.

Key words: semicircular canal, convection, nystagmus, heat.

Introducción

La sensación vertiginosa causada por la irrigación del conducto auditivo externo con agua a distinta temperatura que la corporal, se acompaña en la mayoría de las ocasiones de un movimiento rítmico de los ojos no intencionado (nistagmo). Este fenómeno fue descrito por primera vez en 1896 por Urbantschitsch (1) quien atribuyó la responsabilidad de esta respuesta a la baja temperatura del agua, mientras otros autores anteriores lo relacionaban con la presión del agua sobre el oído. Más tarde, en 1905 Bàrány analizó con detenimiento estos hechos, comprobando que al irrigar con agua fría el CAE de un paciente en decúbito supino con la cabeza en 30° de anteflexión (posición en que el plano del CSL queda en posición vertical con la ampolla hacia arriba) se producía un nistagmo con fase rápida hacia el oído contrario, y que éste era hacia el mismo oído si se irrigaba con agua caliente. También observó que la dirección del nistagmo se invertía si el paciente se situaba sentado con la cabeza en 60° de anteflexión (posición en que el plano del CSL queda en posición vertical, pero con la ampolla hacia abajo) (2).

En ese momento la fisiología sobre el sistema vestibular se basaba principalmente en los estudios realizados por Flourens en 1842, los de Bernard en 1876, los de Mach y Breuer y los de Ewald en 1892².

Flourens había observado que al lesionar el conducto semicircular lateral a un palomo, aparecían en éste, movimientos cefálicos anómalos en el plano horizontal, y que al lesionar los otros dos conductos semicirculares, los movimientos anormales aparecían en el mismo plano de los conductos destruidos, llegando así a la conclusión que cada CSC dominaba un plano del espacio.

Bernard en su memoria "Les organes périphériques du sens de l'espace" presentada en la Academia de las Ciencias de París en 1876 reafirmaba el

papel de los CSC como los principales órganos periféricos encargados de captar la posición en el espacio, y el papel del SNC en el procesamiento de esta información.

Por la misma fecha Mach y Breuer habían estudiado el movimiento del líquido endolinfático en los CSC, describiendo la corriente endolinfática de inercia.

Ewald en 1892 había demostrado que las corrientes endolinfáticas que se dirigían hacia la ampolla, se acompañaban siempre de un movimiento lento de los ojos y de la cabeza en el mismo sentido que dicha corriente, y que a este movimiento le seguía uno rápido, de carácter compensador, en sentido contrario al anterior.

Respecto a la forma en que la corriente de endolinfa actúa sobre las estructuras receptoras y transductoras contenidas en el laberinto membranoso, la idea que se tenía concuerda básicamente con la que predomina en la actualidad apoyada por los experimentos de Steinhäussen en 1933 y Melville Jones en 1974 (3) de que la corriente de endolinfa provoca un desplazamiento de la cúpula, la cual funciona como un péndulo amortiguado que en su movimiento desplaza a los cilios, que a su vez modifican la actividad de las células sensoriales.

También era conocido que los cuerpos al calentarse se dilatan, es decir aumentan su volumen pero conservan su masa, de manera que su densidad se ve disminuida. Cuando este fenómeno se da en un fluido de forma adiabática, es decir sin intercambio de calor con el que le rodea, la porción calentada asciende en el seno de la que se conserva fría en virtud de esta disminución de su densidad, ocupando fluido frío el espacio dejado por ésta al ascender, creándose así una corriente llamada de convección.

Así pues Bãrãny pensó que la energía calórica del agua de irrigación, era transmitida a la endolinfa, produciendo una corriente de convección en el seno de la misma en sentido ampulípeto cuando la ampolla se situaba hacia arriba, originando así el nistagmo observado según los estudios de Ewald. Este mecanismo explicaría también el fenómeno observado por él, al situar el CSL con la ampolla hacia abajo, pues en este caso la corriente de convección sería ampulífuga, explicando así la inversión del nistagmo. Esta explicación ha sido llamada desde entonces hipótesis de Bãrãny.

El objetivo de este trabajo es revisar los aspectos termodinámicos que influyen en la génesis de la estimulación vestibular desde la perspectiva de los conocimientos actuales, y comprobar si los resultados siguen apoyando o por el contrario están en discordancia con la hipótesis de Bãrãny, pues que una hipótesis parezca consecuente con los hechos experimentales no la hacen váli-

da si no se demuestra primero la veracidad de las premisas necesarias para que dicha hipótesis pueda afirmarse.

En cuanto a los aspectos físico-térmicos implicados no nos parecía probable que corroboraran la hipótesis de Bârány, en primer lugar porque la magnitud de los gradientes térmicos involucrados en la realización de las pruebas calóricas rutinarias, difícilmente eran suficientes para producir una corriente de convección en una estructura tan profunda como los canales semicirculares y en segundo lugar por el hecho conocido de que en situación de ingravidez continua apareciendo el nistagmus tras la irrigación del CAE de sujetos sanos y sin embargo una corriente de convección es físicamente imposible (4).

Material y método

Hemos realizado un sencillo estudio físico-matemático en el que hemos calculado:

- 1.- el calor radiado por el tímpano durante la realización de unas pruebas calóricas standard con temperaturas del agua de 30 °C y 44°C
- 2.- el aumento de temperatura que sufre la endolinfa a causa de este calor
- 3.- la dilatación que experimenta la endolinfa al calentarse

CALCULO DEL CALOR RADIADO POR EL TÍMPANO

El calor radiado en la unidad de tiempo por el tímpano tras la irrigación, viene dado por la expresión:

$$\dot{Q} = A\alpha\sigma (\theta_1^4 - \theta_2^4)$$

Donde A es la superficie radiante, en nuestro caso la del tímpano, α es el poder absorbente del calor de estas estructuras, σ la constante de Stefan-Boltzmann, θ_1 la temperatura en grados Kelvin del tímpano en el momento de la irrigación y θ_2 la temperatura en la misma escala y momento de la pared interna del oído medio. Supondremos que debido al escaso grosor de tímpano, éste transmita instantánea y totalmente la energía comunicada por el agua

de irrigación; que α para un tejido vivo sea de 0'97, que la irrigación se realice a 44°C de temperatura y que la superficie timpánica sea de 1cm² , entonces nos quedaría:

$$\dot{Q} = 10^{-4} \cdot 0,97 \cdot 56,6 \cdot 10^{-9} \cdot (317^4 - 310^4) \approx 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ watos}$$

$$A = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\alpha = 0,97$$

$$\sigma = 56,6 \times 10^{-9} \frac{\text{watos}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^4}$$

$$\theta_1 = 317^\circ \text{ K}$$

$$\theta_2 = 310^\circ \text{ K}$$

Estos 4'7 miliwatos representan la energía transmitida por segundo, desde la membrana timpánica (potencia radiada).

El cálculo de la energía por unidad de superficie, que llega a la pared interna de la caja del tímpano, lo haremos despreciando la interferencia producida por las estructuras que ocupan el oído medio y que se interponen en el camino de la radiación, y sería :

$$\Delta\omega = \frac{4\pi r^2}{4\pi(r + \Delta r)^2} = 0,64 \text{ (coeficiente de dispersión de la energía)}$$

$$4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,64 = 3 \cdot 10^{-3}$$

$\Delta r = 0,5 \text{ cm.}$ (distancia entre tímpano y la pared interna del oído medio)

$r = 2 \text{ cm.}$ (ver Fig. 1)

Y la energía por segundo que alcanza la pared opuesta es entonces de 3 miliwatos. Esta energía iría disminuyendo a medida que las temperaturas en una y otra parte se fuesen igualando y por lo tanto disminuyendo el gradiente térmico.

AUMENTO DE LA TEMPERATURA EN LA ENDOLINFA DEL CSL

Aunque ya hemos visto que la energía radiada por el tímpano va disminuyendo desde el principio de la irrigación, vamos a suponer para este cálculo que el valor máximo de radiación es constante. De la totalidad de la energía acumulada en la zona circundante al CSL a éste le correspondería una fracción de ella, proporcional a la relación de volúmenes de la zona circundante (V_c) y del canal (V_z). Si consideramos que la longitud del CSL es de 15mm. Y su diámetro de 0,3 mm., entonces:

$$\frac{V_z}{V_c} \approx \frac{15\text{mm} \cdot (0.3\text{mm})^2 \cdot \pi}{5\text{mm} \cdot (5\text{mm})^2 \cdot \pi} \approx 10^{-2}$$

Por lo tanto la endolinfa solo recibe una centésima parte de la energía radiada, lo cual supondría en función de tiempo:

$$E = t\dot{Q} \frac{V_z}{V_c} = t \cdot 3 \cdot 10^{-5} \text{ watos} \cdot \text{seg}$$

\dot{Q} = potencia ($3 \cdot 10^{-3}$ watos)
 t = tiempo en segundos

Con esta energía el incremento térmico que sufriría la endolinfa sería de:

$$\Delta T = \frac{E}{c \cdot m} = \frac{t \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{4180 \cdot 4,2 \cdot 10^{-6}} = t \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$$

c = calor específico de la endolinfa (4180 julios /Kg.)

m = masa de la endolinfa ($4,2 \cdot 10^{-6}$ Kg)

t = tiempo en segundos

Esto es, durante los primeros segundos de estimulación mientras el incremento térmico se mantiene más o menos constante, el incremento de la temperatura de la endolinfa calculado es de aproximadamente 1,7 miligrados por segundo. Este valor deber ser necesariamente inferior, al haber despreciado en este cálculo el mecanismo evacuador de calor que supone la circulación sanguínea.

DILATACION DE LA ENDOLINFA

A efectos prácticos y como solo nos interesa obtener el orden de magnitud de dicha dilatación, podemos asimilar el CSL a un tubo cilíndrico muy delgado de 15 mm. de longitud y calcular la dilatación lineal, que sería:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,7 \cdot 10^3 \cdot t = 5,1 \cdot 10^{-9} \cdot t \text{ metros}$$

α = coeficiente de dilatación del agua

L_0 = longitud inicial de la columna líquida

Es decir, de alrededor de 5 milimicras por segundo.

Discusión

Se han barajado por diferentes autores diversos mecanismos como responsables de la estimulación vestibular en el transcurso de las pruebas calóricas; unos dependientes de la gravedad, fundamentalmente la creación de corrientes de convección y otros independientes de la misma como la dilatación de la endolinfa (5) (6) (7) (8) (10) (11) (12), la deformación de las estructuras membranosas del laberinto por un fenómeno de "inflado", (10), (11) variaciones en la presión osmótica, (11) y la estimulación directa del n. vestibular (13) (14).

Todos estos mecanismos tienen en común, la necesidad de un intercambio de calor entre oído externo y oído medio.

Para dilucidar cual es el mecanismo físico por el que se produce este intercambio Feldmann, Huttenbricnk y Delank (15) han estudiado los incrementos de temperatura que se producen en la pared ósea del oído medio de temporales de cadáver tras irrigaciones del CAE con agua a 48°C, y han encontrado, que después de fresar las paredes óseas del oído medio, las cuales serían las principales rutas de transmisión del calor por conducción, el incremento de temperatura en el CSL es mayor y más rápido que en el espécimen intacto, así como que este efecto es drásticamente reducido si se interpone una placa reflectante entre el tímpano y el laberinto, llegando a la conclusión que la radiación es el principal mecanismo implicado en el intercambio de calor entre OE y OI.

Nosotros hemos calculado en primer lugar el calor radiado por el tímpano durante la realización de unas pruebas calóricas con agua a 44°C, suponiendo que el gradiente térmico entre el tímpano y la pared opuesta a él se mantiene constante, aunque en la realidad iría disminuyendo con el tiempo y por lo tanto también lo haría la energía transmitida.

Encontramos que la energía que alcanza la pared interna del oído medio es de aproximadamente 3mW. Esta energía suponemos que actuará en su totalidad en la región circundante al CSL, supuesto este favorecedor, puesto que otras estructuras del OM serían participes de la absorción de la misma, así como parte de esta sería retirada por la circulación sanguínea de la zona.

En segundo lugar hemos calculado el aumento de temperatura en el CSL, obteniendo un resultado de aproximadamente 1'7 m°C/seg. Esto constituye un valor muy superior al que en realidad se establece entre la zona más próxima a la cavidad del oído medio y la cresta ampular y que sería el gradiente térmico que debería establecer el flujo convectivo, puesto que este se establece en función, no de un gradiente temporal sino espacial, es decir este gradiente de 1'7 m°C/seg. nos daría la variación de temperatura en el CSL entre el comienzo de la irrigación (37 °C) y el final de la prueba, mientras que el gradiente que produciría el flujo convectivo vendría dado por diferencias térmicas entre distintos puntos de la endolinfa, que serían siempre inferiores a este valor calculado.

Pau y Limberg (8) investigaron las características que tendría el supuesto flujo convectivo en el laberinto membranoso, asumiendo que la cantidad de calor que llegara a éste fuera capaz de originarlo, y encontraron que las corrientes generadas al variar la temperatura en un punto de la columna de endolinfa no serían ampulípetas ni ampulífugas, sino que consistirían en una circulación convectiva cuyo sentido iría de la cresta a la cúpula o de cúpula a cresta Fig.2

En ambos casos y debido a la anatomía del conjunto ampolla-cresta-cúpula, la deformación sufrida por estas estructuras debería ser muy parecida en uno y otro caso.

Respecto a los mecanismos independientes de la gravedad hemos calculado la dilatación de la endolinfa por efecto del calor, encontrando que la dilatación lineal sería de 5 $m\mu$ /seg. Pau y Limberg (12) también estudian el aumento de volumen por la dilatación de la endolinfa por el aumento de la temperatura, estimando que el valor de desplazamiento del líquido durante la realización de unas pruebas calóricas sería muy similar al producido por los mecanismos dependientes de la gravedad.

O'Neill, Calhoun y cols. estudian la influencia que las diferencias anatómicas del hueso temporal pueden tener en la transferencia de calor hacia los canales semicirculares, encontrando que el único factor valorable es el diámetro del CAI, ya que variaciones de 0.5mm originarían diferencias térmicas de hasta el 10%.

Respecto al modo en que una corriente endolinfática produce la activación de los receptores laberínticos, Dohlman piensa que en el curso de una estimulación vestibular la cúpula permanece inmóvil (16). Su único papel sería dirigir el flujo de endolinfa que proviene de los canales semicirculares membranosos hacia el espacio subcupular situado entre la superficie de las células sensoriales y la cúpula. Este flujo así orientado provocaría el desplazamiento de los cilios, que en este supuesto no estarían ligados a la cúpula. Esta idea que no está de acuerdo con lo que generalmente se puede comprobar con microscopía electrónica, puede sin embargo, ser posible en la parte media de la cresta (Limm,1979) (3).

Gentine, Eichhorn, Kopp y Conraux (10) señalan que el principal argumento de la teoría hidrodinámica de Bärány es que el nistagmus es una función de la posición de la cabeza respecto a la vertical, hecho que fue claramente demostrado por Coats y Smith, (13), sin embargo los resultados obtenidos por estos muestran una disimetría que no puede ser explicada por dicha teoría (10).

Tomando en consideración todos estos factores cabe preguntarse: ¿es válida aún la teoría emitida a principio de siglo por Robert Bärány?. El principal argumento a favor de la misma es que explica de forma satisfactoria los fenómenos que ocurren durante las pruebas calóricas. Müller, Deile, Reker y Zell (17) realizaron un estudio en 22 pacientes sanos, analizando con un sistema informático las respuestas a la estimulación calórica mediante irrigación alternante, y encuentran pese a existir diferencias significativas entre los dis-

tintos individuos, que el 85% de la respuesta nistágmica podría ser explicada por la hipótesis de Bårány, pero que en algunos casos la respuesta fue completamente independiente del supuesto convectivo. ¿Explica tan satisfactoriamente esta hipótesis los fenómenos en estudio?

Conclusiones

Creemos que la cantidad de energía calórica que llega a las distintas porciones del laberinto membranoso durante la realización standard de pruebas calóricas es incapaz de generar en estas estructuras y en tan escaso tiempo una corriente de convección capaz de producir una respuesta.

Por otra parte habría que valorar si el modelo anatómico expuesto por Dohlman es válido ya que según este, pequeñísimos movimientos de la endolinfa en el canal semicircular, generarían velocidades de flujo mucho mayores en la región subcupular, debido a la diferencia de diámetro entre ambas regiones.

Bibliografía

1. Wodak E.: Kurze feschichte der Vestibularisforschung. Georg-Thieme Verlag, Stuttgart., 1956; 11
2. Bartual J.: Semiología Vestibular. Unimed., 1980; 44-63
3. Citado por: Sans A.; Raymond J.: Función vestibular y equilibración. Fisiología neurosensorial en ORL. Masson S.A., 1985; 148
4. Von Baumgarten R., Benson A., Berthoz A., Brandt Th., Brand U.: Effects of rectilinear accelerations, optokinetic and caloric stimulations in space. Science, 1985, 225, 208-212.
5. Grohmann R.: Biophysikalische Gesichtspunkte zum Ergebnis des Space-lab-Experimentes und Folgerungen für die Theorie Båránys. Laryngol-Rhinol-Otol-Stuttg, 1985 Mar; 64(3): 142-4
6. Scherer H., Clarke AH., Baetke F.,: Überlegungen zur Physiologie der kalorischen Gleichgewichtsreaktion. Konsequenzen aus den Ergebnissen des Weltraumexperimentes in Spacelab 1 vom Dezember 1983. Laryngol-Rhinol-Otol-Stuttg., 1985 May; 64(5): 263-8
7. Grohmann R.,: Kritische Anmerkungen zur Interpretation der thermischen Reaktion des Labyrinths im schwerelosen Zustand und ein Beweis für die Gültigkeit der erweiterten Theorie Båránys. HNO., 1986 Jan; 34(1): 40-5

8. Pau HW., Limberg W.,: Die Bedeutung von schleichenden Stromungen fur die kalorische Erregbarkeit der Gleichgewichtsorgane in Schwerelosigkeit. *Laryngol-Rhinol-Otol-Stuttg.*, 1988 Dec; 67(12): 616-20
9. Manfrin M., Mira E., Poletti A., Valli P., Botta L., Zucca G., Buizz A.: Modifications de la pression des liquides labyrinthiques et activité électrique des récepteurs ampullaires. Communication au 24 Symposium d'otoneurologique de langue française. Bordeaux 15 et 16 de juin 1990.
10. Gentine A., Eichhorn JL., Kopp C., Conraux C.: Modelling the action of caloric stimulation of the vestibule. IV. The global mechanical model. *Acta-Otolaryngol-Stockh.*, 1991; 111(4): 633-8
11. Conraux C., Gentine A., Kopp C., Eichhorn JL.,: Nouvelle approche du mecanisme de la reponse vestibulaire a la stimulation calorique. *Ann-Otolaryngol-Chir-Cervicofac.*, 1993; 110(2): 75-80
12. Pau HW., Limberg W.,: Strömungskinetik der Endolymph bei kalorischer Reizung. *Laryngorhinootologie.*, 1989 Jun; 68(6): 342-6
13. Coats A.C., Smith S.Y.: Body position and the intensity of caloric nystagmus. *Acta Otolaryngol.(Stockh)*, 1967;63: 575-532
14. Smolders J.W.T., Klinke R.: Effects of temperature on the properties of primary auditory fibres of spectacled Caïman (CaVman Crocodiles). *J. Comp. Physical A*, 1984; 155: 19-30.
15. Feldmann H., Huttenbrink KB., Delank KW.,: Transport of heat in caloric vestibular stimulation. Conduction, convection or radiation?. *Acta-Otolaryngol-Stockh.*, 1991; 111(2): 169-75
16. Dohlman G.F.: Critical review of the concept of cupula function. *Acta Otolaryngol. Suppl.*, 1980; 376
17. Mühlner-Deile J., Reker U., Zell E.: Uber die Bedeutung der Konvektions-Hypothese Bäránys fur den thermischen Nystagmus. Ein quantitativer Vergleich der Intensität des thermischen Nystagmus in Bauch-und Rückenlage. *Laryngol-Rhinol-Otol-Stuttg.*, 1986 Mar; 65(3): 154-7

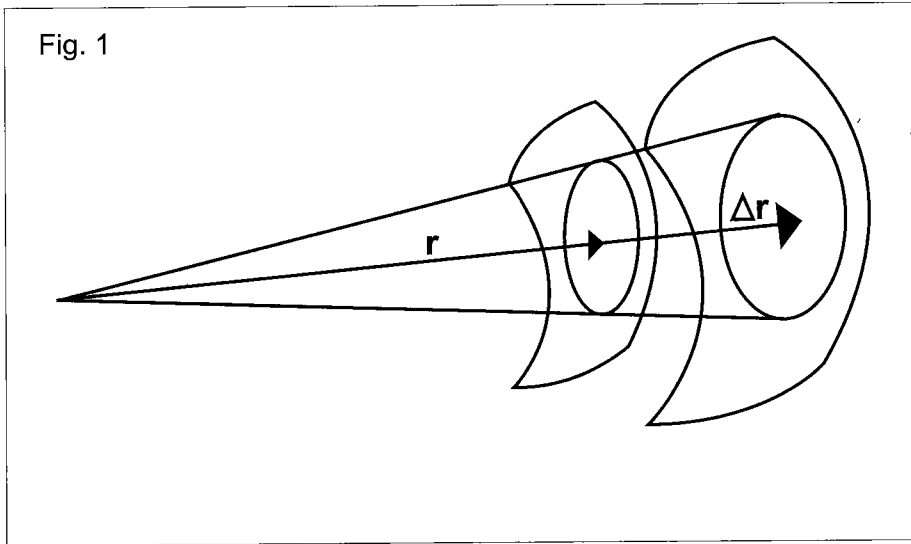


Figura 1. El cálculo de la energía que llega a la pared interna del oído medio lo hacemos suponiendo que la distancia entre esta y el tímpano (Δr) es de 0'5cms.

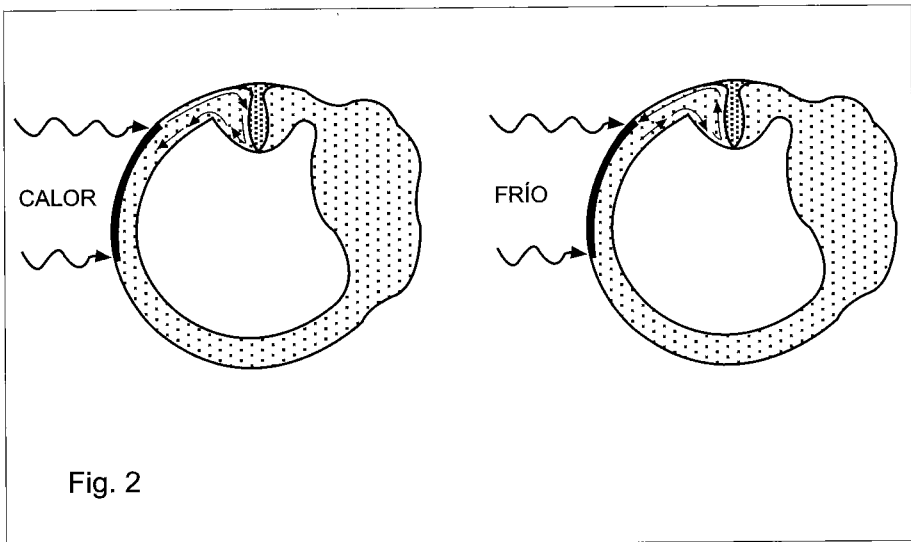


Figura 2. Las corrientes endolinfáticas originadas al variar la temperatura en un punto de la columna de endolinfa, no serían ni ampulípetas ni ampulífugas, sino que consistirían en una circulación convectiva cuyo sentido iría de la cresta a la cúpula o de la cúpula a la cresta.